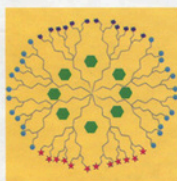


материалов и технологий

Л. ФОСТЕР

Нанотехнологии.
Наука,
инновации
и возможности



ТЕХНОСФЕРА

Линн Фостер
Нанотехнологии. Наука,
ИННОВАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ

Текст предоставлен правообладателем
http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=4977425
Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности: Техносфера; Москва; 2008
ISBN 978-5-94836-161-1, 0-13-192756-6

Аннотация

В предлагаемой книге авторы – известные ученые и бизнесмены, занимающиеся теоретическими и практическими проблемами нанотехнологий, – описывают состояние дел и перспективы их развития на ближайшее десятилетие, а также возможное воздействие нанотехнологий на глобальные процессы.

Книга предназначена для широкого круга читателей: научных работников, специалистов, а также студентов профильных учебных заведений.

Содержание

Предисловие сенаторов Джозефа Либермана и Джорджа Аллена	5
Предисловие редактора	6
Сведения о редакторе и составителе сборника	10
Раздел I	11
Глава 1	11
1.1. История биотехнологии	12
1.2. Концепция 1. Уроки S-образной кривой	14
1.3. Концепция 2. Уроки коммерциализации технических новшеств	18
1.4. Общие выводы из анализа S-образных кривых развития любых технологий	19
1.5. Общие выводы из анализа коммерческих инноваций в области биотехнологий	19
1.6. Будущее нанотехнологии	20
Глава 2	22
2.1. Транспортировка и хранение энергии	24
2.2. Энергия для всех	26
Глава 3	27
3.1. Как не ошибиться в поисках успеха?	28
3.2. Агрессивная реклама	29
3.3. Факторы, затрудняющие прогнозирование	31
3.4. Добродетельный круг	34
3.5. Превращение науки в технологию и бизнес	36
3.6. Возвращение к реальности	37
Раздел II	38
Глава 4	38
4.1. Экспоненты технологического роста	39
4.2. Закон Мура	40
4.2.1. Важность закона Мура	41
4.2.2. Проблемы современной парадигмы	43
4.3. Молекулярная электроника	45
4.4. Коммерциализация нанотехнологии	47
4.4.1. Инновации происходят на границе познания	48
4.4.2. Хронология событий на рынке нанотехнологий	49
4.4.3. Проблема вертикальной интеграции стандартов и технических условий	51
4.4.4. Проблемы взаимодействия	52
4.4.5. Как выглядит масштабная иерархия в молекулярной нанотехнологии?	53
4.4.6. Проблемы интеллектуальной собственности в разных моделях бизнеса	57
4.5. Системы, программное обеспечение и другие абстракции	58
4.5.1. Биологическая муза нанотехнологий	59

4.5.2. Ускорители нанотехнологии. Квантовое моделирование и масштабные эксперименты	61
4.6. Попытки прогнозирования	63
4.6.1. Краткосрочная перспектива, быстрое получение прибыли	63
4.6.2. Среднесрочная перспектива	63
4.6.3. Далекая перспектива	63
4.7. Этические проблемы. Гены, мемы и оцифровывание	64
4.8. Заключение	65
Глава 5	66
5.1. Инвестирование венчурного капитала	66
5.1.1. Вложение венчурных капиталов в нанотехнологии	67
5.1.2. Нанотехнологические инновационные фирмы	67
Конец ознакомительного фрагмента.	69

Линн Фостер

Нанотехнологии. Наука, ИННОВАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ

Предисловие сенаторов Джозефа Либермана и Джорджа Аллена

В декабре 2003 года президент США подписал одобренный Конгрессом Акт о развитии нанотехнологии в XXI веке (Public Law 108–153), что определило направления и цели научно-исследовательских работ и внедрения результатов в этой новой, захватывающей области науки, обещающей в близком будущем преобразовать окружающий нас мир. Манипуляции веществом на молекулярном уровне, являющиеся основой нанотехнологии, позволяют создавать новые типы материалов и устройств с уникальными свойствами, недостижимыми для существующих технологий. Естественно, такое развитие науки должно привести к весьма значительным изменениям в существующих технологиях и создать целый ряд совершенно новых отраслей промышленности, что будет иметь фундаментальное значение для развития американской и мировой экономики. По мнению специалистов, экономический эффект внедрения нанотехнологий в глобальном масштабе уже в ближайшем десятилетии может достигнуть сотен миллиардов и даже триллиона долларов. Потенциальные возможности новой науки представляются фантастическими, а сфера возможного применения охватывает самые разные области: от создания лекарств «направленного» действия против опасных болезней (включая рак) и энергетики до новых методов сохранения окружающей среды.

Разнообразие и богатство потенциальных возможностей нанотехнологий не остались незамеченными общественностью и правительством. За последние годы появилось множество публикаций о научных, экономических и инвестиционных проектах в этой области. Нанотехнологии стали составной частью мейнстрима средств массовой информации, наглядно свидетельствуя не только о повышении интереса к этой области, но и доказывая, что новые технологии и научные достижения уже вышли из стадии лабораторных разработок. Нанотехнология становится, как говорят американцы, фронтиром (расширяющейся границей, передовой линией) развития, и сейчас настало время задуматься о том, как фундаментальные научные открытия и интересные лабораторные опыты могут быть воплощены в новые технологии и новые товары. Речь идет не только о чисто экономических проблемах, а еще и о том, что, исходя из предыдущего опыта, мы обязаны думать и о серьезных опасностях, связанных, например, с воздействием новых производств на экологию и т. п. Как показывают помещенные в книгу обзорные статьи по разным проблемам нанотехнологии, уже сейчас достигнут значительный прогресс во многих направлениях.

*сенатор Джо Либерман
сенатор Джордж Аллен
Вашингтон, округ Колумбия, ноябрь 2005*

Предисловие редактора

За прошлое столетие технический прогресс неузнаваемо изменил окружающий нас мир. Стоит отметить, что средняя продолжительность жизни возросла вдвое, а транспортные и информационные системы достигли уровня, который казался фантастическим еще пару поколений тому назад. Одной из характерных особенностей современной науки и жизни вообще стало немыслимое ранее ускорение темпов самого развития, постоянное обновление образа жизни, обусловленное научным прогрессом и техническими инновациями.

В наши дни наука вплотную подошла к возможности прямого воздействия на отдельные атомы и молекулы, что создало новое метанаправление развития, получившее общее название нанотехнологии и имеющее огромное значение как для самой науки в целом, так и для промышленного применения. Размеры объектов и связанных с ними процессов, представляющих интерес для нанотехнологии (и предлагаемой книги), составляют 100 нанометров и меньше (напомним, что 1 нанометр = 10^{-9} м, то есть равен одной миллиардной части метра, а для сравнения просто укажем, что толщина человеческого волоса составляет 50 000 нанометров). Основной особенностью новой науки с точки зрения чистой физики является то, что при таких размерах и масштабах перестают работать привычные законы физики (прежде всего, так называемая классическая, или ньютоновская механика), а развитие процессов определяется законами и постулатами квантовой механики.

В некоторых конкретных, причем наиболее передовых областях (компьютерная техника, биотехнология, материаловедение) использование нанотехнологий позволяет уже в ближайшем будущем надеяться на результаты, сопоставимые с тем, что было достигнуто за несколько последних десятилетий. Например, она делает реальным создание сверхмощных компьютеров, очень легких и прочных материалов для авиации, новых лекарственных препаратов против самых опасных болезней, высокоэффективных преобразователей солнечной энергии и т. п. Подчеркну, что речь идет о множестве достижений самого разного масштаба в разнообразных областях науки и техники, то есть о целом «каскаде» или «волне» открытий и применений, а не об одном крупном открытии сверхкрупного масштаба. Историки науки и техники любят использовать термин «новая великая вещь» (подразумевая под этим, например, транзистор или лампу накаливания Эдисона). Нанотехнология обещает нам целый набор новых великих вещей, сводящихся не к существенному изменению окружающего мира и бытовых условий (подобно тому как лампочка Эдисона преобразовала жизнь общества), а к масштабному изменению глобальных принципов наук и технологий. Например, нанотехнологии позволят нам создать систему автоматического управления всем освещением (или даже электроснабжением) в целых городах или регионах, что подразумевает принципиальное изменение жизни общества.

Для больших современных городов, кстати, создание автоматической и «умной» системы управления движения может оказаться столь же важным событием, что и лампочка Эдисона для освещения индивидуальных жилищ. Не боясь повториться, скажу, что нанотехнология представляет собой не конкретное, одиночное открытие, а целый набор физических явлений и их применений (обусловленных размерными эффектами), используемых в качестве инструментов, приемов или идей в самых разных научных дисциплинах. Именно в этом и состоит основное значение и роль нанотехнологий, поскольку свойства материалов и процессов в наномасштабе существенно отличаются от свойств в привычном нам макроскопическом окружении, что и создает совершенно неожиданные возможности нового применения. Например, наноматериалы могут существенно отличаться от привычных нам веществ по своей реакционной способности (в пересчете на единицу поверхности), вследствие чего

их применение в качестве лекарственных препаратов приводит к эффектам, невозможным в классической медицине.

В качестве наглядного примера можно привести строение углеродных соединений, столетиями бывших объектами изучения физики и химии. Общеизвестно, что уголь и алмаз состоят из атомов углерода, а поразительная разница в их свойствах обусловлена лишь строением кристаллической решетки. За последние годы ученые обнаружили, что помимо этих известных форм в нанометрическом масштабе атомы углерода образуют цилиндрические трубки, которые нельзя даже сравнивать по характеристикам с алмазом или углем, поскольку они одновременно прочнее стали и прекрасно проводят электричество. Неудивительно, что за последние десять лет ученые интенсивно занимались такими материалами и уже нашли для углеродных нанотрубок множество фантастических применений в электронике и медицине, так что сейчас основной вопрос заключается лишь в правильном и эффективном внедрении новых открытий. Другой практический пример относится к производству солнечных батарей, о которых читатель наверняка слышал. Основная техническая проблема, связанная с ними, заключается в том, что создаваемый в них поток электронов (электрический ток) необходимо многократно отражать от одной поверхности к другой. Нанотехнология неожиданно позволяет уже сейчас существенно повысить площадь электродов и тем самым значительно увеличить коэффициент полезного действия таких батарей, а также ввести ряд других принципиальных улучшений в работу этих устройств. Не стоит даже говорить о том, что использование более дешевых, безопасных в обращении и экологически безвредных источников электричества может кардинально повлиять на экономику и социальную жизнь общества.

Очень важной особенностью нанотехнологии является то, что размер изучаемых в ней объектов практически совпадает с размерами многих микроорганизмов и (что представляется особо ценным) биологических клеток организма человека, что сразу открывает широчайшие перспективы применения наноматериалов в медицине. Например, нанотехнологии позволяют создать «бомбу» в виде ультрадисперсной частицы (начиненной требуемым препаратом), которая внедряется в намеченные клетки организма и «взрывается» там, выделяя препарат в клетку или систему кровообращения. Уже сейчас слияние нанотехнологий и биотехнологий позволяет проектировать множество удивительных устройств медицинского назначения (например, есть проект создания устройств, в которых электричество будет вырабатываться не из имплантируемых в организм батарей, а непосредственно на месте, за счет разложения содержащейся в крови глюкозы).

Другой принципиальной особенностью нанотехнологии (создающей одновременно и новые возможности и новые трудности) выступает ее междисциплинарность, так как нанонаука почти во всех своих проявлениях выступает в качестве объединяющего начала исследований в считавшихся разными науках (химия, биология, материаловедение, физика, вычислительная техника и т. д.). Одной из острейших проблем развития самой нанотехнологии выступает тот очевидный факт, что в каждой из этих наук плодотворно трудятся очень талантливые и независимые люди, владеющие приемами и терминологией собственных отраслей знаний и не желающие менять их. Все знают старую притчу о слепцах, которые пытаются описывать слона, ощупывая разные части его тела (хобот, ноги, хвост), и эта ситуация очень напоминает нынешнее состояние дел в нанотехнологиях. Научная и даже, отчасти, лингвистическая проблема заключается в том, что специалисты из самых разных областей знаний (химики, физики, биологи, материаловеды и т. д.), привыкшие десятилетиями работать на атомно-молекулярном уровне и взаимодействовать с коллегами в рамках своих дисциплин, вдруг оказались вынужденными общаться друг с другом при решении конкретных и совместных задач. Все знают, что многие распространенные термины часто означают разные понятия в разных науках, так как во всех дисциплинах давно установились своя стро-

гая систематика, система парадигм и авторитетов (и даже особый жаргон!), поэтому многие специалисты считают, что для развития нанотехнологии принципиальной сложностью может оказаться проблема общения и выработки общей терминологии. Острота проблемы связана и с тем, что речь идет не только о науках, но и о связанных с ними целых отраслях производства и бизнеса. В качестве редактора и составителя данной книги, я хочу сразу заявить, что ее основная цель сводится именно к организации взаимодействия и сотрудничества исследователей и промышленников, вследствие чего она и составлена из статей и обзоров высокопрофессиональных специалистов и ученых, имеющих богатый опыт общения.

Будущее нанотехнологии обеспечивается талантом и энергией множества людей, уже работающих в этой области и заложивших основы как самой новой науки, так и ее частных приложений. Можно с уверенностью констатировать, что возможности нанотехнологий значительно превосходят все, что привычно вкладывалось в понятие биотехнологий или информационных технологий. Практически проблема состоит в том, что промышленность еще не готова к пониманию и «перевариванию» новых возможностей и открытий, что можно объяснить как недопониманием их смысла, так и неспособностью коммерческого рынка приспособиться к стремительному темпу технического прогресса. Строго говоря, скорость внедрения любых научных открытий определяется некоторым, очень трудным и сложным средним этапом между самим открытием и созданием определенного прототипа возможного его применения на практике (физик придумал бы для этого некие «коэффициенты трения» между наукой, производством и рынком потребления). Для появления на рынке в качестве полноценного коммерческого продукта каждое научное открытие должно пройти сложные этапы (объединение с уже существующими товарами, общая оценка возможностей, обсуждение проблем контроля и т. д.), после чего реальный рынок реагирует на появление нового товара и «голосует» за него (долларовыми вложениями). Предлагаемая книга создавалась с целью ознакомления возможно большего числа интересующихся нанотехнологиями читателей с реальными перспективами и возможностями этой новой области деятельности.

В связи с этим книга разбита по темам на четыре раздела, объединенных общим замыслом. В первом разделе рассмотрены общие вопросы истории и инновационной политики в области технологий. Глава 1 посвящена самым общим урокам, которые следовало бы извлечь (как самим исследователям, так и инвесторам) из недавней истории развития биотехнологии, также ставшей вехой в развитии науки и связанной с ней промышленности. В главе 2 обсуждаются очень важные для современного мира возможности использования нанотехнологий в энергетике, причем авторы уделяют много внимания тем проблемам, которые неизбежно должны возникнуть после внедрения новых методов. В третьей главе рассмотрены вопросы промышленного применения новых технологий.

Раздел II является, по-видимому, центральным в книге, поскольку посвящен непосредственно тому кругу талантливых людей (ученым и организаторам), чьей волей и знанием осуществляется прогресс в рассматриваемой области. В главах 4 и 5 с экономической точки зрения теоретически рассматриваются абстрактные фигуры и формы деятельности «венчурных капиталистов», то есть предпринимателей, которые учитывают связь технологий и производимых товаров в долгосрочной исторической перспективе и осуществляют вполне реальные капиталовложения в нанотехнологические производства. В главе 6 анализируется роль и текущая деятельность правительства США в качестве координатора эффективного развития новой отрасли науки и промышленности, а главы 7 и 8 посвящены специфической проблеме академических исследований (научно-исследовательских работ в рамках высших научных заведений) и возможностям их последующей коммерциализации, то есть внедрения в реальное производство. Глава 9 показывает, какие проблемы ставит развитие нанотехнологий перед юристами, связанными с патентным и коммерческим правом США. В главе 10 объясняется, почему именно частное предпринимательство должно играть ключевую роль в

развитии новых областей и брать на себя риск организации первичных производств, а в главе 11 обсуждаются сложности, которые ожидают крупные корпорации и организации, желающие связаться с новыми технологиями и продуктами. Последняя глава второго раздела содержит краткий очерк деятельности национальных лабораторий США в области нанотехнологий и коммерциализации получаемых ими результатов.

Третий раздел посвящен некоторым конкретным инновационным направлениям в развитии нанотехнологий: материалам (глава 13), наноразмерным датчикам (глава 14), микроэлектронике (глава 15) и так называемой «адресной доставке» лекарственных препаратов в организме (глава 16). В завершающей раздел главе 17 обсуждается теоретическая проблема слияния нанотехнологий с уже существующими биотехнологиями, что в перспективе может означать невиданный расцвет медицины и здравоохранения.

В четвертом разделе рассмотрены самые общие вопросы нанотехнологии, которые уже сейчас волнуют многих исследователей. Речь идет о том, что на наноуровне исследований все известные нам научные дисциплины как-то «сливаются» в единое целое, что не только является новым научным подходом, но и обещает в будущем формирование новой науки, что означало бы революционный прорыв в познании природы (глава 18). С этим связано и беспокойство некоторых ученых относительно этических проблем, которые неизбежно будут возникать по мере развития нанотехнологий (глава 19). Книгу завершает очень интересный эпилог (глава 20), где приведен текст ранее не публиковавшейся беседы на эту тему с легендарным физиком Ричардом Фейнманом, который справедливо считается «пророком» нанотехнологий.

Практические исследования на уровне отдельных атомов и молекул должны привести к серьезным изменениям в жизни человечества, и уже сейчас можно предсказать, что описываемые в книге исследования изменят мир и общество значительно сильнее, чем компьютеры и биотехнологии.

В заключение я хотел бы выразить глубокую благодарность многим людям и организациям, помогавшим мне не только в создании данной книги, но и на протяжении всей моей профессиональной деятельности. Особую благодарность я выражаю своей жене Мириам.

Линн Э. Фостер

Лос-Анжелес, июнь 2005

Сведения о редакторе и составителе сборника

Линн Э. Фостер входит в число руководителей отдела развития новейших технологий одной из крупнейших в США юридических фирм (Greenberg Traurig LLP), специализирующихся в области внедрения и передачи новых технологий, лицензирования и патентного права, а также организации сотрудничества и инвестиций в технические проекты.

До перехода на работу в фирму Greenberg Traurig, Линн Э. Фостер приобрел огромный опыт в области внедрения технологических разработок, участвуя в реализации множества частных и государственных технических проектов, руководя исследованиями в сфере программного обеспечения в аэрокосмической промышленности, а также внедрении и коммерциализации научных достижений при «запуске» многих инновационных фирм. Он является членом консультативных советов многих авторитетных организаций, связанных с инновационной политикой правительства США (Институт нанонауки и технологии, Международный консорциум инженерных разработок, Форум внедрения знаменитого института Калтех и т. д.). Линн Э. Фостер провел когда-то первую конференцию по коммерческому применению нанотехнологий (Nanotechnology Trade Study), а затем был организатором восьми конференций и коммерческих совещаний на самом высоком уровне по проблемам нанотехнологий. Более 20 лет он был на службе и в резерве армии США, участник первой войны в Персидском заливе и военных операций в Боснии. Имеет ученые степени в области науки и административного управления.

Раздел I

Руководство и организация

Глава 1

Уроки инновационной политики и коммерциализации, связанные с биотехнологической революцией

Джеральд Голлвас

Джеральд Голлвас имеет богатый опыт по внедрению биомедицинских технологий еще с середины 60-х годов, когда он занялся бизнесом, связанным с созданием и поставкой диагностического оборудования в известной фирме Beckman Instruments. Возглавляемая им группа успешно внедрила новую аппаратуру, основанную на кинетических измерениях скоростей химических реакций первого порядка, используемую при клинической диагностике крови. Многие годы он занимался испытаниями и поставками медицинского оборудования в США, Европе и Японии и руководил многими очень важными проектами развития и внедрения новой техники. Является специалистом международного класса по вопросам планирования, организации, маркетинга и управления. Имеет степень бакалавра по химии, полученную в университете Сан-Диего.

«Мы создаем и формируем инструменты, а позднее они начинают формировать нас самих».
Маршалл Мак-Люэн

Вообще говоря, современное общество создано успехами химии, которую можно рассматривать в качестве наиболее общей науки о веществах и материалах, из которых построены почти все используемые нами объекты, от орудий труда до принимаемых лекарств. Процесс формирования и использования новых объектов продолжается: кремниевые и германиевые чипы составляют основу электроники, водород и кислород являются главными компонентами ракетного топлива, а рекомбинантная ДНК служит для создания новых лекарственных препаратов или растений, устойчивых к воздействию пестицидов. Интересно, что роль химии в истории для многих остается до сих пор не до конца понятной, не оцененной и неясной, в результате люди чаще склонны обращать внимание скорее на недостатки химии (например, ее вред для окружающей среды), чем на то, что именно она создает множество привычных условий существования. Древнекитайская поговорка гласит, что «только дураки могут заниматься предсказанием будущего», но предлагаемая читателю книга целиком посвящена размышлениям о грядущем развитии науки, и мы вправе спросить себя хотя бы о том, какие уроки мы, собственно, извлекли из анализа бурного развития химии в предыдущее столетие? При серьезном рассмотрении выясняется, что никакого общего вывода из развития химии пока не существует, так что в качестве примера мощного развития одной из областей науки (особенно с точки зрения инноваций и коммерциализации) удобнее рассмотреть историю биотехнологии, протекавшую на наших глазах в новейшее время.

1.1. История биотехнологии

Разумеется, начало истории биотехнологии может быть отнесено к глубокой древности, однако истинным моментом зарождения современной биотехнологии можно вполне обоснованно считать открытие в 1953 году Джимом Уотсоном и Френсисом Криком структуры ДНК. Их работа придала молекулярной биологии совершенно новое научное и общественное значение¹, а предложенная модель двойной спирали была не только одновременно простой, элегантной и эффективной, но и позволила вполне разумным образом объяснить процесс воссоздания и репликации жизни на молекулярном уровне.

Открытие структуры ДНК привело к множеству новых исследований и открытий, наиболее важным из которых стала разработка техники «вырезания и склеивания». Эта работа, выполненная группой Пола Берга из Стэнфордского университета, позволила получить рекомбинантную ДНК, состоящую из кусочков от двух разных молекул ДНК². Придуманная ими методика напоминает процесс монтажа в студии звукозаписи, когда оператор получает новую запись, просто вырезая и «склеивая» друг с другом куски разных магнитофонных лент. Вставив затем такую ленту в магнитофон, вы услышите единую запись, составленную из обрывков исходных мелодий.

За эту блестящую работу Пол Берг в 1980 году удостоился Нобелевской премии по химии. Интуиция с самого начала подсказывала ему, что рекомбинантные ДНК могут найти практическое применение в генной терапии. За несколько лет до этого, в 1973 году двое американских ученых (Герберт Бойер из Калифорнийского университета в Сан-Франциско и Стэнли Коэн из Стэнфордского университета) стали первыми на свете генными инженерами, так как именно им удалось не только использовать рестрикционные ферменты для избирательного «разрезания» и «соединения» кусочков ДНК, но и сделать этот процесс «промышленным». Вводя полученную таким образом составную или смешанную ДНК в организм бактерии, они смогли осуществить процесс размножения бактерий и получить миллионы «копий» своей искусственной ДНК. Это можно считать созданием первой «фабрики» по генетическому производству ДНК³.

Новость быстро облетела научный мир, после чего множество ученых по всему миру занялись интенсивными исследованиями в области генной инженерии. Вскоре после этого генными манипуляциями всерьез заинтересовалась общественность, средства массовой информации и даже Конгресс США. Разумеется, публику напугали разговоры о возможности создания «смешанных» существ, и она настойчиво пыталась понять – не занимаются ли ученые конструированием современного Франкенштейна? Поэтому общее внимание было обращено на создание эффективной системы контроля над разработками и попытками их практического применения. Беспокойство общественности было столь велико, что в 1975 году более 100 представителей заинтересованных организаций из разных стран мира собрались в городке Алисомар (Калифорния) на конференцию, посвященную перспективам и потенциальным опасностям исследований в области рекомбинантных ДНК⁴. Конференция прошла под руководством самого Пола Берга и утвердила набор рекомендаций для Национального института здоровья США (National Institute of Health, NIH). Позднее именно эти

¹ J. D. Watson and F. H. C. Crick, *Nature* 171 (April 25, 1953): 737.

² D. A. Jackson, R. H. Symons, and P. Berg, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 69 (1972): 2904–2909.

³ Stanley N. Cohen, Annie C. Y. Chang, Herbert W. Boyer, and Robert B. Helling, «Construction of Biologically Functional Bacterial Plasmids *In Vitro*», *Proceedings of the National Academy of Sciences* (1973).

⁴ P. Berg et al., «Potential Biohazards of Recombinant DNA Molecules», letter, *Science* 185 (1974): 303.

рекомендации стали основой национальной политики США в этом научном направлении, отраженной в официальных документах 1976 года⁵.

Научный успех Бойера и Коэна, сумевших внедрить определенный ген в бактерию и «размножить» его, с самого начала привлек внимание так называемых венчурных капиталистов, то есть предпринимателей, любящих вкладывать капитал с риском или в разработку и производство совершенно новых продуктов. Один из них, молодой и энергичный Роберт Свансон из Сан-Франциско, еще в 1976 году запросил Бойера и Коэна о возможности применения их технологии для организации коммерческого производства белковых продуктов, содержащих требуемые компоненты (в частности, Свансона интересовала возможность выпуска пищевых продуктов, содержащих инсулин человека)⁶. Уже в апреле этого же года Свансон и Бойер вложили по 500 долларов в организацию фирмы Genentech, ставшей первой в мире биотехнологической компанией. Почти немедленно в этой области возникла и торговая конкуренция, так как очень скоро была зарегистрирована и компания Biogen. Образно говоря, возник совершенно новый сектор наукоемкой продукции, а его первой целью стало производство коммерческих продуктов, содержащих инсулин человека.

Фирмы Genentech и Biogen выбрали различные технические средства для получения таких продуктов. Ученые Genentech бросили все свои силы на химический синтез человеческого гена, связанного с выработкой инсулина, в то время как Biogen стал развивать технику клонирования, причем выбор путей развития был обусловлен уже сложившимися обстоятельствами и условиями. Например, интерес Genentech к химически синтезируемому гену объяснялся тем, что последний не подпадал под ограничения, уже введенные Национальным институтом здоровья США, в то время как клонирование могло производиться только под контролем NIH.

Интересно и поучительно, что в начальный период развития фирма Genentech фактически представляла собой лишь зарегистрированное название, так как не имела ни денег, ни сотрудников, ни оборудования. Бойер обратился к двум своим коллегам в Национальном медицинском центре (City of Hope) с предложением заключить контракт на разработку методов синтеза инсулина человека. Речь шла об Артуре Риггзе и Кэйити Итакуре, которые в этот момент подали заявку в Национальный институт здоровья, пытаясь получить грант на изучение возможностей синтеза человеческого гормона соматостатина (эта задача выглядела более скромной, чем синтез инсулина, но ее решение открывало перспективы дальнейших разработок). Поэтому естественной кажется реакция Риггза, запросившего Бойера о возможности спонсорства фирмой Genentech сначала разработок по синтезу соматостатина. Получив положительный ответ, он образовал смешанную исследовательскую группу из сотрудников City of Hope и Genentech, которая сумела быстро добиться значительного успеха. Риггзу и Итакуре удалось внедрить кусочек ДНК человека (содержащий 21 нуклеотид) в бактерию кишечной палочки E. Coli, а затем (вместе с молодым химиком Хербом Хейнекером из лаборатории Бойера) и впервые продемонстрировать возможность функционирования искусственной ДНК в живой клетке.

Через шестнадцать месяцев команда исследователей не только успешно синтезировала ген соматостатина человека и клонировала его, но и смогла продемонстрировать возможность, как говорят биохимики, экспрессии протеинового гормона соматостатина в микробы⁷, что стало первым примером успешной экспрессии белка в генетически модифицированные микробы вообще. Это достижение только подхлестнуло научную «гонку» в синтезе инсулина человека. Ценность метода Риггза – Итакура заключается в его универсально-

⁵ *Federal Register* 41, no. 131 (1976), 27911-27943.

⁶ S. S. Hughes, *Isis* 92 (2001): 541-575.

⁷ K. Itakura et al., *Science* 198 (1977): 1056-1063.

сти, позволяющей использовать его для производства множества требуемых белков в бактериях-носителях. Очень быстро на его основе были разработаны разнообразные технологии, на которые было выдано много патентов (как в США, так и в других странах), а конечным результатом стало возникновение коммерческого производства фармацевтических продуктов, объем которого оценивается в миллиарды долларов. Забавно и очень поучительно, что упоминавшееся выше обращение Ригтза и Итакуры к Национальному институту здоровья (с просьбой о гранте на разработку соматостатина) было отвергнуто институтом, специалисты которого посчитали проект слишком амбициозным и не имеющим практической ценности!

После успеха с синтезом соматостатина Свансон начал энергично подыскивать инвесторов для финансирования работ по синтезу инсулина. В июне 1978 года фирма Genentech наняла сотрудников и создала лабораторию вблизи аэропорта Сан-Франциско, а уже к концу августа (менее чем через три месяца!) объединенная команда City of Hope и Genentech получила инсулин человека, используя синтезированный ген. Казавшееся невозможным начинание увенчалось блестящим успехом. Замечательная история создания фирмы Genentech и возникновения целой отрасли промышленности на основе биотехнологии описана в книгах Холла и Эванса^{8 9}. Особенную ценность этим событиям придает то, что речь идет об очень редкой ситуации, когда результаты фундаментальных, академических исследований смогли очень быстро привести к блестящему коммерческому успеху, тем более что речь шла о создании промышленности буквально из «ничего», а не о «раскрутке» производства на базе уже существующего мощного рынка фармакологических препаратов.

В наши дни, через тридцать лет после возникновения, биотехнология представляет собой огромный сектор промышленности и коммерции (оцениваемый примерно в триллион долларов), производящий сотни видов разнообразных биологических, медицинских и лекарственных средств¹⁰, и поэтому предложенные истории могут служить поучительными примерами при обсуждении проблем нанотехнологий. Речь идет в первую очередь о двух описанных ниже важнейших концепциях развития науки и технологии, связанных с инновационной политикой и коммерциализацией научных достижений вообще.

1.2. Концепция 1. Уроки S-образной кривой

Первая концепция связана с так называемой S-образной (сигмоидальной) кривой, предложенной в книге Ричарда Фостера¹¹ в качестве типичной Фихарактерной для множества процессов развития в науке и технике. Кривая описывает зависимость между вложениями ресурсов в технологию или процесс и соответствующей этим вложениям «отдачей» (то есть повышением продуктивности, качества и т. п.). Исследования в истории разнообразных технических устройств и их характеристик привели Фостера к выводу, что такие зависимости (напоминающие на графике латинскую букву S, как показано на рис. 1.1) являются весьма распространенными и типичными. Практический смысл S-образной кривой очень прост. В любой области усилия на разработку, затраты времени и просто капиталовложения приносят на начальном этапе развития или исследования (когда уровень фундаментальных знаний о процессе или объекте невелик) лишь небольшую пользу. Затем, по мере роста знаний и накопления опыта, эти вложения или усилия становятся все более эффективными, вследствие чего скорость развития значительно увеличивается. После некоторой критической точки развития общий процесс роста замедляется, а затем и почти прекращается, что

⁸ S. S. Hall, *Invisible Frontiers: The Race to Synthesize a Human Gene* (Oxford: Oxford University Press, 2002)

⁹ H. Evans, *They Made America* (New York: Little, Brown, 2004).

¹⁰ J. D. Watson, *DNA, The Secret of Life* (New York: Alfred A. Knopf, 2004).

¹¹ R. Foster, *Innovation: The Attacker's Advantage* (New York: Summit Books, 1986).

свидетельствует о достигнутой «зрелости» технологии или изделия. В дальнейшем рост прекращается вообще.



Рис. 1.1. Типичный вид так называемой S-образной (сигмоидной) кривой развития

В качестве очень характерного примера можно привести показанную на рис. 1.2 кривую роста скорости (основной параметр) развития одномоторных винтовых самолетов практически за всю историю авиации, по данным работы¹². Самолет братьев Райт в первом полете (1903 год) достиг скорости около 35 миль/час. Через семь лет, в 1910 году Гордон Беннет победил на авиагонках в Белмонт-Парке (Нью-Йорк), разогнав машину до 60 миль/час. По мере накопления опыта и знаний скорость самолетов медленно возрастала: 139,66 миль/час (1914 год), 145,7 миль/час (1922) и т. д. В 1925 году лейтенант Джеймс Дулитл на самолете Curtiss R3C-2 достиг 232,57 миль/час. В 1939 году рекорд скорости составил 463,9 миль/час, но на графике уже явно заметно замедление темпов роста. Следующий рекорд скорости на одномоторном поршневом самолете был установлен на гонках в Рено (штат Невада) почти через тридцать лет и составил 520 миль/час. В 1989 году эта цифра возросла, но лишь на 9 миль/час! что наглядно свидетельствует о том, что все возможности повышения скорости одномоторных поршневых самолетов практически исчерпаны и никакого дальнейшего технологического прогресса в этой области ожидать нельзя. Продукт (в данном случае винтовые самолеты) достиг своего совершенства, и любые капиталовложения в развитие бессмысленны.

¹² M. W. Bowman, *The World's Fastest Aircraft* (Wellingborough, UK: Patrick Stephens Limited, 1990).

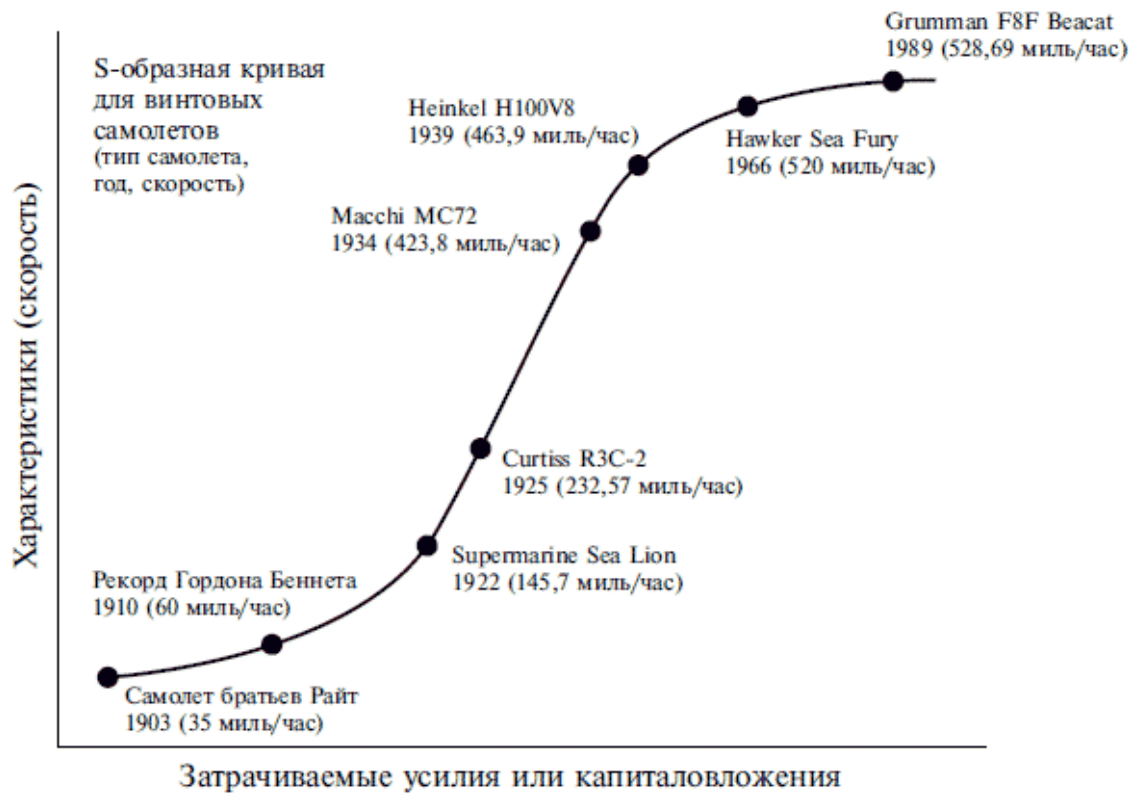


Рис. 1.2. Увеличение скорости одномоторных винтовых самолетов описывается характерной S-образной кривой

Появление и использование реактивных двигателей привело, естественно, к качественному скачку и последующему улучшению характеристик самолетов, что также описывается S-образной кривой. При сопоставлении этих кривых (рис. 1.3) отчетливо проявляется *разрывность* характеристик при переходе, то есть при принципиальном обновлении или смене технологий.

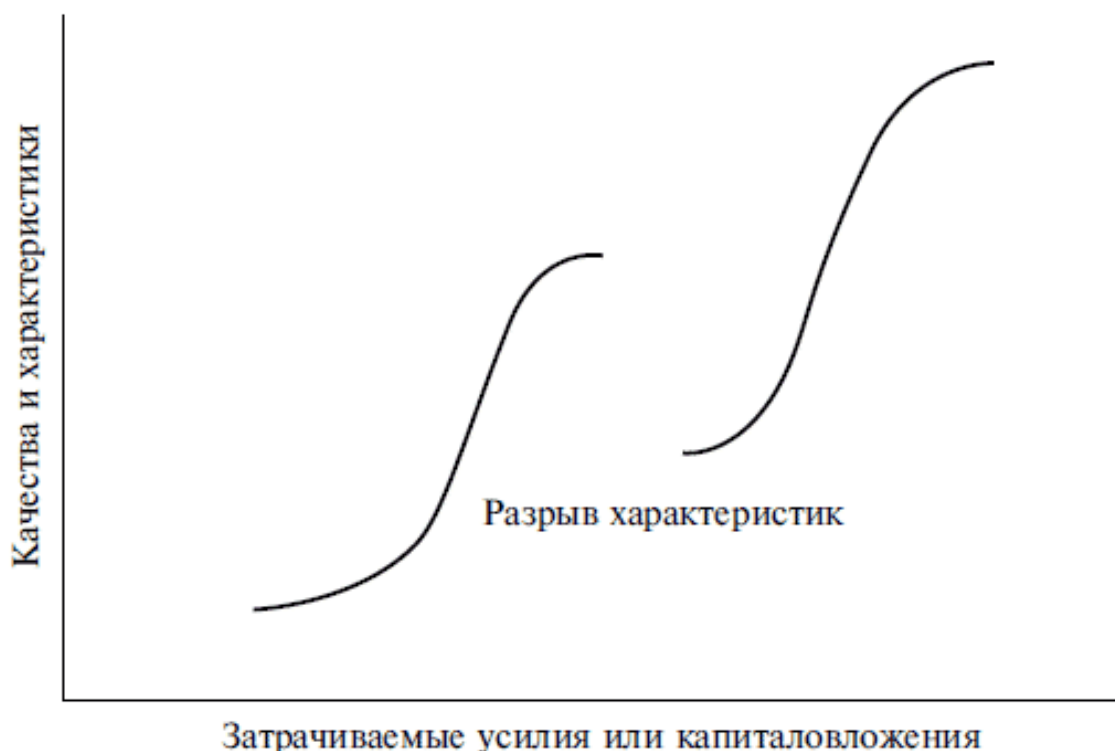


Рис. 1.3. Повторение S-образных кривых в истории техники

Приведенный пример роста скорости одномоторных винтовых самолетов демонстрирует одновременно две характерные особенности практически всех процессов, связанных с инновациями и коммерциализацией научных достижений. Речь идет о том, что параметры выходят на некоторые предел, а при смене технологий наблюдается разрыв в непрерывных кривых развития. Легко понять, что в начальный период развития любой технологии (нижняя часть S-образной кривой) инвестиции связаны со значительным риском и неопределенностью, но зато открывают в случае удачи большие перспективы роста и, соответственно, высокий уровень прибыльности. На среднем участке кривой возникает большая определенность ожиданий (иногда, кстати, создающая даже избыточное чувство уверенности), что приводит, конечно, и к уменьшению шансов значительного роста и быстрых успехов. Наибольший интерес представляет конечная часть кривой, соответствующая полному исчерпанию возможностей используемой технологии, но таящая в себе возможности перехода к новой S-образной кривой. На практике это означает конец развития технологии и подготовку к существенному рывку в техническом развитии. Следующий этап начинается с появления новых методов или устройств, что означает, например, переход от винтовых самолетов к реактивным, от электронных ламп – к транзисторам, от конных повозок – к автомобилям и т. д.

В описанной выше истории возникновения биотехнологии исходная S-образная кривая соответствовала существовавшей ранее коммерческой технологии производства животных белков для фармацевтической промышленности, в частности инсулина. Дело в том, что уже давно существовало развитое производство бычьего и свиного инсулина, экстрагируемого из туш животных и подвергаемого очистке. Коммерческий процесс был доведен до предела, поэтому и возник разрыв, приводящий к следующей S-образной ветви развития, основанной на принципиально новой технологии (введение синтезированного гена в бактерии и производство инсулина человека). Научное открытие непосредственно привело к развитию совершенно новой отрасли фармацевтической промышленности.

1.3. Концепция 2. Уроки коммерциализации технических новшеств

Вторая концепция, связанная с коммерциализацией технических достижений и инновационной политикой вообще, относится непосредственно к тем лицам, которые стремятся успешно внедрить новые методы и продукты. Говоря образно и одновременно просто, можно утверждать, что любая инновационная инициатива представляет собой сочетание креативности или способности к творчеству и способности к реализации замыслов. В действительности, конечно, успех предпринимателя в столь сложной ситуации требует гораздо большего. Например, успешный опыт развития биотехнологий показывает, что для успеха необходимо найти правильное сочетание нескольких факторов:

- Креативность, творческое начало
- Система управления, менеджмент
- Удачно подобранная команда
- Разумные капиталовложения
- «Попадание» в потребности рынка

Для осуществления удачного инновационного научно-технического проекта необходимо создать мощный и целенаправленный аппарат управления и междисциплинарную группу талантливых исследователей, которые при правильно спланированных капиталовложениях могут не только создать новый биотехнологический продукт, но и довести лабораторную разработку до коммерческого рынка и вернуть исходные затраты. Иными словами, коммерциализация инновационного продукта сложным образом зависит от сочетания многих факторов, то есть является, как говорят математики, сложной функцией, которая может быть выражена формальным произведением:

$$\text{Коммерциализация} = (\text{Творчество} \times \text{Менеджмент} \times \text{Команда}) (\text{Вложения}) (\text{Запрос})$$

Аналогией коммерциализации, как ни странно, может служить организация музыкального концерта, успех которого тоже определяется сложным сочетанием творческого начала (композитор), менеджмента (руководитель и дирижер) и команды (состав оркестра). Кроме этого, очевидно, для успешного проведения концерта необходимы указанные в формуле вложения (они определяются верой спонсора в эстетическую ценность исполнения) и запросы (предлагаемая программа должна быть привлекательной и интересной для конкретной аудитории). При соблюдении всех этих условий и требований концерт не только доставит удовольствие аудитории, но и окупит расходы на его организацию, что и можно будет назвать успешным осуществлением инновационного проекта (в данном случае в области музыки).

В приведенном выше примере, относящемся к производству инсулина человека, творческим элементом программы стал принципиально новый метод Бойера – Козна, вдохновивший Роберта Свансона на создание коммерческого производства синтетического инсулина. Эту задачу, конечно, нельзя было решить без создания высокопрофессиональной команды из специалистов City of Hope и Genentech. При этом Свансону удалось одновременно организовать «запуск» фирмы Genentech и найти достаточный инвестиционный капитал на стороне, то есть заинтересовать будущих потребителей (учесть потенциальный запрос рынка). Разумеется, ключевую роль сыграло то, что междисциплинарной исследовательской группе удалось, используя технологию Риггза – Итакуры, действительно получить полноценный и важный препарат, представляющий коммерческую ценность.

1.4. Общие выводы из анализа S-образных кривых развития любых технологий

• Начальный этап развития любой новой технологии представляет собой медленный инкубационный период «созревания», когда возникает множество важных проблем, требующих своего решения. Например, потребовалось около 22 лет, чтобы скорость самолетов достигла заметного значения 232 миль/час (аналогично потребовалось около 24 лет, чтобы предложенная в 1953 году Уотсоном и Криком структура ДНК воплотилась в реальную технологию производства белков в микробных носителях по методу Риггза–Итакуры). Период в 20 лет является характерным временем превращения новой научной идеи в «зрелую» технологию, что обычно и выражается S-образной кривой развития. Возможно, это просто обусловлено необходимостью разработки соответствующей инструментальной и технической базы. Отметим, что биотехнология еще находится на восходящем участке кривой, вследствие чего сейчас в лабораториях мира разрабатываются сотни новых препаратов и коммерческих продуктов.

• Каждая технология имеет собственные пределы роста. Поэтому рано или поздно описываемый процесс производства инсулина на основе биологических источников перестанет удовлетворять требованиям времени и окажется недостаточно эффективным.

• Следует помнить, что внедрение любой новой технологии всегда вызывает массу скептических замечаний с самых разных сторон (включая другие группы исследователей, средства массовой информации, Конгресс, правительственные учреждения и «сообщество» инвесторов). Разрыв между повторяющимися ветвями S-образной кривой развития всегда вызывает тревогу, означая разрыв с установившимся порядком, то есть потерю определенности и уверенности. С другой стороны, именно эта ситуация позволяет перейти к следующему витку развития и существенному повышению качества продуктов.

1.5. Общие выводы из анализа коммерческих инноваций в области биотехнологий

• Развитие инновационных технологий всегда требует творческого подхода и решительных действий. Конечно, ключевым моментом выступает само научное открытие или изобретение, однако его технологическая реализация и связанный с этим коммерческий успех могут быть обеспечены лишь эффективным менеджментом и сильной командой исследователей, зачастую из разных отраслей науки.

• Очень часто ценность новых технологий трудно оценить или обосновать. Выше уже упоминалось, что Национальный институт здоровья США отказался финансировать проект производства соматостатина по методу Риггза – Итакуры, посчитав его амбициозным и не имеющим практической ценности. Позднее выяснилось, что научные эксперты, средства массовой информации и правительственные организации ошибались.

• Для успеха в инновационных проектах необходимо обладать развитой фантазией и даже некоторой «мечтательностью». Именно такими качествами обладал Роберт Свансон, сумевший воодушевить целую группу других исследователей, что привело не только к значительному научному успеху, но и к созданию новой отрасли промышленности с многомиллиардным объемом производства.

• Нахождение источников финансирования затруднено на начальном участке S-образной кривой развития, когда инвесторы не уверены в потенциальной ценности исследований и будущих продуктов. Например, производство соматостатина вообще не вызывало энтузиазма у инвесторов до тех пор, пока научные достижения не продемонстрировали реальную

возможность коммерческого получения инсулина человека. На следующем этапе, разумеется, проблема инвестиций решается значительно легче.

1.6. Будущее нанотехнологии

*Только дурак может заниматься предсказаниями будущего
(древнекитайская поговорка)*

Предсказание будущего действительно является рискованным и неблагодарным занятием. Для предвидения возможностей развития в любой области человеческой деятельности недостаточно иметь только обширные знания и опыт, а необходимо еще обладать интуицией, позволяющей угадывать фантастические возможности, скрытые в парадигмах существующей науки и технологии. Речь действительно идет об угадывании, а не о расчете, прежде всего потому, что физические законы окружающего нас мира могут «изменяться» при переходе к другим условиям или другому окружению. Особенно заметны такие изменения в ситуациях, когда технология используется в иных масштабах (например, в атомномолекулярных). В мире нанометровых объектов и процессов зачастую совершенно теряют смысл привычные физические понятия типа массы, инерции и т. п., так что обычная механика (используемая, например, для создания и вождения автомобиля в нашем мире) становится бесполезной.

Представим, например, что мы опускаем соломинку в стакан с водой или коктейлем. В привычном нам макром мире уровень воды в соломинке совпадает с общим уровнем в стакане (или, строго говоря, близок к нему). Однако если вместо соломинки использовать капиллярную трубку, то уровень жидкости в ней будет значительно превышать общий, поскольку внутри очень тонких трубок начинают проявляться капиллярные свойства жидкости, связанные с молекулярными взаимодействиями. Говоря проще, изменение масштабов объекта или процесса приводит к резкому изменению правил физической «игры» и проявлению новых свойств, которые нельзя было предвидеть заранее. Именно это и происходит в науке и технологии, как только исследователи начинают работать в диапазоне наноразмеров.

Вообще говоря, для успешного исследования явлений природы от ученого требуется прежде всего здоровое понимание фундаментальных принципов науки и границ их применения. Ученый должен проверять применимость этих принципов на каждом этапе исследований, что, кстати, наглядно демонстрирует упоминавшаяся выше история с синтезом инсулина группой Бойера, Ригтза и Итакуры. Отказавшие в гранте специалисты Национального института здоровья вовсе не были недобросовестными или неквалифицированными экспертами, но им просто не хватило опыта и «фантазии», чтобы представить себе процессы, основанные на совершенно новых принципах. Таким опытом и интуицией обладал Бойер, которому удалось убедить в своей правоте (попросту говоря, «продать» идею) Свансона, взявшего на себя практическую организацию новой технологии. Ему удалось найти финансирование для исследований по синтезу соматостатина, что и привело в дальнейшем к успеху в производстве инсулина.

Приведенные выше примеры и концепции из истории биотехнологий, конечно, весьма упрощают картину развития, которая в действительности выглядит значительно более сложной, однако наличие S-образных кривых и разрывов на них является фундаментальным и общим явлением для развития любой научной или технической отрасли. Кстати, эта закономерность прекрасно подтверждается и на современном этапе перехода от привычных биотехнологий к нанотехнологиям. Например, существующие биотехнологии основаны на использовании природных ферментов, которые химики и биологи (благодаря своим знаниям и мастерству) научились «вырезать» и «вставлять» в нужные места на молекулах ДНК. Такие

генные манипуляции с естественными ферментами и являются основой технологии, превращающей бактерии в своеобразные фабрики или химические реакторы для производства требуемых препаратов и веществ. Однако сейчас становится ясным, что дальнейший прогресс в этой области будет связан с множеством новых явлений, наблюдаемых в нанометрической области. Для коммерциализации новых методик ученым необходимо получить более достоверные сведения об этих процессах и научиться уверенно управлять ими. Любое серьезное открытие в этой области имеет шанс найти свой «рынок», получить инвестиции и быстро развиваться в полноценное и высокоэффективное коммерческое производство.

В качестве интересного и поучительного примера можно привести следующий. Еще в 1905 году Вильям Кобленц из Национального бюро стандартов США (Вашингтон, округ Колумбия) сумел обнаружить и изучить связь между химической структурой молекул и их спектром поглощения в инфракрасном диапазоне излучений¹³. Это замечательное научное открытие долгое время оставалось лишь базой для красивых теоретических работ, и лишь в 1942 году на его основе был создан первый коммерческий образец инфракрасного спектрометра. В настоящее время такие приборы (позволяющие измерять поглощение света в виде функции от длины волны) используются практически в любой лаборатории, но их развитие сдерживалось отсутствием спроса. Острая потребность в таких спектрометрах возникла только в годы Второй мировой войны (в связи с развитием производства синтетического каучука), в результате чего почти немедленно было создано мощное коммерческое производство, удовлетворяющее постоянно растущую потребность рынка. Возможно, в случае нанотехнологий мы столкнемся не с бурным развитием, а с постепенным, эволюционным расширением рынков и производств.

Прогнозирование будущего – сложная и рискованная затея, но я предложу читателям простой мысленный эксперимент. Попробуйте представить себе историю развития и постепенного улучшения свойств волокон. Когда-то человечество пользовалось только натуральными волоконными материалами (пенька, шелк и хлопок). Улучшение характеристик описывалось одной S-образной кривой до тех пор, пока не появились синтетические волокна типа нейлона. Количество и качество таких волокон постоянно увеличивается, а общие тенденции их развития описываются другой, но тоже S-образной кривой. В настоящее время нанотехнология позволяет создавать совершенно новые материалы и волокна на их основе, так что я предлагаю читателю (опираясь на технический опыт, интуицию и фантазию) попробовать представить следующую S-образную ветвь развития, а также подумать о необычных применениях таких волокон, возможной технологии их производства и коммерческой ценности в различных областях.

Именно такие размышления можно назвать прогнозом развития нанотехнологий, и им посвящена данная книга.

¹³ W. Coblentz, *Investigations of Infrared Spectra* (Washington, DC: National Bureau of Standards, 1905).

Глава 2

Нанотехнология и глобальная энергетика

Ричард Смолли

Знаменитый ученый Ричард Э. Смолли, выпускник Принстонского университета, прославившийся своими работами в новейших областях химической физики, долгое время (1996–2002) возглавлял Центр нанонауки и технологии в университете Райса, а затем до своей смерти (октябрь 2005 года) был директором Лаборатории нанотехнологии углеродных материалов в этом университете. Он получил огромное число научных премий и наград, включая Нобелевскую премию 1996 года по химии. Наибольшую известность Р. Смолли принесло открытие молекулы C_{60} (более известной под названием бакминстерфуллерен или просто бакиболл и фуллерен), представляющей собой сферу типа футбольного мяча из 60 атомов углерода. Эта молекула и другие ее модификации стали еще одной формой существования углерода в природе (помимо алмаза и графита). Фуллерены не только стали объектом для множества интересных физико-химических исследований, но и позволили организовать производство самых разнообразных материалов нового типа, на основе чего уже возникла новая отрасль производства. Р. Смолли основал в феврале 2000 года весьма успешно развивающуюся инновационную компанию Carbon Nanotechnologies Inc.

В последнее время я все более утверждаюсь в мысли, что основной проблемой, стоящей перед мировым сообществом или даже человечеством вообще, станет то, что мне хочется назвать «тераваттным вызовом». Я хочу сказать, что изучение всех материалов, связанных с развитием энергетики, показывает, что в ближайшем будущем нам понадобятся тераватты энергии (напомню, что приставка *тера* означает триллион, то есть увеличение в 10^{12} раз). Население планеты в ближайшем будущем достигнет десяти миллиардов человек, и для обеспечения достойного существования и развития этого огромного количества людей мы должны существенно повысить объем используемой энергии.

Собственно говоря, энергетический вызов всегда стоял перед человечеством. Энергетика обеспечивает существование человечества, и нам нельзя забывать, что объемы запасов нефти и природного газа уже сейчас вызывают серьезное беспокойство специалистов. Жизнь должна продолжаться, и это диктует настоятельную необходимость поиска новых источников энергии для начинающегося столетия. Даже самые простые расчеты демонстрируют, что к середине XXI века уровень энергопотребления человечества возрастет по меньшей мере вдвое, так что мы должны срочно научиться производить большие количества энергии за счет новых процессов. Задача осложняется и тем, что источники энергии должны быть не только воспроизводимыми, но и экологически чистыми, то есть не связанными, например, с дальнейшим повышением уровня двуокиси углерода в атмосфере, что уже сейчас становится крайне опасным. Источники энергии должны быть также дешевыми, хотя бы для того чтобы человечество могло сохранить международный мир и процветание, а не погрязнуть в войнах за природные ресурсы.

Энергетика представляет собой сейчас наиболее крупный и основной сектор мировой экономической системы вообще, и годовые расходы на нее можно оценить примерно в 3 триллиона долларов. Следующим по размеру сектором выступает сельское хозяйство, на которое человечество затрачивает примерно в два раза меньше (несмотря на его важность и распространенность), а глобальные расходы всех стран (включая США) достигают при-

мерно 0,7 триллиона долларов в год. Человечество стоит перед настоящей проблемой нахождения новых источников энергии, которые должны заменить нефть, бывшую основой развития в прошлом столетии.

Мне приходится довольно часто выступать перед публикой, и я обычно прошу слушателей составлять списки проблем, которые они считают наиболее важными для развития человечества вообще. На основании многочисленных опросов разных аудиторий я составил приведенный ниже общий список, который возглавляет слово *энергия*, практически всегда упоминаемое в таких перечнях одним из первых. Вот как выглядит перечень важнейших мировых проблем на основе моих простых опросов:

1. Энергия
2. Водные ресурсы
3. Пища
4. Состояние окружающей среды
5. Бедность и нищета
6. Терроризм и войны
7. Болезни
8. Малограмотность
9. Демократия
10. Перенаселенность

Я придаю энергетической проблеме важнейшее значение еще и потому, что ее решение значительно облегчило бы нам борьбу с бедностью, нищетой, болезнями и другими трудностями. С другой стороны, я также убежден, что без новых источников энергии мы просто не сможем справиться с большинством из перечисленных выше проблем, и попробую доказать это следующими рассуждениями.

Например, недостаток водных ресурсов является серьезнейшей проблемой для многих регионов мира. Собственно говоря, на планете полным-полно воды, но она по большей части является соленой, а во многих случаях просто находится очень далеко от тех мест, где в ней ощущается острая потребность. Сейчас мы можем с уверенностью сказать, что эффективное опреснение морской воды технически вполне осуществимо, так как некоторые нанотехнологии обеспечивают практически 100 %-ную очистку (впрочем, воду всегда можно очистить от солей, просто вскипятив ее и осадив пары). Проблемы опреснения и водоснабжения упираются только в возможности энергетики, так как, имея достаточно энергии, мы могли бы спокойно перекачивать воду из одних районов (где она в избытке) в другие, тем самым гарантируя процветание целых регионов. Столь же очевидно, что решить проблему водных ресурсов без достаточного количества производимой энергии невозможно.

Следующей проблемой в списке обычно выступает обеспечение населения Земли питанием, что очевидно связано с сельским хозяйством и проблемой водоснабжения. Для повышения урожайности требуются удобрения, производство которых тоже зависит от энергетики, не говоря уже о пищевой промышленности, транспортировке продуктов и т. п. Во всех случаях решение большинства задач упирается в возможности производить и передавать энергию.

Столь же очевидно значение энергетики для экологии, так как состояние окружающей среды в огромной степени определяется способами производства, хранения, передачи и потребления энергии. Собственно говоря, именно создание экологически безопасных источников энергии является важнейшей задачей почти для всех природоохранных мероприятий и действий.

Производство дешевой, экологически чистой и доступной энергии и является сейчас основной проблемой человечества. Только новые источники энергии могут обеспечить про-

цветание человечества и дальнейший прогресс науки. Возвращаясь к списку, отмечу, что ни одна из других проблем не является столь объединяющей и важной, как энергетическая.

Таким образом, человечество просто вынуждено срочно искать новый источник энергии, который помимо всех указанных требований должен быть чрезвычайно мощным, поскольку речь идет о тераваттах энергии. Как ни странно, такой источник существует и его использование зависит только от нашего таланта и изобретательности. Я говорю о солнечной энергии, которая превращает в безлюдные пустыни обширные участки нашей планеты. Именно эту задачу я называют «тераваттовым вызовом» человечеству – для дальнейшего роста и развития оно должно в ближайшие десятилетия найти методы утилизации солнечной энергии.

О других источниках энергии не стоит даже говорить серьезно. Запасы полезных ископаемых (например, каменного угля) незначительны, а их добыча представляется малоэффективной. Чудовищное количество необходимой человечеству энергии (десятки тераватт!) может быть обеспечено только ядерной энергетикой. Источником энергии Солнца также являются ядерные и термоядерные реакции, так что в настоящий момент ее использование представляется единственным выходом из положения. Каждый день наша планета получает от Солнца 165 000 тераватт энергии, а для решения всех энергетических проблем необходимо лишь 20 тераватт. Природа создала огромный источник энергии, но человечество еще не научилось достаточно эффективно им пользоваться.

2.1. Транспортировка и хранение энергии

Я потратил много времени, пытаясь придумать какую-либо глобальную схему энергоснабжения планеты, разумную с точки зрения экономики и технологии. Основная идея заключается в том, что к 2050 году человечество должно прекратить совершенно бессмысленную транспортировку огромных масс топлива (угля, нефти и т. д.) по всей планете, а должно научиться передавать энергию именно в виде «энергии». Для этого нам следует прежде всего создать нечто вроде глобального «хранилища» энергии в виде сетки или «паутины» (из сотен миллионов соединенных друг с другом энергетических сайтов), позволяющей наиболее эффективным образом перераспределять потоки электрической энергии.

Рассмотрим, например, существующую сейчас систему электроснабжения всей Северной Америки, от Полярного круга до Панамского канала. К 2050 году эта система будет действительно включать в себя сотни миллионов узлов или сайтов, так что для создания реальной сети хранения энергии нам необходимо решить лишь технические вопросы, из которых существенными являются два. Во-первых, необходимо существенно снизить потери при передаче тока на большие расстояния, а во-вторых – мы должны как-то обеспечить само «хранение» электроэнергии в узлах.

Принципиально важными для функционирования и надежности такой энергетической сети являются именно вопросы хранения энергии в узлах, особенно если нам удастся создать устройства, вырабатывающие электричество на основе энергии солнечного света или ветра. Естественно, что хранение получаемой при этом энергии выгоднее организовывать вблизи центров потребления. В качестве заманчивой перспективы можно представить, что к 2050 году каждый дом, производственное помещение или организация будут снабжены собственным локальным устройством хранения электроэнергии, работающим круглые сутки. В идеале такие устройства должны быть небольшими по размеру и достаточно дешевыми, чтобы владельцы могли менять их на новые модели каждые несколько лет, поддерживая развитие такой сети и обновляя оборудование.

К сожалению, существующие устройства хранения электроэнергии еще очень далеки от предлагаемого идеала и являются очень громоздкими и дорогими (даже самые современ-

ные свинцовые аккумуляторы мощностью 1000 киловатт/час занимают несколько квадратных метров и стоят около 10 000 долларов). Однако в последние годы (во многом благодаря достижениям в нанотехнологиях) появилась реальная возможность существенного уменьшения размеров и стоимости батарей. Разработки продолжаются, и уже в близком будущем можно ожидать появления на рынке батарей такой же мощности, имеющих размеры небольшой стиральной машины стоимостью лишь около 1000 долларов. Массовое использование таких батарей будет иметь огромное значение для стабильности и надежности работы всей энергетической сети в целом, поскольку позволит снизить влияние местных флуктуаций, аварий и нарушений режима работы. Особую ценность такие устройства приобретут при внедрении новых источников энергии, связанных с использованием энергии ветра и Солнца.

Еще одно очень важное изобретение необходимо для того, чтобы мы могли передавать электроэнергию в огромных количествах (сотни гигаватт) на очень большие расстояния, например, от солнечных батарей в штате Нью-Мексико к потребителям в Новой Англии, что позволило бы производителям энергии на месте не беспокоиться об удаленности потребителей. Другими словами, необходимо создать достаточно обширную и связную энергетическую систему, объединяющую самых разных производителей энергии: экологически чистые угольные шахты в Вайоминге, ветряные установки в Северной Дакоте, газовые месторождения на Аляске, гидроэнергетические установки на севере Британской Колумбии, установки по выработке энергии из биомассы в Миссисипи, ядерные станции Хэнфорда, солнечные батареи на обширных пространствах западных пустынь и т. п. В такой сети удаленные производители и потребители энергии из самых разных областей континента могут свободно соединяться, несмотря на разделяющие их пространства. Пока такая единая электрическая система выглядит фантастикой, однако в последние годы возник проект создания нестандартной системы передачи электроэнергии, основанной на достижениях нанотехнологии. В узлах связи такой сети планируется использовать устройства из нанотрубок особого вида (так называемые α -нанотюбы, образующие квантовые соединения в виде «кресла»). Научные открытия во всех отраслях энергетики (производство, передача и хранение энергии) и инновационные проекты на их основе в сочетании со здоровой конкуренцией и свободным предпринимательством производителей позволят не только решить перечисленные выше проблемы, но и создать рынки новых товаров и услуг в глобальном масштабе.

Наиболее важной технической задачей остается, по моему мнению, проблема локального хранения получаемой энергии, причем обеспечение «локальности» имеет ключевое значение. Дело в том, что основным недостатком любых установок, использующих энергию солнца и ветра (а именно эти источники рассматриваются сейчас в качестве основы будущей энергетики) является естественная неравномерность режима их работы и связанные с этим большие колебания в объеме вырабатываемой энергии, что особенно заметно при эксплуатации ветряных установок. Для таких устройств проблема хранения вырабатываемой энергии зачастую является основной, что вновь приводит нас к научным проблемам, решением которых может и должна заниматься нанотехнология. Напомню, что практически все физико-химические процессы в устройствах, обеспечивающих аккумуляцию и хранение энергии (батарей, конденсаторов, топливные элементы, химические системы со связанным водородом и т. п.), происходят именно за счет наномасштабных процессов. Почти во всех случаях конечный процесс передачи заряда осуществляется группой из нескольких атомов на какой-либо поверхности. Поэтому, почти наверняка следующее поколение устройств хранения энергии будет создано на основе нанотехнологической модификации поверхностей, наноразмерных частиц катализаторов и т. д. Именно в энергетике (и особенно в решении проблем хранения энергии) нанотехнологии могут проявить свою исключительную эффективность.

2.2. Энергия для всех

Еще раз подчеркну, что я считаю проблему энергии наиболее важной для дальнейшего развития человечества. Все остальные задачи могут быть решены лишь при наличии достаточно мощных и доступных источников энергии. Проблема состоит в том, чтобы обеспечить население планеты (10 миллиардов человек в ближайшие десятилетия!) экологически чистыми, дешевыми и возобновляемыми источниками энергии. Я уверен, что эта задача может быть решена теми направлениями современной науки, где ученые уже умеют управлять веществом и процессами на атомарном уровне. Именно эти направления и объединяет нанотехнология.

Глава 3

Причудливые, странные и туманные перспективы нанотехнологии. Корабль в Саргассовом море с опасными капризами моды и агрессивными требованиями рекламы

Питер Коффи

Питер Коффи является одним из редакторов очень популярного в деловых кругах США журнала eWEEK (издание концерна Ziff Davis Media), посвященного проблемам предпринимательства и инновационной политики. Более 20 лет является одним из ведущих экспертов в области научно-технического развития вообще, выступая в качестве аналитика и консультанта и составляя обзоры по состоянию рынка и качеству новейших технических товаров в радиоэлектронике и информационных технологиях. Он также ведет известную среди специалистов редакторскую колонку «Epicenters», часто выступает по общенациональным каналам телевидения (CBS, NBC, CNN, Fox и PBS) по различным проблемам теории и практики новейших информационных технологий, организует конференции и семинары, а также выпускает книги и брошюры.

До перехода в журнал eWEEK (предыдущее название PC WEEK) П. Коффи занимал руководящие посты в фирмах Exxon и Aerospace Corporation, участвовал во многих правительственных и частных проектах, связанных с новыми технологиями (включая анализ жизненного цикла многих технологий типа x86, микропроцессоров RISC, Windows, OS/2 и т. п.), и преподавал во многих известных организациях и университетах. С его регулярными еженедельными заметками, озаглавленными Peter Coffee's Enterprise IT Advantages, читатель может ознакомиться на сайте www.eweek.com/petercoffee.

У читателей книги и широкой общественности почти наверняка возникает наивный вопрос – а не является ли нанотехнология просто очередной модой, причудой и забавой самих ученых? Не придумывают ли они сами все эти фантастические возможности или опасности? Каковы реальные перспективы ее развития? Начальный период развития уже позади, поэтому серьезные инвесторы и ответственные спонсоры научных исследований все чаще ищут ответы на эти вопросы, решая конкретные проблемы финансирования и планирования. Мне кажется, следует начать со спокойного перечисления тех возможных сценариев развития нового направления, которые могут привести нас к разочарованию и потерям. Ввиду того что речь пойдет не о самой науке нанотехнологии, а лишь о том, как общество воспринимает ее и реагирует на связанные с ней изменения, я позволю себе несколько раскованный и образный стиль изложения. Начну с перечисления возможных вариантов развития нанотехнологии.

- Нанотехнология может оказаться еще одним «холодным синтезом», то есть научной идеей, в далекой перспективе обещающей исключительно важный результат. Ценность идеи вначале безмерно преувеличивается, а позднее все это научное направление оказывается бесплодным и «умирает», оставляя лишь память об ожесточенных дискуссиях и загубленных научных авторитетах некоторых участников.

- Нанотехнология может развиваться и по сценарию открытия «синтетического топлива» и многих других проектов, представляющих собой вначале вполне разумное и пер-

спективное научное направление, которое позднее оказывается бесплодным (из-за экономических соображений, затянувшегося на многие годы решения побочных технических проблем или непрерывного усовершенствования и т. п.).

- Нанотехнология может представлять собой вариант проблемы «искусственного интеллекта», то есть абстрактного, но разумного научного понятия (или, точнее, наклейки, «лейбла»), которое при дальнейших исследованиях теряет собственный смысл и создает целый ряд отдельных научных направлений. Например, сейчас никто не занимается созданием «искусственного интеллекта» вообще, так как эта грандиозная научная проблема давно «распадалась» на множество конкретных задач, относящихся к вычислительной технике, компьютерам, исследованию операций, теории игр и многим другим научным дисциплинам.

Мне лично наиболее разумной в настоящее время представляется концепция развития, в соответствии с которой «корабль» под гордым флагом «Нанотехнология» действительно плывет к новым методикам преобразования энергии и вещества, хотя не исключена и возможность, что он будет бесконечно блуждать в Саргассовом море возможностей, незавершенных проектов и постоянных ожиданий.

3.1. Как не ошибиться в поисках успеха?

В этой главе мы рассмотрим некоторые весьма общие доводы и закономерности, относящиеся к развитию нанотехнологии. Существует выражение «порочный круг», описывающее ситуацию, когда каждый неправильный поступок или ошибка немедленно порождает такие же неправильные последствия. В жизни и науке этому хочется противопоставить «добродетельный круг» (тем более что по-английски эти прилагательные рифмуются: *vicious* и *virtuous circles*), когда каждое новое достижение или успех тут же создает возможность для дальнейшего успеха и прогресса. Возвращаясь к метафоре корабля, я бы сказал, что он плывет в море, полном опасностей, главные из которых можно назвать «капризами моды» и «агрессивной рекламы» в развитии самой наноуки.

Я воспользуюсь словом *fad*, которое имеет много значений и оттенков смысла (фантазии, увлечения, причуды, капризы моды и т. п.), сводящиеся, в сущности, к различным определениям, которыми люди стараются как-то приукрасить или оправдать свое неправильное поведение. Термину *нанотехнология* грозит опасность стать примерно таким же богатым на смыслы и неопределенным понятием, так как сейчас его используют в самых разнообразных проектах и разработках, от вполне реалистических до самых фантастических. В информатике и теории связи очень важным параметром является отношение сигнал/шум, позволяющее оценить долю ценной и действительно важной информации в потоке данных, но, к сожалению, мы не можем пока классифицировать по этому параметру огромное число данных и публикаций, относящихся к нанотехнологиям, особенно учитывая их специфические и иногда поразительные особенности.

Вообще говоря, отношение общества к новым технологиям постоянно меняется, по мере того как их достижения воплощаются в реальные изделия, товары и услуги. Поэтому, задумываясь о будущем, серьезные исследователи, стремящиеся привлечь интерес инвесторов к своим разработкам, стараются быть сдержанными и точными в оценке своих возможностей. В этой связи интересно отметить, что многие из них стали в последнее время избегать излишне общего термина *нанотехнология* и стараются просто точно определять свою «нишу» деятельности в рамках привычных дисциплин.

Ситуация с определениями в науке и технике достаточно сложна и требует некоторых пояснений. Дело в том, что приставка *нано* – и определение *нанотехнологический* превратились сейчас в какие-то своеобразные «наклейки», которые многие авторы и организации беззастенчиво используют лишь для демонстрации высокой технологичности предлагаемых

процессов или товаров. Кстати, такое поведение неоднократно повторялось в истории техники. Парадоксально, но длительное время могут существовать лишь научные «наклейки», относящиеся к очень трудным или неосуществимым замыслам (например, «вечный двигатель»), а реализация большинства технологий приводит к быстрому привыканию публики, которая затем быстро теряет интерес к новинке, после чего соответствующие термины просто исчезают из разговорной речи и рекламных объявлений. Можно вспомнить, что в 60-е годы производители новейшей радиоаппаратуры постоянно подчеркивали, что их продукция является полупроводниковой и транзисторной (в противовес старым «ламповым» приемникам и т. п.), а позднее перестали об этом упоминать вообще. Образно говоря, многие технические определения просто «выцветают», подобно обычным наклейкам на товарах.

Это явление легко заметить и в современной жизни. Старшее поколение пользователей еще использует сочетания *мобильный телефон*, *цифровая камера* и т. п., но подростки говорят просто *телефон* (в США подростки говорят просто *фон*) и *камера*, поскольку считают определения очевидными и привычными. Можно с уверенностью предсказать, что в период 2010–2020 гг. (когда ожидается широкое внедрение нанотехнологических товаров и услуг) приставка *нано*— начнет постепенно, но неизбежно исчезать из названий и рекламных плакатов.

Я хочу подчеркнуть, что нанотехнологии уже потеряли необычность и статус научной причуды, а представляют собой одну из основных тенденций развития науки и техники, своеобразный мейнстрим общественного прогресса вообще. Исследователи, инвесторы и фирмы уже оценили возможности новых технологий и все шире внедряют их в коммерческое производство (иногда с энтузиазмом, иногда – вынужденно). Нанотехнологии, которые можно назвать системой управления веществом на атомарномолекулярном уровне, уверенно занимают новые позиции в промышленности и общественной жизни.

Часто приходится читать и слышать, что нанотехнологии возникли на основе удивительных предсказаний и видений Ричарда Фейнмана и Эрика Дрекслера, которые затем нашли много практических применений. Реальная ситуация выглядит сложнее, так как, разумеется, нанотехнологии стали результатом общего развития научных концепций и методик второй половины прошлого века. Мне хочется напомнить читателю американский фильм «Старшекурсник» (1967 год), в котором преподаватель объясняет студенту, что обобщающим термином для всех веществ на свете является слово *полимеры*. В те годы происходило широкое внедрение полимерных товаров и изделий, вследствие чего многим людям казалось, что слова *полимеры* или *пластики* лучше всего характеризуют вещества вообще. Примерно такое же отношение наблюдается сейчас по отношению к нанотехнологиям, которые многие ученые и предприниматели стали считать самым общим символом нанотехнических возможностей.

Уже сейчас, незаметно для общественности, созданные на основе нанотехнологий отдельные детали и изделия широко используются в производстве многих бытовых товаров (например, плоские экраны телевизоров и компьютеров), а их роль и стоимость должны учитываться фирмами-производителями и экономистами. Со временем процесс внедрения новых технологий станет принимать все более широкие масштабы, существенно изменяя базовую стоимость многих распространенных товаров и услуг, а также саму структуру рынка и производства.

3.2. Агрессивная реклама

Капризы и увлечения модой могут отрицательно влиять на развитие нанотехнологий, но обратной стороной увлечений является уже возникшая агрессивная реклама возможностей новых технологий, постоянное обещание быстрых и невиданных успехов, включая

самые фантастические проекты (я обозначаю эту деятельность термином *hype*, которым в Америке называют беззастенчивую агитацию на выборах). Рекламная шумиха вокруг научных достижений возникала всегда, и обычно ее считают неизбежным побочным фактором технического прогресса, однако иногда она может стать серьезным препятствием на пути развития новых технологий (например, она может отвлекать внимание общественности и инвесторов от действительно интересных и важных идей и разработок).

Ответственный и серьезный исследователь всегда старается избегать участия в разработках, носящих рекламный или фантастический характер. Кроме того, настоящие ученые, хотя бы в общих чертах, хорошо знакомы с реальными возможностями существующих методик и поэтому не берутся за слишком общие и сложные задачи. Например, ответственный разработчик не будет даже пытаться быстро научить компьютер воспринимать обычную человеческую речь, так как прекрасно понимает, насколько сложна такая задача. Несмотря на огромные усилия и расходы, никому пока не удалось добиться ощутимых результатов в этом направлении, что, разумеется, несколько не смущает создателей фантастических фильмов, в которых ЭВМ уже десятилетиями беседуют с людьми. Этот пример можно считать показательным для финансирования исследований, так как не обладающий техническими знаниями инвестор может вкладывать значительные средства во внешне эффектный проект с броским названием и привлекательной для публики идеей, оставив без внимания действительно ценную и перспективную разработку.

Аналитики известной фирмы Gartner, специализирующиеся на исследовании информационных технологий, разработали даже общую модель реализации и развития таких проектов, названных ими просто «циклами преувеличенных ожиданий». Для начала такого цикла обычно необходимо сочетание нескольких ярких технических достижений, играющих роль психологических «триггеров», то есть спусковых механизмов, вызывающих серьезный интерес и даже ажиотаж инвесторов. В истории нанотехнологий можно указать набор таких факторов, важнейшим из которых, по-видимому, явилось издание в 1986 году получившей весьма широкую известность книги Э. Дрекслера «Машины творения».

Образно говоря, сейчас в области коммерциализации технологий вообще (включая прогнозирование развития рынка и вложения венчурных капиталов) сложилась очень сложная и напряженная обстановка, которую можно сравнить с «горючей смесью», готовой вспыхнуть от небольшой искры, то есть от незначительных технических усовершенствований, ничтожного изменения условий и т. д. Для рынка этот цикл, скорее всего, будет означать безудержную рекламу и «раскрутку» того, что физики и техники называют «новым великим изделием» (эту роль в свое время сыграли лампочка накаливания, транзистор, персональный компьютер и т. п.). Серьезная опасность для развития нанотехнологий вообще состоит в том, что неправильный выбор приоритетов может привести к глубокому и долгому разочарованию в новых технологиях.

Не стоит преувеличивать мудрость и проницательность венчурных капиталистов, которые вполне могут ошибиться, особенно в критический, начальный период развития малоизвестных технологий. Как ехидно отмечал Дэвид Истмен, один ведущих экспертов крупной консалтинговой фирмы Prospector Equity Capital: «...у инвесторов есть дурная привычка подражать друг другу, в результате чего они часто начинают наперебой вкладывать капиталы в некоторые модные отрасли промышленности. Мы видели это на примере производства дисководов, оптических сетей связи и запоминающих устройств. Если в этой ситуации вложения не приносят быстрой прибыли, многие из инвесторов после 3–4 неудачных попыток быстро разочаровываются в инвестиционном бизнесе и перестают им интересоваться. При этом из-за собственной нетерпеливости они часто попадают в смешное положение, покидая созданные фирмы незадолго до того, как организуемое производство начинает приносить реальную прибыль».

Такие неудачи надолго отбивают у многих инвесторов желание заниматься инвестиционными проектами, не говоря уже о том, что создают крайне тяжелую ситуацию для основателей и технического персонала фирм. Очень часто исходного капитала хватает на первый этап развития, при котором удается довести лабораторные результаты до технологического уровня, и именно в этот ответственный момент молодая фирма отчаянно нуждается в новых капиталовложениях (на оформление документации и патентов, закупку оборудования и т. п.). Эта ситуация является довольно стандартной, и многие энтузиасты нанотехнологий уже неоднократно попадали в нее за последние годы.

Спасти растущую фирму в таких условиях может лишь умелая техническая и финансовая политика, привлечение новых инвесторов, а также энергичные поиски новых практических применений разработанных материалов и изделий. Последнее условие является очень важным, так как современное состояние нанотехнологий вообще характеризуется именно нарастанием числа приложений. Инновационная деятельность в этой области связана больше с нахождением сфер приложения, а не с обычными «войнами» на рынках сбыта традиционных товаров. Успех в развитии нанотехнологий обусловлен сочетанием научного таланта с энергичной предпринимательской деятельностью, а не с выискиванием мелких экономических выгод (например, с распространением старых музыкальных хитов по Интернету).

Следующим, менее драматичным, но очень важным этапом развития новых технологий, по мнению экспертов фирмы Gartner, выступает «закат эпохи Просвещения», выводящий производителей и потребителей на «плато производства», при котором новые идеи начинают приносить реальную прибыль. На этом этапе развития неизбежно появляются предупреждения об исчерпанности возможностей новых технологий, их неизбежной гибели и т. п., подобно тому как в развитии кремниевой полупроводниковой технологии был период мрачных прогнозов (начало 1990-х годов), закончившийся широким внедрением в практику новых материалов (арсенида галлия и т. п.).

Впрочем, поскольку нанотехнологии имеют дело с веществом в его самых фундаментальных формах (атомы и молекулы), сейчас не имеет смысла даже фантазировать о том, что ожидает нас на следующем витке развития прогресса.

3.3. Факторы, затрудняющие прогнозирование

Вообще говоря, общую картину развития нанотехнологий даже на ближайшее время сейчас трудно прогнозировать, не в последнюю очередь из-за очевидных сложностей с определениями и терминологией. Например, многие фирмы спокойно относят свои производства к нанотехнологическим, аргументируя тем, что в процессе изготовления они давно оперируют размерами точностью в несколько нанометров. В качестве наглядных примеров можно указать производство осциллографов (которые должны обладать полосой пропускания около 10 ГГц, для точной регистрации сигнала шириной 1 ГГц) и полупроводниковых устройств, которые давно добились нанометрической точности в некоторых производствах, где уже изготавливают детали толщиной всего 20 нм. Эта величина составляет всего 1/1000 толщины человеческого волоса, но является уже вполне разумной для промышленного производства, доказательством чего может служить обещание фирмы Intel достигнуть ее к 2012 году¹⁴ во всех чипах для быстродействующих запоминающих устройств.

Некоторые специалисты настаивают на том, что к «настоящим» нанотехнологиям следует причислять не те, в которых обрабатываются нанометрические объекты, а лишь те, в которых на молекулярном уровне осуществляется реальный технологический контроль

¹⁴ <http://www.reed-electronics.com/eb-mag/article/CA475441?industryid=2116>.

над размерами изготавливаемых деталей. Рассмотрим, например, процесс создания углеродных нанотрубок, представляющих собой просто цилиндрические образования из пятиугольных колец диаметром около 1 нм. Должны ли мы формально причислять их к нанотехнологическим материалам, если процесс синтеза контролируется лишь в самых общих чертах? Строго говоря, мы можем утверждать, что умеем производить новый материал лишь тогда, когда научимся управлять молекулярным процессом синтеза нанотрубок и будем способны выращивать из них, например, монокристаллы со степенью точности, уже достигнутой в полупроводниковой технике. Представляется очевидным и справедливым, что реально говорить о создании новых технологий мы сможем лишь после того, как научимся не только применять, но и строго контролировать точность используемых процессов. Ради справедливости стоит отметить, что за последнее время в этом направлении достигнут замечательный прогресс, о котором раньше нельзя было и мечтать. Например, в ноябре 2004 года появились сообщения о возможности использования искусственных молекул ДНК для ориентации углеродных нанотрубок и создания на этой основе устройства типа транзистора¹⁵. Важным фактором современного этапа развития выступает эффект, который физики называют синергией, то есть взаимным усилением воздействия разнородных факторов или методик. Например, это может означать применение методов молекулярной инженерии не в биологии, а для совершенно новых целей и процессов.

Более того, некоторые фирмы-производители уже преодолели сложности научно-конструкторских разработок и готовы перейти к коммерческому производству новых материалов и продуктов. Например, известная южнокорейская фирма Samsung объявила о скором массовом выпуске изделий следующего поколения с использованием углеродных нанотрубок. В частности, фирма уже создала прототип нового типа плоского телевизионного экрана (известного под названием «дисплей с полевой эмиссией») и собирается в ближайшее время запустить его в производство¹⁶. В новом устройстве очень большая решетка высокоточных и компактных электронных излучателей будет обеспечивать свечение экрана с исключительно высокой точностью и яркостью, значительно превосходящей существующие аналоги плоских экранов. Кроме того, фирма обещает значительно снизить энергопотребление новых типов телевизоров.

Тем самым фирма Samsung бросает вызов своим конкурентам, которые должны либо быстро начать агрессивную политику инвестиций в развитие аналогичных технологий, либо заранее смириться с поражением. Читателю можно напомнить историю с положением дел в радиоэлектронике начала 1960-х годов, когда фирмы Sony и Panasonic первыми выпустили на рынок карманные транзисторные приемники, ставшие позднее символом технической революции в области полупроводников¹⁷. Интересно отметить, что фирма Sony вовсе не была пионером в производстве самих материалов, а начинала со сборки. Транзисторы для выпуска своих первых радиоприемников 1955 года Sony закупала на стороне, но позднее активно занялась материалами и устройствами, быстро создав технологию производства целого ряда очень популярных образцов бытовой радиоэлектроники. В настоящее время новые материалы и устройства столь же энергично разрабатывает специализированный исследовательский институт фирмы Samsung (Advanced Institute of Technology) в южном пригороде Сеула.

В этой связи следует особо отметить разнообразие свойств наноматериалов и связанную с этим возможность их применения для совершенно новых целей, которые зачастую даже не предполагались в исходных разработках. Например, многие из читателей навер-

¹⁵ http://www.technologyreview.com/articles/04/12/rnb_120304.asp?p=1.

¹⁶ <http://www.technologyreview.com/articles/04/11/mann1104.asp>.

¹⁷ http://eetimes.com/special/special_issues/rmillennium/companies/sony.html.

няка неоднократно читали о необычных электрических характеристиках углеродных нанотрубок, позволяющих создавать новые устройства и приборы. При этом редко отмечается, что углеродные нанотрубки одновременно обладают очень высоким коэффициентом теплопроводности, что делает их весьма перспективным материалом для решения совершенно иной задачи компьютерной техники, а именно – для создания так называемой «тепловой смазки» между микропроцессорами и теплоотводами¹⁸.

При этом производственные проблемы могут выглядеть по-разному для одних и тех же материалов, используемых с разной целью. Например, если технология обеспечивает высокий выход нанотрубок, но не позволяет гарантировать постоянство их длины, то фирме-производителю следует подумать о возможности выпуска упомянутой выше «тепловой смазки» или других теплоизолирующих составов, для свойств которых длина трубок незначительна. Углеродные нанотрубки являются очень наглядным примером, так как исследователи неожиданно для себя обнаружили для них множество интересных и необычных применений. Введение трубок в качестве наполнителя позволило улучшить свойства теннисных мячей, повысить механические свойства тканей, создать новые типы косметических и лекарственных препаратов и многое другое¹⁹. Для многих наноматериалов массового производства трудно указать конкретные применения, так как специалисты продолжают изучать их свойства и возможности. Например, неожиданно выяснилось, что нанотехнологическая обработка значительно улучшает некоторые характеристики тканей (повышает их стойкость к загрязнению, прочность и т. д.), в результате чего известная фирма рабочей одежды Dockers подвергает такой обработке более половины своей продукции.

Можно вспомнить и о том, что наноматериалы ценны и благодаря многим физическим характеристикам, которые прежде не изучались учеными просто в силу того, что были недоступны для исследователей. Подобно тому как лазерная техника (возникшая после создания когерентных источников монохроматического излучения) позволила начать изучение и использование множества ранее неизвестных процессов, так и нанотехнологии предлагают нам то, что можно образно назвать «когерентными объектами». Например, уже существует техника, позволяющая создавать так называемые наносферы или «наноснаряды», размеры которых «подгоняются» таким образом, что они могут преобразовывать в тепло световое излучение с заданной длиной волны. Такие наносферы представляют особый интерес для врачей-онкологов, которые вводят их в пораженные раком ткани организма и пытаются создать на этой основе новые методики разрушения раковых клеток (интересная статья на эту тему была опубликована в июньском номере журнала Cancer Letters за 2004 год). Предварительные исследования показали, что эти методы обладают значительными преимуществами по сравнению с используемыми в настоящее время²⁰.

Интересно, что новое применение находят даже казавшиеся фантастическими проекты создания так называемых инфинитезимальных (бесконечно малых, исключительно малых) механизмов или машин. Некоторые из таких устройств уже внедряются. Например, в 2004 году были созданы поразительно малые сопла для струйного принтера (диаметром около 35 нанометров), конструкция которых построена примерно всего из 75 000 атомов! Кстати, они могут служить примером разнообразия нанотехнологических устройств, так как разработчики действительно создавали их для использования в особо точных принтерах (их производство запланировано на 2008 год), однако позднее выяснилось, что такие инжекторы могут быть очень эффективны в медицинских имплантируемых устройствах для целевой доставки и введения медицинских препаратов внутри организма. Группа исследователей из Калифор-

¹⁸ http://news.corn.com/Can+nanotubes+keep+PCs+cool/2100-7337_3-5166111.html?tag=nl.

¹⁹ http://www.usatoday.com/tech/news/nano/2004-11-08-nano-on-the-move_x.htm.

²⁰ http://sciencentral.com/articles/view.php3?article_id=218392390.

нийского технологического института продемонстрировала возможности этой методики и пообещала начать выпуск устройств к 2015 году²¹.

3.4. Добродетельный круг

В заглавии этого раздела я пытался обозначить ситуацию, противоположную тому, что принято называть «порочным кругом» (когда одна неудача влечет за собой другую, одна ошибка – несколько других и т. д.). Правильно организованная технология подразумевает очень удачно подобранную комбинацию использования вещества, энергии, методов управления, производственных процессов и систему маркетинга производимых товаров. Отсутствие любой компоненты из перечисленного списка фактически не позволяет технологии реализоваться, даже если она прекрасно проявляет себя в лабораторных или модельных испытаниях. Мне кажется, что сейчас нанотехнологии удачно сочетают в себе все эти элементы, предлагая ученым и производственникам, собственно говоря, самые высокие достижения науки в различных областях.

Более того, сейчас складывается очень благоприятная для развития нанотехнологий обстановка, так как число их сторонников явно превышает число противников. Их наличие не представляет собой очевидной угрозы практически ни одной существующей отрасли промышленности, а скорее обещает многим производствам появление новых возможностей для создания следующих поколений материалов или изделий. Перспективы такого развития кажутся весьма обнадеживающими, так как нанотехнологии означают повышение производительности, беспрецедентные возможности, снижение стоимости и много других преимуществ.

Что может стать существенным препятствием для развития нанотехнологий? Мне кажется, основная опасность заключается в том, что люди, определяющие пути и методы использования новых технологий, не смогут разумно определить их возможности, воздействие и ограничения. Другими словами, новые технологии должны быть правильно восприняты и использованы обществом. Представьте себе, что кто-то пытается заменить обычную пуговицу или застежку-молнию на современную систему фирмы Velcro, но солдаты не желают ее видеть по каким-то психологическим причинам. Поэтому любое производство нанотехнологических продуктов или изделий должно начинаться с тщательного изучения уже существующей практики использования аналогичных изделий. Психологический аспект внедрения должен учитывать все эффекты неожиданных и непривычных свойств новых изделий, их способность соответствовать уже сложившимся условиям и требованиям.

В то же время, появляясь на рынке с новыми товарами и изделиями, производитель должен вести себя достаточно смело, то есть стараться не только угадать скрытые ожидания потребителей, но и предлагать им совершенно неожиданные возможности использования своих изделий. Очень часто покупатели вообще не понимают принципиальной разницы в изделиях и желают (или даже требуют!), чтобы производители продолжали оказывать им привычные услуги, потерявшие смысл после внедрения новых материалов. Можно вспомнить, что при внедрении полупроводниковой техники многие потребители требовали от фирм обеспечить систему визуальной проверки исправности транзисторов, ссылаясь на то, что перегоревшие электронные лампы было очень легко определить по замутнению поверхности стекла. Фирмы-производители в те годы потратили много времени и усилий, убеждая потребителей, что число дефектов при массовом производстве изделий твердотельной электроники настолько мало, что потребность в такой упрощенной проверке просто исчезает.

²¹ http://www.trnmag.com/Stories/2004/102004/Mechanical_valve_design_goes_nano_Brief_102004.html.

Я уверен, что с такими же нелепыми требованиями и запросами придется столкнуться и создателям наноматериалов и нанообъектов.

С другой стороны, захват каких-то секторов рынка может быть значительно облегчен, если предлагаемое инновационное устройство по каким-то параметрам действительно отвечает ожиданиям потребителей или сразу демонстрирует свое превосходство перед уже существующими прототипами. В области нанотехнологий удачным примером такого подхода может служить появление в мае 2004 года на коммерческом рынке нового типа компьютерных запоминающих и логических устройств с большим объемом памяти (на основе углеродных нанотрубок), которые неожиданно стала выпускать фирма Nantero Inc. в штате Массачусетс²².

Кроме того, конечно, остается и возможность неожиданного выпуска совершенно новых, непривычных для потребителя товаров и материалов. Например, фирма Zettacore Inc. (Инглвуд, штат Колорадо) стала выпускать запоминающие устройства, в которых используются органические молекулы (производные хлорофилла), способные к удерживанию электронов. Исследовательская группа университета в Бостоне сумела поразить всех специалистов, продемонстрировав в конце 2004 года аналог компьютерного устройства, в котором привычным для электронщиков состояниям 0 и 1 соответствуют изгибы (в ту или иную сторону) микроскопической балки длиной всего 8000 нанометров. Испытания показали, что такое устройство позволяет не только уверенно осуществлять вычислительные операции и запоминать данные, но и создать запоминающее устройство с объемом памяти 100 Гигабит/дюйм², работающее на частоте около 1 Гигагерца. Такое устройство значительно превосходит по характеристикам все полупроводниковые аналоги.

Выше я привел три примера, относящиеся к разным направлениям развития нанотехнологий (молекулярная инженерия, использование биологических молекул, новые физические эффекты в нанометрических масштабах), которые наглядно демонстрируют широкие возможности, открывающиеся перед учеными и разработчиками в новых технологиях. Давайте забудем о приставке *нано* – и попробуем еще раз понять, что означает для нас слово технология. В качестве общеизвестного примера мы можем взять, например, технологию производства стрелкового оружия, которая означает, формально говоря, лишь возможность концентрировать энергию в требуемых масштабах и ее дальнейшее использование в удобной форме при требуемых условиях. Источник энергии при этом должен оставаться стабильным и включаться только после срабатывания детонирующих устройств и т. п. Технология должна обеспечивать безопасность изделий во всех остальных ситуациях. Примерно то же можно сказать о нанотехнологиях – они должны обеспечивать концентрацию и использование энергии в требуемых целях, а разница сводится лишь к тому, что эта энергия имеет иные формы и виды (электронная, фотонная или даже механическая).

Продолжая аналогию, стоит вспомнить, что технологии стрелкового оружия непосредственно связаны с материаловедением. Простых материалов достаточно лишь для изготовления очень примитивных устройств (типа пушек), но сложные устройства требуют разработки и исследования свойств множества деталей из разных материалов. Примерно такая же ситуация возникнет при производстве достаточно сложных нанотехнологических изделий.

Завершая сравнение, отмечу, что технология оружия требует развития точных и воспроизводимых методов производства, что подразумевает создание инструментальной базы и целого набора измерительной аппаратуры. С крайне формальной точки зрения, нанопроизводство имеет дело лишь с атомами и молекулами, однако и в этом случае необходимо по крайней мере иметь аппаратуру, позволяющую описывать и оценивать структуры нанометрического масштаба. Кроме того, такое производство требует наличия инструментальной

²² http://www.trnmag.com/Stories/2004/111704/Nanomechanical_memory_demoed_111704.html.

базы, обеспечивающей манипуляции с «нанодетальями», а оценка свойств вещества на этом уровне точности представляет собой совсем не простую техническую задачу.

Я пытаюсь объяснить, что развитие нанотехнологии (подобно любой другой существующей технологии) невозможно без разработки большого числа вспомогательных устройств, измерительных приборов и т. д. К счастью, в последние годы наблюдается заметный прогресс в этом направлении. Например, компания EEI Co (Хиллсборо, штат Орегон) в 2004 году сообщила о возможности получения изображений с точностью около 1 ангстрема, что соответствует размерам отдельного атома водорода²³. Министерство энергетики США приступило к созданию микроскопа с разрешением 0,5 ангстрема, в котором применяются магнитные «линзы», позволяющие корректировать искажения²⁴. В настоящее время первое устройство такого типа монтируется в Национальной лаборатории имени Лоуренса (Беркли, штат Калифорния), а ввод в эксплуатацию намечен на 2008 год.

3.5. Превращение науки в технологию и бизнес

Образно говоря, в настоящее время нанотехнология переживает свою юность, переходя от неоформленного детского состояния к зрелому и ответственному этапу развития. Для технологии, как и для человека, существуют характерные особенности «юношеского поведения», некоторые из них читатель может заметить сам. На рынке наноматериалов уже стали происходить смешные и анекдотические истории, характерные для начального этапа развития любых новых технологий (история техники полна такими историями). Например, какие-то мошенники смогли продать партию обычной сажи, выдав ее за углеродные нанотрубки, а другим удалось «всучить» покупателям партию очень дорогих в изготовлении нанотрубок специального типа, на одну треть состоящую из использованного при синтезе катализатора, который жулики «забыли» отделить. Такие истории свидетельствуют не только о развитии и становлении рынка, но и о реальном спросе на новые материалы.

Уже можно заметить, что наибольшее число жалоб и споров вызывают поставки тех материалов, которые требуют особой чистоты молекулярных структур и точности производства (например, нанотрубок и фуллеренов). Появление на рынке и внедрение материалов, свойства которых связаны со статистическими характеристиками и легче поддаются проверке и измерению (например, нанопористые покрытия), происходит гораздо проще и быстрее. Это вновь напоминает нам о необходимости разработки точной измерительной аппаратуры, систематизированной программы испытаний и не в последнюю очередь согласованных стандартов на количественные и качественные характеристики для нарастающего числа новых материалов с новыми свойствами.

Еще одной особенностью, характерной для «молодых» технологий, становится проблема безопасности использования материалов и изделий неизвестных ранее видов. Например, только сейчас становится ясным, что наночастицы могут беспрепятственно проникать практически через все защитные системы человеческого организма, включая кожу и стенки сосудов кровеносной системы. Эти свойства уже изучались учеными для различных медицинских применений, однако сейчас наступила пора задуматься о возможности токсичного воздействия частиц на организм в целом. Медицина накопила некоторый опыт в этом отношении, так как наночастицы содержатся в автомобильных выхлопах, многих медицинских и косметических препаратах, промышленных отходах и т. п., однако нанотехнологии приведут к значительному росту количества поступающих в окружающую среду частиц и их раз-

²³ http://news.com.com/Superpowered+micro-scope+could+help+focus+nanotech+dream/2100-7337_3-5471939.html.

²⁴ <http://www.dailycal.org/article.php?id=17119.174> Section Three Materials and Industries.

нообразия. Все эти вопросы требуют тщательного рассмотрения, законодательного оформления и выработки общественной позиции.

3.6. Возвращение к реальности

Я начал главу с обсуждения вопроса о реальном содержании нанотехнологий, скрытом под большим числом фантазий, модных веяний и научных капризов. На самом деле представляется очевидным, что нанотехнологии уже доказали свою особую важность для решения фундаментальных проблем, стоящих перед человечеством. Они, безусловно, являются не просто интересными в научном смысле, но могут занять достойное место на коммерческом рынке, так как наноматериалы уже не только продемонстрировали свою конкурентоспособность, но и открыли новые горизонты применения.

Пройдя начальный период развития, нанотехнологии уже перестали быть предметом интереснейших физических исследований и философских рассуждений, превратившись в мощный механизм создания совершенно новых материалов и производственных процессов. На их основе в настоящее время уже созданы и производятся многочисленные и разнообразные изделия (от новых типов тканей до устройств направленной доставки лекарств в организме). Более того, уже создано огромное число успешно функционирующих прототипов других нанотехнологических устройств и материалов, включая готовые к производству образцы новейших радиоэлектронных устройств.

Нанотехнологии являются не научным капризом, а одной из основных тенденций развития современной промышленности. Английская поговорка гласит, что отсутствие новостей – хорошая новость. Исходя из этого парадоксального определения, будем считать хорошей новостью тот факт, что нанотехнологии не только уже существуют, но и превратились в новый товар, новую общую ценность! Умение управлять веществом в нанометрическом, атомно-молекулярном масштабе обещает невиданные изменения в промышленном производстве и связанные с этим огромные прибыли в ближайшее десятилетие или, самое позднее, к концу 2020-х годов.

В качестве еще одной хорошей новости (то есть отсутствия особой новизны!) отмечу, что новейшие открытия в области нанотехнологий позволяют надеяться в близком будущем на достижение поразительных результатов в производстве новых товаров, медицине и образе жизни вообще!

Раздел II

Участники гонки

Глава 4

Коммерциализация нанотехнологии. Работает ли закон Мура в микро– и наноэлектронике?

Стив Джарветсон

Стив Джарветсон является административным управляющим фирмы Draper Fisher Jurvetson (DFJ.com), а также основателем крупных венчурных фирм Hotmail, Interwoven и KANA. Кроме этого, он руководит вложениями своей фирмы в предприятие Tradex and Syras (приобретенное недавно фирмой Ariba and Siena за 8 миллиардов долларов), связанное с молекулярной электроникой и нанотехнологией. Стоит отметить, что Стив Джарветсон является классным специалистом в этой области, поскольку он ранее работал в фирме Hewlett-Packard, где по его проектам выпускалось семь типов кремниевых чипов. Кроме того, он разрабатывал и занимался маркетингом разнообразных материалов и устройств, выпускаемых рядом ведущих фирм (Apple, NeXT Software), и является одним из крупных и авторитетных экспертов в новых технологиях, инновационной политике и организации новых производств. Его деятельность неоднократно отмечалась, оценивалась и обсуждалась ведущими экономическими газетами и журналами США. Стоит отметить, что журналы Worth и Fortune помещали портрет С. Джарветсона на обложке (Fortune назвал его одним из лучших инвесторов научных разработок), а VC Journal включил его в «десятку наиболее влиятельных венчурных капиталистов США». Журнал Fortune отметил его в своей подборке «Мозговой трест из десяти главных специалистов» (Brain Trust of Top Ten Minds).

Вообще говоря, история любой технологии представляет собой серию резких скачков или разрывов, между которыми развитие описывается возрастающей экспоненциальной кривой, получившей (в очень упрощенной форме) широкую известность в качестве так называемого закона Мура. Он оказался характерным для развития самых разных технических устройств или их характеристик, причем, как это ни странно звучит, действие закона часто кажется независимым от экономических условий роста. Первоначально закон Мура был предложен только для описания процессов развития очень узкой и весьма специфической отрасли электронной промышленности (производства компьютерных чипов), однако его универсальность и популярность неожиданно проявилась во многих других областях (точно так же, как нанотехнология оказалась связанной с множеством наук и технических применений). В этой главе мы подробно обсудим закон Мура, а также его применимость к описанию эволюции нанотехнологии.

Собственно говоря, абстрактные рассуждения о природе закона Мура необходимы автору лишь для одной цели – оценки перспектив развития молекулярной электроники. Дело в том, что теоретические и практические успехи в развитии именно этого направления электроники позволяют очень наглядно и детально обсудить все проблемы, связанные с коммерциализацией нанотехнологических разработок вообще.

4.1. Экспоненты технологического роста

Психологически человек всегда склоняется к линейному восприятию событий и зависимостей, однако естественным законом (паттерном) развития в биологической и технической эволюции почти всегда выступает ускоряющий рост, что обусловлено заложенной в природных явлениях положительной обратной связью. В настоящее время технология в целом преодолевает некий порог, после которого «разрывы» в развитии перестанут выглядеть случайными, а начнут обретать значимость, связанную с реальными событиями и так называемыми жизненными циклами производимых продуктов.

Сейчас венчурный капитал (ВК) в нанотехнологиях переживает ранний этап развития, для которого характерным является поиск новых «прорывных» технологий (которые можно назвать даже «разрушительными», поскольку они уничтожают старые производства и представления).

Ученые и предприниматели на этом этапе стремятся изменить мир или по крайней мере существующие технологии. При этом для достижения успеха им необходимо проанализировать и «преодолеть» основные тенденции развития предыдущей «технологической волны» развития. Коллектив компании FFJ (Draper Fisher Jurvetson), в которой я работаю, убежден в том, что нанотехнология действительно создает очередную волну технологического развития, способную привести к следующей технической революции и преобразованию не только промышленности, но и всей социальной жизни. Я уверен, что позднее историки будут сравнивать переживаемый нами период с промышленной революцией конца XVIII века, преобразовавшей мир.

Многие специалисты уже сейчас серьезно думают не о краткосрочных проектах и планах, а пытаются угадать среднесрочные тенденции или даже далекие перспективы развития науки и промышленности, связанные с этой волной развития. В связи с этим постоянно возрастает как число предпринимателей, так и разнообразие инновационных проектов в области нанотехнологий. Число новых компаний, в которые инвестирует наша фирма, активно вовлеченная в эту инновационную политику, постоянно растет.

Из предыдущего опыта известно, что в среднесрочной перспективе успех прорывных технологий относительно слабо связан с циклами общей экономической активности, что наглядно доказывает вся история полупроводниковой техники и промышленности. Например, в течение последних 40 лет ее развитие прекрасно укладывается на теоретическую кривую закона Мура, несмотря на множество драматических событий, связанных с политикой и экономикой. Более того, знаменитый автор прогнозов в области нанотехнологий Рэй Курцвейль осуществил даже «абстрагированный» обратный прогноз действия закона Мура. Он рассмотрел прогресс в области мощности вычислений и емкости запоминающих устройств (не только основанных на транзисторах, но и всех вычислительных машин вообще), то есть исторически расширил границы анализа на сотни лет. Результатом его исследований стал удивительный факт: развитие этих параметров прекрасно описывается экспоненциальной зависимостью, на которую почти никакого влияния не смогли оказать исторические катаклизмы, включая две мировые войны и Великую депрессию США на рубеже тридцатых годов. Аналогичный экспоненциальный рост самых разных показателей научных и технических достижений легко проследить в истории развития Интернета, медицинской диагностики, расшифровки генов, использования трехмерных паттернов (изображений) внутренних органов или белковых структур и т. д.

Курцвейль попытался свести наблюдаемый экспоненциальный рост наших технологических возможностей (и эволюции в целом) к довольно простой и близорукой схеме: он предположил, что прогресс науки и техники в течение ближайших 20 лет будет просто экви-

валентен или сравним с прогрессом за весь предыдущий век. Для большинства специалистов по прогнозированию (вовсе не считающих, что длительность человеческой жизни как-то увязана с периодом в 100 лет) его метафоры и сравнения выглядят полной абстракцией. Всякие сравнения в этой области бессмысленны, поскольку, например, в начале прошлого века в США было всего 144 мили асфальтированных дорог. Условия жизни основной части населения существенно отличались от тех, которые мы сейчас считаем цивилизованными и приемлемыми, например, большинство людей (более 94 %) рождалось дома (а не в благоустроенных больницах), а примерно 86 % населения не имело никакого представления о ваннах, телефонах и электричестве. Читатель может сам представить себе тот уровень технического прогресса, который неминуемо ожидает человечество в 2020 году, задумавшись о предсказываемых возможностях генетики, нанотехнологии и других наук. Экспоненциальный рост технологических возможностей и их применений давно превышает все наши способности к «линейному» прогнозированию будущего. Обещанный социологами «шок будущего» в свете открывающихся возможностей выглядит очень скромным и простым.

История человечества формируется ростом уровня общего знания и технических возможностей, которые и позволяют нам создавать новые инструменты и возможности преобразования мира или познания его закономерностей. Сейчас мы вступаем в эпоху совершенно фантастического роста возможностей человечества, связанных с экспоненциальным развитием в области биотехнологии, молекулярной инженерии, вычислительной техники и множества других областей. «Перекрестное опыление» (на жаргоне биологов) между разными науками и технологиями должно неизбежно привести к множеству новых и неожиданных возможностей. В связи с очевидной тенденцией к «оцифровыванию» любой информации, относящейся к веществам и биологическим процессам, ученые очень скоро получают возможность управлять биологическими информационными системами с невиданной эффективностью, что позволит им начать создание новых структурированных материалов по методике снизу вверх, пользуясь принципами самоорганизации и самосборки.

4.2. Закон Мура

В своей самой простой формулировке закон Мура сводится к утверждению, что плотность монтажа транзисторных схем возрастает вдвое за каждые 18 месяцев. Авторство закона приписывают одному из основателей известной фирмы Intel Гордону Муру. Строго говоря, в действительности эта формулировка представляет собой «смесь» разных прогнозов Мура, который в 1965 году предсказал ежегодное удвоение числа транзисторов в электронных чипах, обладающих наилучшим показателем эффективности, то есть минимальным отношением стоимость/качество. Позднее, в 1974 году Мур пересмотрел свою оценку и стал считать, что удвоение плотности монтажа должно происходить за два года. В общественном сознании эти предсказания постепенно слились в одно с периодом удвоения плотности монтажа 18 месяцев.

Основная идея закона Мура сводится к тому, что сложность электронных микросхем (в пересчете на стоимость) возрастает с некоторой постоянной скоростью, однако в настоящее время научная общественность воспринимает этот закон либо слишком абстрактно и общо, либо, наоборот, придает ему чрезмерно конкретный характер. Например, некоторые специалисты пытаются уточнить и конкретизировать закон, полагая, что речь идет только о двухмерной плотности монтажа транзисторных схем, а другие относят его к вычислительной мощности схемы вообще, то есть произведению скорости x на плотность.

Поскольку нас интересуют в первую очередь долгосрочные прогнозы развития нанотехнологии, мы рассмотрим наиболее абстрактную форму наблюдаемой зависимости, поз-

воляющей (но только формально!) проследить действие закона Мура в течение целого столетия. Кроме того, отклоняясь от собственно электронной техники, мы попробуем оценить значимость и действенность закона Мура вообще, то есть для других областей промышленности.

4.2.1. Важность закона Мура

Закон Мура долгое время связывали только с электронной промышленностью (чипы, коммуникационные системы, компьютеры), однако позднее оказалось, что им же определяется развитие и производство лекарственных препаратов, биоинформационных технологий, методов медицинской диагностики и многих других научно-технических направлений. Эта общность приобретает особое значение в наше время, когда многие «лабораторные» (то есть экспериментальные) исследования меняют свой характер, а ученые перестают изучать природу классическими методами «проб и ошибок», переходя к моделированию процессов на ЭВМ, что наглядно демонстрируют приводимые ниже примеры.

Недавно в Исследовательском центре НАСА имени Эймса была демонтирована большая аэродинамическая труба, использовавшаяся для продувки крупных моделей авиационно-ракетной техники. Причиной можно считать действие закона Мура, в соответствии с которым мощность и возможности вычислительной техники возросли настолько, что ученые могут математически моделировать турбулентные потоки обтекания, а не «запихивать» образцы техники в аэродинамические трубы. Разумеется, новый подход создает огромные возможности ускорения любых исследовательских работ.

Гигантская фармацевтическая компания Eli Lilly сейчас выпускает, образно говоря, в 100 раз меньше молекул, чем 15 лет назад, хотя число и разнообразие разрабатываемых и выпускаемых лекарств за это время значительно возросло. И в этом случае исследования и производственные процессы стали намного эффективнее, благодаря чему компания выбрала своим рекламным слоганом фразу «Меньше атомов, но больше битов!»

Известно, что основная проблема моделирования сводится к очень большому объему и высокой точности необходимых вычислений. Почти в любой области науки можно указать некий «порог точности» расчетов, преодолев который ученые могут отказаться от лабораторных экспериментов и перейти к использованию компьютерного моделирования. Уже сейчас во многих областях моделирование «конкурирует» с экспериментальными исследованиями в качестве движущей силы технического прогресса. В качестве примера преодоления «порога точности» в последние годы стоит упомянуть метеорологию (рост вычислительной мощности ЭВМ сделал возможным точное прогнозирование погоды на 6 часов вперед), испытание автомобилей на прочность (любые процессы столкновения можно изучать на компьютере, исследования динамики трехмерных белковых структур (фолдинг) и т. п.

Возвращаясь к проблеме формулировки закона Мура, отметим, что инженеры, связанные с производством компьютерных чипов и озабоченные оптимизацией производственных процессов, конечно, не занимаются подсчетом числа транзисторов в схемах. Точно так же потребителей вычислительной техники интересует не плотность монтажа транзисторов, а обобщенные рабочие параметры созданного на их основе компьютера (прежде всего скорость обработки информации и объем запоминающих устройств). Сказанное может быть отнесено и ко многим другим технологиям, поэтому имеет смысл «отделить» закон Мура от конкретного производства транзисторов (для которого он был первоначально предложен), то есть избавиться его, образно говоря, от транзисторной «метрики». При этом закон становится весьма общей закономерностью научно-технического развития и может быть использован для создания долгосрочных прогнозов.

Например, в вычислительной технике действие закона Мура может быть гладко «аппроксимировано» примерно на 100 лет назад, то есть продлено «назад» до момента, когда никакой полупроводниковой техники вообще не существовало. Как показано на рис. 4.1, история вычислительной техники за последнее столетие может быть представлена в виде пяти сменяющих друг друга периодов, соответствующих указанным на рисунке парадигмам развития (электромеханические калькуляторы, релейная техника, вакуумные лампы, транзисторы, интегральные схемы). В этом случае собственно закон Мура (в его строгой исходной формулировке) может быть отнесен только к пятой парадигме, однако легко заметить, что характеристики вычислительных устройств за 100 лет развития действительно очень точно соответствуют общему закону экспоненциального роста. Говоря более просто, за последнее столетие мощность, или производительность вычислительной техники (computational power), в среднем удваивалась каждые два года (в пересчете на некоторую фиксированную цену, например, на 1000 долларов). Последние тридцать лет удвоение характеристик происходило в течение каждого года. Вертикальная ось на рис. 4.1 является логарифмической, так что горизонтальные линии на рисунке соответствуют возрастанию характеристик в 100 раз. Строго говоря, экспоненциальному росту должна была бы соответствовать прямая линия по диагонали, но рисунок взят из книги Рэя Курцвайля, который обнаружил некоторое ускорение и описал его, используя так называемую двойную экспоненту.

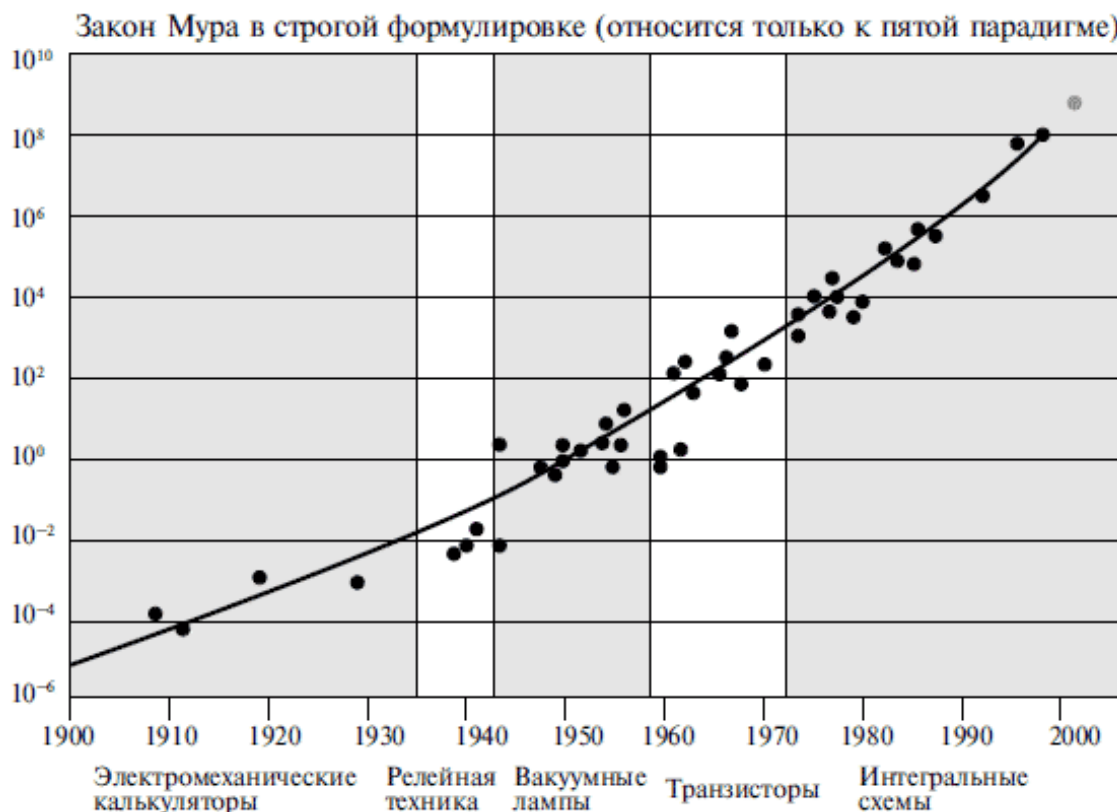


Рис. 4.1. Развитие вычислительной техники за последнее столетие в соответствии с формальной «версией» закона Мура Каждая точка соответствует параметрам конкретного вычислительного устройства (из книги Рэя Курцвейля)

Каждая точка относится к конкретной модели, создаваемой в попытке добиться рекордных показателей вычислительной техники. Очевидно, что за каждой точкой стоят интересные, драматические события в жизни конкретных талантливых людей (интересно, что все они действовали практически независимо друг от друга, но параметры создаваемых ими устройств почти точно укладываются на предсказуемую кривую). Например, первая точка

на рисунке соответствует электромеханическому калькулятору, созданному в 1890 году для обсчета результатов переписи населения США. Одна из точек соответствует знаменитому устройству, позволившему в годы Второй мировой войны расшифровать используемый немцами код «Энигма» (этому событию посвящено несколько книг и кинофильмов), другая – той машине, которая сумела предсказать неожиданную победу Эйзенхауэра на президентских выборах 1952 года вопреки мнению всех политологов и средств массовой информации! Какие-то точки означают известные всем системы Apple II и Cray и т. д. Этот процесс продолжается, так как мы продолжаем постоянно совершенствовать технические параметры, алгоритмы вычисления и программное обеспечение ЭВМ, продолжая и развивая приведенную на рисунке кривую. Для того чтобы продемонстрировать ее возможности в настоящем, я просто обратился к рекламным проспектам, выписал параметры современного дешевого и доступного персонального компьютера (фирма Wal-Mart.com) и нанес еще одну дополнительную точку на рисунок Курцвейля (серая точка в правом верхнем углу).

Особо следует подчеркнуть тот факт, что кривая практически не связана с экономическими циклами развития, то есть на ней нельзя уловить воздействия кризисов промышленности (включая знаменитую Великую депрессию 1929 года в США), двух мировых войн и иных геополитических событий. Конечно, эти события и связанные с ними важнейшие экономические факторы (скорость внедрения новой техники, нормы прибыли, доходность вложений и т. д.) приводят к случайному разбросу параметров точек на рисунке, однако общая долгосрочная тенденция представляется очевидной.

В соответствии с описанными закономерностями любая отдельная новая технология (например, связанная с производством так называемых комплементарных МОП-структур) будет проходить в своем развитии одинаковые стадии, соответствующие S-образной кривой. При каждом конкретном процессе внедрения технического продукта наблюдается медленный рост в начальный период развития, резкое ускорение в фазе широкого внедрения и естественное замедление, обусловленное насыщением рынка и падением спроса из-за появления новой техники. Смысл закона Мура состоит в том, что при этом, однако, наиболее общие и важные технические характеристики целого класса устройств (быстродействие, объем памяти, ширина полосы пропускания и т. п.) всегда изменяются по экспоненте, как-то неожиданно объединяя разные технологии, каждая из которых описывается собственной последовательностью S-образных кривых развития.

Если история техники имеет некий смысл и общие закономерности, то действие закона Мура приведет к обнаружению новых структур и материалов, свойства которых будут качественно превышать характеристики упомянутых кремниевых комплементарных МОП-структур. В истории вычислительной техники за последнее столетие уже сменилось пять парадигм, и этот процесс будет продолжаться.

4.2.2. Проблемы современной парадигмы

Гордон Мур за прошлые десятилетия неоднократно посмеивался над скептиками, предсказывавшими скорую «кончину» сформулированного им закона, однако нельзя не заметить, что традиционная полупроводниковая техника действительно подходит к некоторым последним границам развития, обусловленным фундаментальными законами природы. Кстати, недавно об этом заявил и сам Мур, признавший, что его закон к 2017 году потеряет первоначальный смысл для любых кремниевых устройств.

Одна из главных проблем состоит в том, что увеличение плотности монтажа неизбежно приводит к повышению температуры работающих устройств, так что уже сейчас фирмы-производители озабочены поиском возможностей охлаждения схем, вырабатывающих (в пересчете) около 100 ватт энергии на 1 см². Существующие технологии явно исчер-

пали себя, так что в долговременной перспективе следует ожидать принципиально нового, прорывного подхода, то есть возникновения новой парадигмы.

Еще более сложной выглядит проблема физических размеров устройств, поскольку технологии вплотную приблизились к размерам отдельных атомов. Например, уже сейчас оксидные полупроводниковые электроды в выпускаемых фирмой Intel изделиях имеют толщину 1,2 нм, а в ближайшем будущем фирма обещает довести толщину до трех атомов. Естественно, что никто не может ожидать дальнейшего уменьшения размеров вдвое и т. д. за счет разработки новых материалов изоляции. Сама фирма связывает дальнейший прогресс с наноструктурами из принципиально новых материалов (диэлектрики с высоким значением коэффициента k и новые типы металлических контактов), к реальному использованию которых она должна приступить в 2007 году. Примечательно, что ни одна из фирм, занятых коммерческим производством, уже не создает привычные планы разработок на ближайшие 50 лет (так называемые «дорожные карты») в области КМОП-структур. Основной проблемой в использовании тонких оксидных электродов и диэлектриков с высоким значением коэффициента k остается возможность так называемого квантового туннелирования. По мере уменьшения толщины оксидного слоя туннельный ток управляющего электрода может достигать значений тока канала или даже превосходить его, после чего фактически теряется возможность регулирования работы транзистора.

Другая серьезная проблема состоит в том, что из-за технических сложностей чрезвычайно возрастает стоимость производственных линий по изготовлению полупроводниковых устройств, или чипов. Цена оборудования такой производственной линии также примерно удваивается каждые три года (забавно, но такая закономерность получила название второго закона Мура) и сейчас уже составляет около 3 миллиардов долларов. Другими словами, нам удастся уменьшать размеры транзисторов только за счет резкого удорожания стоимости оборудования и производства. Удорожание производства объясняется прежде всего возрастающей стоимостью литографического оборудования, которое используется для создания многослойных субмикронных паттернов (шаблонов) на полупроводниковых пластинах. В настоящее время производители возлагают очень большие надежды на так называемую наноимпринтную литографию и молекулярную электронику, что обещает существенно снизить расходы и повысить качество производимых изделий.

Наша фирма уже сейчас инвестировала значительные капиталы в компании, которые стараются угадать характер следующей смены общей парадигмы в производстве элементов вычислительной техники. Мы уверены, что принципиально новые технические решения будут найдены и кривая, описывающая действие закона Мура на рис. 4.1, будет расти и после 2017 года (несмотря на скептицизм самого Гордона Мура!). С другой стороны, выше уже отмечалось, что закон Мура сложным образом связан с отношением характеристики/стоимость, вследствие чего некоторые исследователи в поисках краткосрочных решений пытаются изменить это соотношение именно за счет массовости, то есть резкого удешевления цены отдельных элементов. Читатель может представить себе огромные рулоны (типа бумажных обоев), узоры на которых составлены из массы исключительно дешевых транзисторов. Одна из сотрудничающих с нами компаний сейчас осваивает процессы «осаждения» традиционных транзисторных структур на полимерных матрицах при комнатной температуре, что позволяет организовать массовое и очень дешевое производство некоторых изделий, которые ранее изготавливались по весьма сложной технологии с выращиванием кремниевых кристаллов, вырезанием из них и обработкой сверхтонких пластин и т. д.

4.3. Молекулярная электроника

При размышлениях о смене парадигмы в вычислительной технике и новых материалах на следующий период развития (его можно назвать посткремниевым) сразу вспоминается молекулярная электроника, которая постепенно становится нанотехнологической альтернативой КМОП-транзисторам. Молекулярные переключатели обещают революцию в вычислительной технике, так как они позволят вместо планарного формирования элементов КМОП-структур (методами осаждения) использовать их объемные сочетания, что приведет к решительным изменениям в методах производства и компоновки схем. Возможно, в начальный период такие молекулярные переключатели будут применяться лишь в некоторых «узких местах» схем, чтобы можно было дольше использовать процессы и стандартные внешние соединения, к которым привыкли специалисты за десятилетия развития кремниевой технологии.

Например, нанотехнологическая фирма Nantero в Вобурне (штат Массачусетс) использует углеродные нанотрубки, «подвешенные» к металлическим электродам на кремнии таким образом, что они образуют так называемые энергонезависимые запоминающие устройства (nonvolatile memory), или чипы с очень высокой плотностью соединений. Идея метода заключается в том, что слабые молекулярные (ван-дер-ваальсовские) силы способны удерживать изогнутые нанотрубки в заданном положении практически бесконечно долго, не требуя дополнительных затрат энергии. К этому можно добавить, что углеродные нанотрубки имеют очень малое сечение (примерно 10 атомов в диаметре) и обладают прекрасными прочностными характеристиками. Будучи в 6 раз легче стали, этот материал в 30 раз прочнее ее, вследствие чего нанотрубки могут одновременно выполнять роль проводов, микроконденсаторов и транзисторов. Помимо сказанного, новая технология позволяет значительно повысить рабочие параметры устройств (быстродействие, плотность монтажа и т. п.) и снизить их стоимость. Одним из важнейших преимуществ энергонезависимых запоминающих устройств выступает то, что на их основе можно создать «мгновенно включающиеся» персональные компьютеры.

Некоторые компании (например, Hewlett-Packard и ZettaCore) пытаются создавать запоминающие элементы на поверхности кремния, используя органические молекулы, способные к самосборке под воздействием химических сил, причем общий ход процесса задается заранее нанесенными на кремниевый чип паттернами или соответствующей экспозицией.

Ниже перечисляются некоторые основные характеристики устройств и их особенности, позволяющие реально рассматривать молекулярную электронику в качестве главного направления для смены парадигмы в изготовлении элементов вычислительной техники, то есть для дальнейшего развития по закону Мура.

- *Размеры.* Особую привлекательность молекулярной электронике придает то, что она потенциально позволяет осуществить принципиальную миниатюризацию элементов вычислительной техники, сравнимую с той, которая произошла при переходе к пятой парадигме прошлого века (производство интегральных схем) и обеспечила рост характеристик в соответствии с законом Мура еще на тридцать лет. В 2002 году специалисты фирмы IBM, пользуясь сканирующим туннельным микроскопом, разработали методику манипуляций с отдельными молекулами монооксида углерода, что позволило им создать «триодный» анализатор импульсов на поверхности меди. Размеры этого устройства были в 260000 раз меньше, чем у соответствующей схемы в коммерчески выпускаемых чипах. Воображение человека с трудом воспринимает такие огромные цифры, но для сравнения размеров молекул и создаваемых человеком устройств читатель может представить себе каплю воды и вспомнить, что

число молекул в ней в 100 раз превышает число всех транзисторов во всех электрических схемах, выпущенных промышленностью. Особую роль для миниатюризации играет то, что в природе молекулы располагаются в объеме, в то время как создаваемые нами интегральные схемы всегда представляют собой чрезвычайно сложные и тонкие структуры, располагающиеся только на плоской, двумерной поверхности весьма большой (естественно, по молекулярным масштабам!) и совершенно не используемой кремниевой подложки.

- *Мощность.* Одна из главных причин, по которой конструкторы не могут создавать объемные структуры из транзисторов, заключается в тепловыделении, приводящем к расплавлению кремниевых подложек. Строго говоря, даже самые современные транзисторы являются крайне неэффективными устройствами, и их коэффициент полезного действия значительно уступает, например, двигателям внутреннего сгорания. Потребляемая энергия расходуется транзисторами в процессе вычислений крайне расточительно и бесполезно. Для сравнения укажем, что человеческий мозг по эффективности энергопотребления и способности к расчетам превосходит лучшие из существующих процессоров в 100 миллионов раз, уступая последним только в быстродействии (менее 1 кГц). Эффективность работы мозга (в качестве вычислительного устройства) обеспечивается исключительно высокой плотностью внутренних связей в очень небольшом объеме (примерно 100 триллионов синапсов связывают между собой 60 миллиардов нейронов). Будущее вычислительной техники связано только с резким снижением энергопотребления (в пересчете на количество операций) и повышением скорости самих операций.

- *Стоимость производства.* Создаваемые в настоящее время молекулярные электронные устройства очень просты и чаще всего представляют собой «покрытия» или самоорганизующиеся структуры из органических соединений. Собственно говоря, требуемая от них сложность как бы предварительно «заложена» в сложную структуру синтезируемых молекул, поэтому процесс изготовления может быть сведен упрощенно к «расплескиванию» химической смеси на подготовленную кремниевую поверхность. Сложность устройства в целом при этом обеспечивается не сложностью технологических процессов обработки и инженерного замысла, а свойствами самих молекул. Нанотехнологии концептуально отличаются от привычных процессов примерно так же, как биологический рост организма отличается от вытачивания детали на станке. Главное отличие заключается в том, что сложность в наноструктурах возникает в результате идущих «снизу вверх» процессов, то есть «задается» какими-то внутренними конформационными изменениями материала, а также слабыми молекулярными силами и поверхностным взаимодействиям участвующих в процессе молекул. Легко заметить, насколько такие процессы отличаются от обычной инженерной технологии изготовления объектов «сверху вниз», основанной на точных операциях и статическом состоянии обрабатываемых изделий.

- *Возможность производства при низких температурах.* Одной из замечательных особенностей биологических процессов является то, что они позволяют создавать очень сложные объекты без применения температур около тысячи градусов, высокого вакуума и т. п. Большинство реакций органических молекул осуществляется при комнатной температуре или температуре человеческого тела. В массовом производстве это означает переход от дорогостоящих и сложных в изготовлении кристаллических подложек к гораздо более дешевым и удобным полимерным материалам.

- *Элегантность технических решений.* Немаловажным фактором выступает то, что молекулярная электроника зачастую позволяет находить, как говорят инженеры, элегантные технические решения многих сложных проблем, особенно в области создания так называемых энергонезависимых и «внутренне цифровых» (inherent digital) запоминающих устройств. Для придания этих абстрактно задуманных характеристик устройствам на основе КМОП-структур, технологам приходится применять самые «неестественные» и сложные

методы обработки. В связи с этим интересно отметить, что многие объекты молекулярной электроники исходно являются энергонезависимыми и «цифровыми»!

Существует множество других интересных проектов (от создания квантового компьютера до использования ДНК в качестве структурирующего материала для направленной сборки нанотрубок). Число таких разработок постоянно возрастает, а объединяет их лишь то, что все они с полным правом могут быть отнесены к нанотехнологиям.

4.4. Коммерциализация нанотехнологии

В определении нанотехнологии часто используется или упоминается возможность манипуляции и управления объектами нанометрического размера (обычно речь идет о диапазоне 1—100 нм). Давно замечено, что использование масштаба длины в определении целой науки выглядит необычным и даже странным (ведь никому не приходит в голову, например, называть какие-то технологии «дюймовыми»!). Венчурных капиталистов интересуют прежде всего какие-то качества материалов или необычные процессы, позволяющие им создавать новые, нестандартные товары и услуги. Нашей фирме часто приходится консультировать так называемые стартапы, то есть венчурные фирмы, создаваемые именно для «раскрутки» новых товаров, основанных на передовых технологиях, новейших научных разработках и т. п. Обычно мы начинаем разговор с клиентами со стандартных вопросов, относящихся к мотивации их деятельности (почему вас это интересует? почему сейчас? почему вы не занялись этим бизнесом 10 лет назад?). При разговоре о нанотехнологических проектах мы практически всегда слышим, что в результате последних исследований появилась возможность производить очередной наноматериал с необычными свойствами, которые никогда ранее не наблюдались в известных веществах.

Вещества и процессы в нанометрическом диапазоне размеров обладают множеством необычных характеристик, которые кажутся нам странными просто в силу того, что наши органы чувств и даже способность к восприятию сформировались в «большом» (макроскопическом и статистическом) мире. Действительно, мы не способны видеть отдельный фотон, заряд электрона или квант энергии, точно так же как молекулярные взаимодействия. Человек видит и описывает лишь макроскопические, усредненные объекты и явления, проявляющиеся в больших масштабах (типа трения и т. п.). При переходе к наноразмерам перестают действовать и становятся неточными привычные законы ньютоновской физики, место которых занимают постулаты квантовой механики. Я еще раз повторю, что нанотехнология вовсе не означает простое уменьшение размеров и использование связанных с этим преимуществ. Речь идет о принципиальном изменении законов природы на этом уровне. Для наноразмерных объектов естественными становятся квантовое «переплетение» событий, туннелирование (прохождение частиц через преграду), баллистический перенос электронов, протекание жидкостей без трения и многие другие загадочные явления, которые ставили в тупик всех физиков-теоретиков, начиная с Эйнштейна.

В качестве простого примера «разрыва» свойств вещества при переходе от обычных размеров к атомарным можно рассмотреть поведение обычной алюминиевой банки из-под пива. Если вам удастся измельчить эту банку в алюминиевый порошок с размерами частиц 30–40 нм, то вам придется обращаться с ним крайне осторожно, так как он представляет собой мощную взрывчатку (такую алюминиевую пудру военные используют в качестве катализатора горения ракетных топлив). Другими словами, мы получаем возможность целенаправленного и существенного изменения свойств вещества изменением размера составляющих его частиц. Например, в случае с алюминием принципиальное значение имеет изменение отношения площадь/объем, а возможно, и нарушение межатомных расстояний в кристаллической решетке из-за поверхностных эффектов.

4.4.1. Инновации происходят на границе познания

Прорывные инновации, являющиеся движущей силой развития и обновления технологий, естественно, происходят, образно выражаясь, на границе познания, то есть на передовых рубежах науки. Говоря в самом широком смысле и используя биологическую терминологию, можно сказать, что перспективные инновации не могут возникать в теплой, безопасной и уютной обстановке середины «стада». Инновации можно уподобить биологическим мутациям, происходящим где-то на краю среды обитания, то есть на границе выживаемости и поиска новых возможностей. Интересно, что в теории сложности объекты, обладающие структурой и сложностью (как физикоматематическим свойством), тоже возникают на границе хаоса, где проходит линия раздела между областями предсказуемого поведения систем и хаотической неопределенности. Точно так же в науке ценные прорывные инновации чаще всего возникают в междисциплинарных, необычных и комплексных исследованиях, далеких от академического формализма.

Возможно, особая притягательность и очарование нанотехнологий связаны именно с человеческим фактором отношения к науке. Нанонаука неожиданным образом выявляет целые области взаимного «перекрывания» фундаментальных наук и создает возможности для их «перекрестного опыления» идеями из чуждых научных дисциплин (квантовая физика и химия, биология, вычислительная техника и т. д.). Дело в том, что в процессе своего исторического развития каждая из академических наук выработала собственную систему ценностей, парадигм и даже собственный язык (или хотя бы терминологию), которые изолируют и отделяют ее от смежных дисциплин. Нанонаука (в самом общем смысле) дает ученым возможность вновь объединить свои системы и языки, предлагая им общие методы и объекты исследования. Объединяющее положение нанонауки среди прочих дисциплин схематически представлено на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Нанонаука представляет собой «перекресток» многих научных дисциплин

Развитие нанотехнологии вызывает интересные и ценные дискуссии в учебных заведениях и правительственных лабораториях, способствуя междисциплинарным исследованиям. Во многих институтах открываются отдельные факультеты и учебные центры, специализирующиеся в области нанонауки и нанотехнологии. Интересно, что здание факультета по нанотехнологиям в Стэнфордском университете располагается между учебными корпусами других специальностей (инженеры, вычислительная техника, медицина), что как бы символизирует объединяющую роль новой науки. Более того, эту объединяющую и интегрирующую функцию она сохраняет и вне академической сферы, неожиданно создавая новые и непривычные комбинации в бизнесе и социальных отношениях. Например, нанотехнологические товары и изделия имеют самое разное назначение (солнечные батареи, компьютерные чипы, лекарственные препараты и т. п.), что привело к активизации и появлению новых связей между специалистами по маркетингу, распределению и продаже в этих далеких отраслях. Расширение и обновление таких связей практически всегда оказывает благотворное воздействие на участников, создавая возможности для обмена знаниями и методами (физики назвали бы это синергетическим эффектом).

4.4.2. Хронология событий на рынке нанотехнологий

В литературе уже устанавливается простое и короткое название *нанотех* для коммерческих нанотехнологий, которым я буду пользоваться ниже для обозначения уже существующих

щих прорывных инновационных проектов. Они охватывают множество разных производств (электроника, энергетика, фармацевтическая промышленность, материаловедение), но пока в основном находятся на начальной стадии развития. В дальнейшем ситуация может сильно измениться – Национальный научный фонд США предсказывает рост общего объема нанотеха через 15 лет до 1 триллиона долларов!

Вообще говоря, в далекой перспективе использование нанотехнологий приведет к революционным изменениям практически во всех отраслях промышленности, поскольку речь идет о весьма общих возможностях управления веществом на атомарном уровне, включая неорганические, органические и даже биологические структуры и вещества. При этом само управление новыми производствами может поменять свой характер и превратиться из аналогового в цифровое.

Футуристические и фантастические прогнозы развития нанотеха приносят в сущности большую пользу, поскольку привлекают к новой науке и ее проблемам внимание молодых и самых одаренных исследователей. Ученых всегда привлекали сложные и интересные задачи, а нанотехнология представляет им прекрасный шанс проявить свои способности.

Большинство венчурных капиталистов осознает реальность нанотеха, так что основной проблемой становится правильное вложение капиталов и расчет временных сроков коммерциализации тех или иных разработок. Короче говоря, проблема сейчас состоит в выборе объемов и секторов вложения инвестиций. Учитывая разнообразие возможных приложений нанотеха, существующая ситуация означает для серьезного аналитика и инвестора решение сложнейшей задачи: «прогонку» массы вариантов через интеллектуальный фильтр экспертной и экономической оценки для выделения наиболее перспективных направлений развития рынка. Такая оценка означает непрерывный процесс сбора информации (например, постоянно возникающих бизнес-планов разнообразных производств) и ее последующей экономической, технической и чисто интуитивной оценки. Кроме того, нельзя не упомянуть два блестящих научных достижения последних лет, вызывавшие большой интерес у научной общественности и в коммерческих кругах. Я говорю о расшифровке генома человека и получении визуальных изображений на основе выходных сигналов сканирующего туннельного микроскопа (читатель наверняка видел логотип фирмы IBM, написанный отдельными атомами ксенона на кремниевой поверхности). Такие события, символизирующие прогресс так называемой диджитализации, или оцифровывания (информации) в физике и биологии, служат пропаганде научных достижений и способствуют появлению инновационных проектов.

В самое последнее время число публикаций, посвященных нанотеху, значительно возросло, напоминая о временах появления Интернета. Речь идет не только о популярных статьях, но и о научных работах, количество которых за последнее десятилетие увеличилось примерно в 10 раз. Еще поразительнее выглядит статистика по патентам, выдаваемым в области различных приложений нанотехнологий. Согласно данным Ведомства США по патентам и торговым маркам (USPTM), их число ежегодно возрастает в три раза на протяжении последних семи лет. О стремлении захватить рынки и методы производства с очевидностью и даже какой-то символичностью свидетельствует тот факт, что в упомянутой выше фирме IBM уже сейчас вопросами нанотехнологий занимается больше юристов, чем инженеров!

В связи с последними действиями в рамках Национальной нанотехнологической инициативы федеральное финансирование этих исследований продолжается и возрастает. Например, в 2004 году намеченная сумма 847 миллионов была не только предоставлена (несмотря на общие сокращения в бюджете), но и повышена. Среди статей федеральных расходов на науку нанотехнология занимает второе место (уступая только расходам на освоение космоса). Америка не одинока в своих пристрастиях: хотя расходы США на эти цели в

2003 году составили 1/3 от общемировых, Япония например, затрачивает на эти цели даже большие суммы.

Именно финансирование со стороны федерального правительства позволяет развивать инновационную деятельность в области нанотехнологий. Практически все компании, которым наша фирма оказывает юридические и консалтинговые услуги, относятся к ряду так называемых «раскручиваемых» и занимаются тем, что пытаются внедрить новейшие технологические разработки в промышленное производство. При этом они пользуются результатами исследований, полученных в высших учебных заведениях или государственных лабораториях (то есть используют передаваемую интеллектуальную собственность). Очень часто такие компании нуждаются в специальном оборудовании и дорогостоящих лабораториях для дополнительных исследований, необходимых для «подгонки» результатов к выпуску каких-то конкретных продуктов (нормальный предприниматель, конечно, не держит такое оборудование, согласно поговорке, «в углу гаража»). Ситуация с необходимостью проведения дополнительных исследований является типичной для всех так называемых стартовых (start-up) и инновационных компаний.

В общем плане сейчас есть множество корпоративных инвесторов, готовых вкладывать серьезные деньги в нанотехнологические инновационные проекты, осуществляемые стартовыми компаниями, получившими извне данные НИОКР (научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок) и начальное финансирование. Кроме того, многие крупные инвесторы выражают готовность покупать целиком новые фирмы, связанные с производством перспективных продуктов (например, совсем недавно крупный производитель чипов компания AMD захотела приобрести небольшую венчурную компанию Coatue, специализирующуюся на разработках устройств молекулярной электроники).

Сказанное вовсе не означает, что все инвестиции в этой области будут успешными, так как значительная часть стартовых компаний все-таки прогорает. От фирм-консультантов, подобных нашей, это требует непрерывного совершенствования методов анализа и оценки (образно говоря, мы должны постоянно «прочищать» фильтры, через которые «прогоняем» оцениваемые проекты). Организаторы и предприниматели всегда стараются представить свои планы в наиболее выгодном свете, и только интуиция опытного специалиста помогает выбрать правильные направления развития.

4.4.3. Проблема вертикальной интеграции стандартов и технических условий

Нанотех предлагает обширные инженерные программы, начинающиеся с низшего уровня физической основы нашего мира (с атомов и связанных с ними процессов) и заканчивающиеся реальным бизнесом. В этих условиях естественно возникает вопрос о вертикальной интеграции стандартов производства на стадиях, предшествующих выпуску коммерческого продукта для продажи. Если, например, специалист по молекулярной электронике сумел создать чип, совместимый с уже существующими динамическими оперативными запоминающими устройствами (DRAM), то ситуация выглядит весьма выигрышной. Изделие может быть «состыковано» с остальной аппаратурой, попадает на так называемую «горизонталь» стандартизации, и производитель может не беспокоиться о дальнейшей, «вертикальной» интеграции стандартов. Однако гораздо более вероятной является ситуация, когда созданное устройство (например, трехмерное запоминающее устройство) не совмещается с другим используемым оборудованием, и тогда производитель обязан ввести какой-то промежуточный блок, позволяющий использовать новое устройство в общей системе. Такая подгонка часто требует от инновационной фирмы поиска партнеров по производству, что, естественно, означает дополнительные затраты времени и денег. Внедрение в производ-

ство новой трехмерной логической схемы с повышенным числом внутренних связей будет означать не только новый дизайн и новое программное обеспечение, но и удлинение сроков коммерциализации продукта. Большинство инновационных фирм к концу разработок начинают срочно искать партнеров, способных правильно представить новый продукт на уже существующем рынке сбыта. Успех и своевременность выполнения всего проекта зависят не только от технического совершенства, но и от множества других факторов, включая правильно организованную защиту интеллектуальной собственности, удачный подбор партнеров, возможность дальнейших усовершенствований, технических сложностей (наличие требуемого оборудования и т. п.), а также признание достоинств нового товара на возможно более высоком уровне.

Так называемая временная линия развития продукта связана обратной связью с циклами научно-технических разработок. Например, слишком затянутые (по сравнению с кристаллическими аналогами) сроки испытания органических светоизлучающих диодов (LED) могут оказаться неприемлемыми для партнеров и значительно осложнят процесс коммерциализации.

4.4.4. Проблемы взаимодействия

При любых оценках возможностей инновационных проектов в области нанотехнологий следует учитывать, прежде всего, проблемы финансового обеспечения, рыночных запросов и получения прибыли в какие-то разумные сроки, например в течение 5 лет. В нанотехе существует множество разнообразных возможностей, но общая линия поведения и развития должна быть определена четко. Следует ли затягивать исследования (надеясь на получение правительственных грантов в течение 20 лет) или необходимо найти ориентированную на рынок бизнес-структуру, способную привлечь венчурный капитал? Не окажется ли поставленная задача слишком сложной и не потребуются ли для внедрения нового продукта перестраивать целые отрасли промышленности?

В качестве мысленного эксперимента представьте себе, что кто-то предлагает вам очередное нанотехнологическое «чудо», которое можно назвать молекулярной машиной (это может оказаться суперкомпьютером, микроскопической подводной лодкой для плавания по кровеносной системе или машинкой, производящей алмазные стержни). Выбор объекта не является принципиальным. Попробуйте на этих примерах разобраться со сложностью инновационных проектов.

Представьте себя венчурным капиталистом и задумайтесь над некоторыми простыми вопросами. Почему изобретатель предлагает его вам, а не занимается внедрением самостоятельно? Насколько автономными являются эти устройства? Какие источники питания необходимы для их использования? Каким образом будет осуществляться связь и управление при работе с новыми молекулярными машинами?

Именно такие вопросы взаимодействия и взаимосвязанности создаваемых объектов с окружением часто являются основными при оценке возможностей разнообразных инновационных проектов. Например, может оказаться, что для работы выбранной вами конкретной молекулярной машины необходимо наличие уже развитой системы нанотехнологической энергетики и машинной базы. В качестве поучительной аналогии попробуйте представить себе, что вам попал в руки устаревший процессор типа Intel Pentium. Каким образом, собственно говоря, вы можете использовать его на практике? Вспомните, что для подключения его к компьютеру вам необходимо проводом присоединить этот чип к более крупному проводу, который должен быть присоединен к пульту на крупных печатных платах, требующему мощного источника питания. На каждом из последовательных этапов присоединения чипа вы будете сталкиваться с проблемой поиска все более крупных по масштабу вспомога-

ных и соединительных устройств, которые давно вышли из употребления (отметим, что эти устройства изобретались в обратном хронологическом порядке). Каждый технический объект требует для своей эксплуатации наличия целой иерархической системы взаимосвязанных устройств, сочетание которых и обеспечивает не только его потенциальную важность, но и саму возможность использования.

4.4.5. Как выглядит масштабная иерархия в молекулярной нанотехнологии?

Описанная выше иерархия взаимодействий представляет собой одну из важнейших проблем в развитии любой техники. Интересно, что нанотехнология предлагает нам одновременно два пути преодоления этого препятствия, в первом из которых иерархия создается в направлении «снизу вверх» (этот подход очевидно связан с биологическими процессами), а второй – в направлении «сверху вниз» (такой подход, естественно, повторяет историю развития полупроводниковой техники). В настоящее время усиленно разрабатываются различные небιологические микро-электро-механические системы (МЭМС), позволяющие создавать крошечные устройства и «загоняющие» исследования в «спираль», или «воронку», миниатюризации, знакомую всем специалистам в области полупроводников. При таком развитии каждый этап уменьшения размеров с неизбежностью влечет следующий, вследствие чего многие эксперты считают, что нанотехнология обречена на повторение истории полупроводниковой техники.

С другой стороны, нельзя не заметить многочисленных успехов, достигнутых на пути «биологического» преобразования вещества. Создание новых лекарств, манипуляции с биологическими тканями и геновая инженерия наглядно демонстрируют огромный потенциал и возможности построения иерархии отношений в направлении «снизу вверх». Из последних достижений, полученных методикой «снизу вверх», можно особо выделить генетическую модификацию микробов, осуществляемую либо направленным генетическим сплайсингом, либо так называемой искусственной эволюцией.

4.4.5.1. Построение структур методом «сверху вниз». «Путь чипа»

О создании структур методом «сверху вниз» говорил в своей известной речи (лекция 1959 года в Калифорнийском технологическом институте, с которой многие специалисты связывают зарождение нанонауки вообще) знаменитый физик Ричард Фейнман, предложивший задуматься о последовательном процессе миниатюризации инструментов и соответственно изделий вплоть до наномасштабов. Кстати, именно по этому пути уже пошли некоторые связанные с полупроводниковой техникой компании, которые начали с создания упомянутых выше МЭМС и постепенно перешли к разработкам наноэлектромеханических систем (НЭМС).

Проектирование МЭМС уже привело к появлению заметных коммерческих продуктов, среди которых стоит отметить газонаполненные нанодатчики (используемые в автомобильной промышленности), насадки или сопла в современных струйных принтерах, некоторые новейшие медицинские устройства, фотонные переключатели в коммуникационных системах и мобильных телефонах. По прогнозам In-StatJMDR, коммерческая прибыль от использования МЭМС должна возрасти от 4,7 миллиарда долларов (2003 год) до 8,3 миллиарда в 2007 году. Прогресс в этой области сейчас сдерживается главным образом возможностями существующей полупроводниковой промышленности, а также длительностью и сложностью монтажа новых производственных линий.

Характеристики очень многих нанотехнологических изделий, уже широко используемых в различных отраслях (энергетика, полупроводниковая техника, молекулярная электро-

ника), могут быть значительно улучшены в близком будущем. Дело в том, что сейчас происходит интенсивное развитие новых технологических приемов и оборудования, специально создаваемого для нужд нанотехнологии. Из наиболее важных направлений развития в этой области необходимо выделить три.

- **Нанолитография.** В Техасском университете (город Остин) разрабатывается уникальный метод наноимпринтной литографии, который в настоящее время внедряется в серийное производство фирмой Molecular Imprint. Новая технология основана на использовании отверждаемых под действием света жидких сред и кварцевых пластин, подвергаемых травлению, что позволяют существенно снизить стоимость изделий, получаемых нанолитографией. Эта литографическая технология недавно была специально введена в известный справочник ITRS Roadmap «Дорожная карта ITRS», где отмечается, что она имеет особую ценность в нанотехнологии, производстве МЭМС, микрогидродинамике, оптике, а также молекулярной электронике.

- **Оптические ловушки.** Фирма Аггук разработала прорывную технологию в обработке наноматериалов, в которой используются известные в лазерной технике оптические ловушки. Новая технология основана на использовании одного лазерного источника, излучение которого проходит через адаптивную голограмму. Она позволяет генерировать одним лазером сотни так называемых «лазерных пинцетов», каждый из которых может иметь собственную систему управления, в результате чего установка дает возможность манипуляции молекулярными объектами в трехмерном пространстве (включая перемещение, вращение, разрезание и установку в заданном месте). Не стоит и говорить о широчайших возможностях такой технологии: от работы с клетками и «монтажа» структур из нанотрубок до непрерывной обработки материалов, напоминающей механическую. Новая методика позволяет даже управлять движением органелл внутри живой клетки без повреждения последней, включая введение ДНК в ядро клетки.

- **Метрология.** В настоящее время атомные зондовые микроскопы производства фирмы IMAGO LEAP, позволяющие получать трехмерные изображения химических соединений и атомарную структуру объектов, уже применяются в производстве чипов и дисководов. В отличие от традиционных микроскопов, дающих просто изображение микроскопического объекта, микроскопы IMAGO (которые, конечно, следует называть наноскопами) позволяют анализировать структуру, так как их «сигналы» соответствуют положению атомов в данный момент времени. Они позволяют «сжимать» наблюдаемую картину и в оцифрованном виде получать изображение изучаемого объекта со скоростью около миллиона атомов в минуту. Такой подход открывает совершенно фантастические перспективы в получении визуальных изображений и исследовании атомарных структур вообще.

Развитие технических и инструментальных методов позволяет нам уже сейчас гораздо эффективнее управлять процессами преобразования вещества на наноуровне и, соответственно, создавать новые, более ценные устройства контроля. Обобщая сказанное, основные закономерности развития нанотехнологии «сверху вниз» можно свести к двум следующим основополагающим положениям:

- Подход «сверху вниз» создает множество преимуществ и удобств из-за своего очевидного родства (или преемственности) с полупроводниковой техникой и промышленностью. Прогресс в этом случае часто выступает в виде преодоления недостатков планарной технологии, что (в сочетании с новыми возможностями) значительно облегчает коммерциализацию и проблемы рынка, поскольку позволяет пользоваться установившимися стандартами и условиями.

- Иерархия масштабов и взаимодействий при этом, естественно, определяется и устанавливается в направлении «сверху вниз».

4.4.5.2. Биологический подход, или развитие технологии «снизу вверх»

В отличие от описанного выше развития технологии «сверху вниз», архетип биологического подхода «снизу вверх» характеризуется следующим набором особенностей:

- Образование и рост структур происходит по совершенно иным механизмам (репликация, эволюция и самоорганизация) в трехмерных и жидких средах.
- Основные ограничения взаимодействий обусловлены контактом с неорганическим окружением.
- Возможности теоретического исследования процессов ограничены и сводятся к использованию зачаточных представлений о биологии систем вообще, некоторых положений теории сложности и очень упрощенных данных о процессах возникновения структур.
- Все рассматриваемые в технологиях «снизу вверх» процессы характеризуются сильным влиянием иерархии масштабов исходных элементов и заложенным в эти элементы цифровым генетическим кодом.

Последний пункт имеет особую важность для биологических и медицинских исследований, поскольку практически все процессы, обеспечивающие жизнедеятельность человеческого организма, происходят за счет иерархически выстроенных процессов передачи информации. Биологам уже известно, что внутри клеток посредством рибосом постоянно осуществляется пересылка «оцифрованных инструкций» (в виде матричной или информационной РНК, мРНК), в соответствии с которыми и происходит формирование белков из аминокислот. Эти процессы имеют очень сложный характер и осуществляются через образование последовательности так называемых конкатенатов (комплексов из топологически связанных замкнутых молекул ДНК). Сама рибосома представляет собой поразительно эффективный и надежный образец «молекулярной машины», о которой так часто говорят в нанотехнологии. Эта структура с характерными размерами около 20 нм содержит всего 99 000 атомов, и с нее начинается процесс репликации и усложнения биологических систем. В соответствии с механизмом роста происходит непрерывное считывание генетического кода, заложенного в ДНК, который по очень многим каналам обратной связи вызывает последовательное укрупнение масштабов роста, вплоть до образования макроскопических живых организмов. В настоящее время биологи, образно говоря, поступают подобно компьютерным хакерам, взламывающим коды чужих систем и использующим содержащуюся в них информацию.

Можем ли мы использовать столь сложные процессы в молекулярной электронике и нанотехнологии вообще? В чем состоит их привлекательность для ученых и технологов? Прежде всего, использование биологических процессов дает нам возможность быстро находить новые технические решения, пользуясь уже созданными природой рецептами и компонентами. Биология предоставляет нам огромный выбор самых разнообразных «заготовок» в виде молекул и субсистем, которые уже сейчас используются для совершенно иных целей. Ниже приводятся удачные примеры инженернотехнического применения биологических систем.

Например, специалистам НАСА из Центра имени Эймса удалось выделить самоорганизующиеся белки из так называемых термофильных бактерий и, подвергнув их генетической модификации, создать на их основе абсолютно новое техническое устройство. Белки были осаждены на электродах таким образом, что из них образовалась регулярная решетка, или сетка (с промежутками в 17 нм), которая оказалась очень удобной средой для магнитной записи информации в дисковых или для производства солнечных батарей.

Сотрудники Массачусетского технологического института методом искусственной, ускоренной эволюции смогли не только быстро вывести новые штаммы бактериофага M13,

но и инфицировать этими штаммами бактерии, в результате чего последние неожиданно оказались способны перерабатывать полупроводниковые материалы, изменяя их структуру с молекулярной точностью.

Крейг Вентер и Гамильтон Смит из Института альтернативной биологической энергетики (Institute for Biological Energy Alternatives, IBEA) в настоящее время осуществляют интересный проект под названием «минимальный геном» (Minimal Genome Project). Им удалось выделить из мочеполового тракта человек микроорганизм *Mycoplasma genitalium* и удалить из него 200 «бесполезных» генов, после чего в их распоряжении оказался как бы простейший организм, способный к саморепликации (заинтересовавшийся читатель может более подробно ознакомиться с этой работой по статье «Неестественный отбор» в газете «Время новостей» от 03.07.2007. *Прим. перев.*). Сейчас исследователи пытаются использовать созданный искусственный геном в технических целях, придавая ему новые функциональные способности, позволяющие, например, получать водород при фотолизе воды под воздействием солнечного света.

Основные трудности в разработках, связанных с процессами «снизу вверх», обусловлены тем, что мы плохо понимаем закономерности явлений в этих микроскопических, но очень сложных системах, и нас может утешать лишь наблюдаемое в последние годы стремительное накопление экспериментальных и теоретических данных о них. Бурное развитие нанонауки привело к тому, что за последнее десятилетие в некоторых разделах генетики и медицины было получено больше сведений, чем за всю предыдущую историю науки. Кстати, упомянутый выше проект изучения микробов с минимальным геномом имеет особую ценность для биологии, поскольку с его помощью ученые надеются понять принципиально важный для биологии в целом механизм функционирования целостной протеомы и ее метаболизма. Дело в том, что действие генетического кода человека является исключительно сложным и связано с очень запутанной системой обратных связей, вследствие чего ученые надеются разгадать некоторые его тайны, пользуясь такими простейшими организмами, построенными по принципу «один ген – один белок».

4.4.5.3. Поучительный пример – гибридная молекулярная электроника

В ближайшие годы сразу несколько фирм приступят к реализации проектов, нацеленных на объединение достоинств обоих описанных выше подходов. Речь идет о попытках практически организовать самосборку органических молекул по принципу «снизу вверх» на изготовленных методами «сверху вниз» кристаллических подложках. Заранее подготовив некоторые участки подложек для самосборки, технологи надеются получить коммерческую продукцию, большим преимуществом которой будет наличие уже сформированного рынка.

Например, фирма ZettaCore в Денвере приступает к производству молекулярных запоминающих устройств, принцип действия которых напоминает механизм усвоения энергии хлорофиллом. Фирма использует синтетические органические молекулы порфирина, которые на поверхности облучаемой кремниевой пластины способны к самоорганизации, или самосборке. При этом образуются мультипорфириновые наноструктуры, способные окисляться и восстанавливаться (теряя или присоединяя электроны соответственно). Процессы окисления-восстановления являются устойчивыми, воспроизводимыми и обратимыми, что позволяет использовать такие поверхности в качестве надежных сред записи информации в различных электронных устройствах. Более того, такая среда не только может хранить информацию достаточно долго, но и позволяет записать значительно больший объем информации, чем обычные диски, так как благодаря возможным пространственным конфигурациям каждая молекула имеет восемь разных устойчивых состояний.

В будущем технологи планируют создать на этой основе крупные трехмерные запоминающие устройства с ничтожным энергопотреблением, а сейчас им удастся только дове-

сти характеристики новых сред до стандартного уровня существующих двухмерных дисков. Наиболее интересным и перспективным для коммерциализации обстоятельством выступает тот факт, что конечный продукт, то есть производимый фирмой ZettaCore чип для запоминающих устройств, внешне ничем не отличается от существующих кремниевых чипов, так что потребитель может даже не догадываться о его сложном внутреннем «нано-устройстве». Новый чип будет обеспечивать большую плотность записи всего устройства в целом, но при этом разъемы, контакты, декодеры, усилители и т. п. будут производиться обычными методами и соответствовать всем существующим стандартам полупроводниковой техники. Лишь на последней технологической стадии поверхность кремниевых кристаллов будет «заливаться» требуемыми молекулами, которые и начнут процессы самосборки на подготовленных участках.

С точки зрения коммерциализации проект сулит безусловные и важные преимущества, поскольку новые устройства могут сразу занять свою «нишу» на рынке, так как они совместимы со всем ранее выпущенным оборудованием. Кроме того, реорганизация производства не будет очень сложной, поскольку в процесс изготовления следует добавить лишь несколько технологических операций, причем на конечных этапах. Последнее условие имеет особое значение, поскольку любое изменение технологии на ранних этапах обработки может оказывать какое-то косвенное воздействие на последующие операции (обычно такие изменения в технологии всегда сопровождаются дополнительными проверками, что, естественно, затягивает процесс внедрения).

Уже накопленный опыт фирмы ZettaCore позволяет предположить, что первых успехов в молекулярной электронике можно ожидать в производстве простых, одномерных структур (например, химических датчиков) или двухмерных самоорганизующихся структур на стандартных кремниевых подложках, таких как чипы для запоминающих устройств, решетки из датчиков, дисплеи, солнечные батареи и т. п.

4.4.6. Проблемы интеллектуальной собственности в разных моделях бизнеса

Сроки коммерциализации любого научного проекта определяются не только техническими трудностями создания конкретного продукта, но и весьма существенно зависят от его стоимости и масштабов производства. Инновационный бизнес очень часто строится на взаимоотношениях разработчика с более крупными фирмами-производителями, успешное сотрудничество с которыми может значительно ускорить продвижение нового товара на рынок. Это обстоятельство, естественно, связано с правами на интеллектуальную собственность.

Степень защиты прав на интеллектуальную собственность в нанотехнологии обычно определяется областью бизнеса, к которой относится инновация, и желаемой степенью защиты. Например, если разработчик желает серьезно защитить патентами состав предлагаемого им нового материала, он может воспользоваться системой патентования и лицензирования, уже существующей в биотехнологии. Создатели устройств молекулярной электроники, например, должны подбирать себе в качестве партнеров (для организации производства, маркетинга и продажи) крупные компании, связанные с полупроводниковой техникой, а биотехнологические лаборатории ищут связи с крупными фармакологическими компаниями (для проведения клинических испытаний, маркетинга, продажи и распространения). В каждом таком случае более крупный и влиятельный партнер несет значительные расходы на этапе подготовки производства и оформления документов (в настоящее время они обычно составляют около 100 миллионов долларов), а инновационная фирма надеется получить прибыль в виде так называемой лицензионной платы (роялти).

Легко заметить, что стоимость сделок с интеллектуальной собственностью сильно зависит от того, к какой области бизнеса относится инновация и насколько защищены в ней права на используемую интеллектуальную собственность. Например, в производстве программного обеспечения ситуация такова, что у любого разработчика очень мало шансов завязать партнерские отношения с фирмой Microsoft и получить от нее лицензионную плату. Производственное партнерство является распространенной практикой в полупроводниковой промышленности, где часто используется модель бизнеса, при которой принято разделять на части общую стоимость продукта. Обычно эта стоимость рассматривается в качестве единого параметра, складывающегося из стоимости отдельных этапов изготовления продукта: концептуализация, проектирование, производство, испытания, упаковка. Разделение стоимости по этапам обусловлено тем, что производство в полупроводниковой промышленности требует больших капитальных затрат. Эта модель иногда очень удобна для малых компаний, желающих быстро организовать производство своих товаров, однако в дальнейшем такие компании могут столкнуться с проблемами обеспечения доступа к рынку, маркетинга, распределения и продажи.

Серьезное рассмотрение проблем программного обеспечения устройств молекулярной электроники в свете рассматриваемого нами закона Мура приводит нас к необходимости анализа целой последовательности, или «лестницы», абстрактных понятий, связанных с объединением и усложнением систем вообще.

4.5. Системы, программное обеспечение и другие абстракции

В отличие от обычных чипов или интегральных схем (представляющих собой просто упорядоченный набор элементов) использование процессоров и логических схем всегда основано на сложной и многоуровневой системе связи с окружением. Разработчиков логических микросхем постоянно беспокоит не число используемых транзисторов, а проблема правильной компоновки и соединений. Некоторые компании, связанные с разработкой процессоров следующих поколений, даже выработали новый подход к усовершенствованию «кремниевых систем» с распределенными связями, при котором локализуются «защитные» программы, после чего проектировщики могут повышать качество не за счет монтажа и новых логических вентилях, а используя языки высокого уровня. Введение такой иерархии элементов (и абстрактных понятий) может значительно облегчить работу проектировщиков компьютерной техники.

Интересно рассмотреть следующую проблему, которая на первый взгляд может показаться слишком общей и расплывчатой. Дело в том, что когнитивные (познавательные) возможности человека представляются относительно ограниченными и постоянными, в то время как закон Мура как бы безоговорочно (и даже «безжалостно») диктует непрерывный рост совершенствования. Экспоненциальный рост интеллектуальной мощи человека действительно происходит, но он обеспечивается использованием все более совершенных инструментов и вычислительных устройств. Например, за последние десятилетия человеческий разум добился блестящих успехов в развитии аппаратных средств вычислительной техники. Сейчас дальнейший рост чисто технических возможностей аппаратуры усложняется, и это наводит на мысль, что следующие этапы развития интеллекта могут быть связаны лишь с развитием абстракций в области программного обеспечения (поясню, что слово «абстракция» в данном случае – возможность описания и использования сложной системы без детального знания реальной внутренней структуры). По-видимому, дальнейшее усложнение и повышение характеристик вычислительных систем будет неизбежно связано с развитием так называемых сложно-распределенных систем (иногда упоминается возмож-

ность создания «распределенного интеллекта»). Образно говоря, это означает возникновение новых идей и «вдохновения» на основе биологии.

В настоящее время ученые многих стран включились в «гонку», связанную с полным описанием генома человека и расшифровкой протеомы. Конечно, эти исследования имеют огромное значение собственно для медицины (они и начинались с поисков новых методов диагностики и лечения), однако, мне кажется, что они приведут к возникновению множества интересных идей и моделей в программировании и развитии теории сложных систем.

4.5.1. Биологическая муза нанотехнологий

Уже сейчас многие важные задачи программного обеспечения оказываются связанными с развитием и функционированием очень сложных систем, напоминающих биологические, а в некоторых случаях эти задачи имеют прямые биологические аналоги (которые, по-видимому, можно назвать биологическими метафорами). Я перечислю лишь наиболее известные из проблем и конкретных проектов, родство которых с биологией проявляется даже в названиях: «Биомиметика», «Искусственная эволюция», «Генетические алгоритмы», «А-жизнь», «Возникновение» (Emergence), Automatic Computing initiative фирмы IBM, Viral Marketing, Mesh «Сито», Hives «Пчелиные улья», Neural Network «Нейронная сеть», Subsumption architecture в робототехнике и т. п. В известном институте Санта-Фе недавно приступили к реализации исследовательского проекта с символическим названием BioComp.

Иными словами, сейчас биология вдохновляет и направляет информационные технологии (ИТ), которые, в свою очередь, способствуют бурному развитию самой биологии. Связь ИТ с биологией представляется почти очевидной. Предлагаю читателю подумать о следующей проблеме. Генетический код каждого человека представляет собой полную биологическую программу, описывающую рост и работу клеток, органов, тела и мозга. Эта программа вполне может быть записана на компакт-диске CD, причем эта запись займет меньше места, чем программа Microsoft Office. Ничего сложного в этом нет, так как речь идет о цифровой записи текста, закодированного всего четырьмя «буквами», в качестве которых выступают четыре химических основания, входящие в состав ДНК (их обозначают буквами А, В, С и D). Объем всей записи составляет 750 МВ и может быть очень сильно сжат из-за наличия в цепочке ДНК «ненужной» информации. Многие ученые убеждены в том, что основную часть генома человека занимают «отходы» эволюционного процесса, то есть большие участки ДНК не имеют практической ценности для жизнедеятельности. Это позволяет снизить объем требуемой информации до 60 МВ. Устанавливая недавно офисную программу, я вновь поразился тому, сколь малым количеством информации описывается чудо человеческой жизни. Речь идет, конечно, о биологическом организме, а исключительная сложность нашего поведения объясняется использованием в мозгу нелинейной (так называемой нечеткой) логики с множеством обратных связей через электрические, физические и химические взаимодействия.

Например, уже в мозгу человеческого зародыша закладывается первичная межнейронная «связь», основанная на существовании химических градиентов. в мозгу взрослого человека существует такое огромное количество нейронных связей, что для их записи и описания объем ДНК является просто недостаточным (мозг содержит около 100 триллионов так называемых синапсов, или каналов связи, между 60 миллиардами нейронов). Столь сложная система не может быть просто «инсталлирована» (подобно обычной программе Microsoft Office), а ее появление скорее следует описывать термином «выращивание». Рост системы происходит сначала посредством образования связей между «статическими вихрями» положительной электрохимической обратной связи, а позднее за счет усиления наиболее часто

используемых обратных связей и их непрерывного роста. Примерно к возрасту 2–3 года человеческий мозг формируется в общих чертах, образуя систему с квадрильоном синапсов.

Мозг человека давно служит образцом или целью множества исследований, посвященных искусственному интеллекту (ИИ). Исходной моделью для программистов часто выступала нейронная сеть с очень развитой (или даже полной) связью между узлами, которая затем развивается за счет усиления и развития связей, использующихся чаще. Итерационные процессы, приводящие к усилению таких соединений, заставляют систему развиваться и создают в ней новые цепочки обратных связей. Вначале развитие систем ИИ такого вида происходит по заданным правилам, однако постепенно они начинают «выходить» за рамки исходных программ, после чего часто приобретают способность осуществлять некоторые характерные для человека действия. Такие искусственные нейронные сети можно научить распознавать человеческую речь и некоторые образы, преодолевать внешние «шумы» и т. д. Очень часто, пользуясь именно таким «саморазвитием» систем, ученым удавалось решить сложные задачи, с которыми не справлялись традиционные компьютерные программы.

Закодированная в ДНК программа является исключительно мощной, поскольку в ней «спрятано» множество обратных связей, обусловленных сложными взаимодействиями между множеством генов. Например, так называемые регуляторные гены производят белки, которые способны реагировать на внешние или внутренние сигналы, регулируя активность ранее созданных белков или других генов. В результате работы этой сложнейшей биохимической «машины» возникает то, что можно назвать разветвленной системой прямого и косвенного управления.

Высокий уровень общей сложности рассматриваемых систем обрекает на неудачу многие попытки регулировать их поведение за счет очень ограниченного знания относительно побочных эффектов (это часто проявляется в тех случаях, когда исследователи изменяют лишь один ген ДНК и пытаются проследить и понять последствия этого действия). Например, недавно генетические эксперименты позволили повысить способность к запоминанию, но оказалось, что одновременно это повышает чувствительность организма к болевым ощущениям!

Продолжая аналогию, можно сказать, что наш генетический код представляет собой очень плотную сеть с множеством гиперссылок, напоминающую паутину связей в Интернете. Компьютерщики и программисты уже не раз с удивлением обнаруживали, насколько эффективным может оказаться использование непрямых указателей или так называемых рекурсивных связей. В самое последнее время биологические системы «вдохновили» исследователей на развитие эволюционного программирования, при котором создаваемые программы могут изменяться и развиваться за счет взаимной конкуренции, что весьма напоминает процессы естественного отбора при мутациях в биологии. Попытки такого рода позволяют перекинуть мостик от локальных процессов оптимизации (давно известных в математике) к общим задачам эволюции.

Нельзя забывать, что мы имеем дело с очень сложными системами и практически не имеем опыта длительного общения с искусственно эволюционирующими системами. Наши знания в этой области очень ограничены. Одним из примеров может служить появление в биологических системах нейронов, что привело к детерминистическому развитию многих важных функций живых существ. Именно с появлением нейронов биологи связывают с так называемый кембрийский взрыв в развитии биологических форм, когда за короткое время резко возросла структурная сложность организмов и на планете появилась разумная жизнь. До этого биологическая жизнь на Земле ограничивалась только существованием капель из клеток, но возникновение у них нейронов позволило быстро сформироваться значительно более сложным формам.

Последние достижения в робототехнике напоминают об архитектуре, характерной для биологической эволюции, когда полный набор правил поведения и реакций всей системы создается постепенно и по принципу «снизу вверх». Наиболее простые «рефлексы» таких роботов вырабатываются на самых ранних стадиях развития и остаются в дальнейшем неизменными, хотя вся система в целом продолжает усложняться. Субсистемы, возникающие в самом начале развития, входят затем в состав более сложных образований, выполняя более сложные функции, и т. п. В этих случаях разработчики часто не могут предсказать поведение развиваемой ими модели, поскольку ее архитектура напоминает строение нейронной цепи.

Мировую паутину (Web) можно считать первым в истории крупномасштабным экспериментом выращивания распределенной технологической системы по законам биологии. Развитие новых видов программного обеспечения и появление связанных с сетью дешевых «встроенных» систем служат косвенным доказательством того, что новые формы искусственной жизни скорее самопроизвольно возникнут в Интернете, чем в результате усилий программистов. Кстати, выше я уже использовал чисто биологическую метафору *viral* (вирулентный, вирусный) в названии одного из проектов, посвященных существующей в сети экономике.

4.5.2. Ускорители нанотехнологии. Квантовое моделирование и масштабные эксперименты

Выше говорилось о том, что научные достижения имеют тенденцию «эмигрировать» из лабораторий и превращаться в инновационные проекты, причем этот процесс протекает ускоренно, что и описывается законом Мура. Многие компании пользуются для расчета новых систем различными вычислительными приемами, но при этом следует помнить, что моделирование наномасштабных объектов и процессов связано с серьезными теоретическими проблемами. Дело в том, что неоднократно упоминавшиеся уникальные свойства наноматериалов обычно бывают связаны с квантовыми эффектами, которые до сих пор во многом остаются непонятными и загадочными. Физики почти сто лет назад вывели уравнения для квантовых систем и даже умеют аналитически решать некоторые из них. Однако эти уравнения настолько сложны, что и самые совершенные компьютеры могут пока численно моделировать поведение лишь очень простых квантовых систем, типа атома водорода. К глубокому сожалению, это означает, что в нанонауке и нанотехнологии ученые вынуждены пока пользоваться почти исключительно эмпирическими методами, то есть создавать некие нанообъекты в лабораториях, а затем классическим методом проб и ошибок выяснять свойства и характеристики этого объекта.

Разумеется, это обстоятельство весьма огорчит и разочарует многих ученых и инженеров, уже привыкших при проектировании пользоваться разнообразными компьютерными программами (подобными CAD, Computer Aided Design), позволяющими еще на стадии разработок визуализировать объекты. Ничего подобного нельзя осуществить на компьютерах с традиционной архитектурой, и моделирование нанообъектов представляет собой пока неразрешимую задачу, что имеет не только теоретическое, но и сугубо практическое значение. Дело в том, что обычно компьютерное моделирование позволяет значительно сократить время и расходы на стадии разработок нового товара, и это очень важно для любого серьезного коммерческого проекта. Серьезных инвесторов отпугивает возможность затягивания (и соответственно удорожания) стадии научно-исследовательских и конструкторских работ, что может грозить зарождающейся науке и технологии большими сложностями. Кстати, когда-то в таком положении оказалась биотехнология, но ее спасло то, что в качестве инвесторов выступали могущественные и богатые фармацевтические компании, сумевшие довести продукты до коммерциализации.

Представляется удивительным и символическим, что одно из решений проблемы компьютерного моделирования квантовой механики предлагает сама квантовая физика, подавшая идею создания совершенно нового типа вычислительных устройств (квантовых компьютеров), позволяющих фантастически повысить быстродействие и другие характеристики компьютеров. Более того, принцип действия квантового моделирования напоминает поведение естественных систем, то есть позволяет буквально обойти препятствия традиционной вычислительной техники за счет квантовых эффектов! Можно лишь надеяться, что как только такие квантовые компьютеры будут реально созданы, то именно их начнут использовать ученые для немыслимо сложных расчетов характеристик наномасштабных объектов. На этой стадии нанотехнология станет напоминать современное моделирование и проектирование авиационно-космической техники, которое уже сейчас может осуществляться виртуально, то есть без использования данных, получаемых экспериментально в аэродинамических трубах или их химических аналогах.

На первый взгляд ситуация кажется странной и необычной, но, в сущности, она является совершенно естественной. Обычные компьютеры очень удобны для расчета привычных макроскопических (то есть не квантовых) систем, например автомобилей или самолетов, а для моделирования квантовых систем мы должны придумать и создать именно квантовые компьютеры! Каждый уровень реальности должен описываться собственным языком и собственным типом компьютеров!

Одна из компаний, нацеленных на создание квантовых компьютеров, сейчас пытается заменить кремниевые технологии алюминиевыми, и очень надеется, что в 2008 году сможет сконструировать вычислительную схему размером с ноготь, превосходящую по мощности все существующие на планете компьютеры вместе взятые. Возможно, подобные устройства смогут действительно решать задачи квантовой механики и позволят нам поставить проектирование наносистем и нанообъектов на промышленную основу, что будет означать принципиально новую стадию в развитии нанотехнологий. Потенциальные возможности квантовых компьютеров представляются настолько фантастическими, что профессор Оксфордского университета Дэвид Дейч даже заявил: «Квантовые компьютеры будут способны решать задачи, на которые современным ЭВМ потребовалось бы время, превосходящее возраст Вселенной!»

Иногда утверждается, что каждый физический эксперимент может быть сведен к сложной процедуре расчета, и для подтверждения (или реализации!) этой точки зрения квантовые компьютеры совершенно необходимы расширения действия закона Мура на квантовые (нанометровые) объекты. С другой стороны, продолжаются и должны продолжаться научные эксперименты в этой области. Стоит особо отметить, что вплоть до самого последнего времени методы создания новых функциональных материалов практически не отличались от тех, которыми руководствовались ученые сотни лет назад. Создание новых материалов и сейчас в огромной степени зависит от личного мастерства и искусства ученого, обычно интуитивно угадывающего удачное сочетание компонент из немыслимого множества вариантов, а затем старательно исследующего и улучшающего полученное вещество. Неожиданные открытия в этой области обычно требуют нескольких лет изнурительного труда!

Некоторые компании (Affimetrix, Intematix и Symux) предложили новый методологический подход к решению описываемых задач, который может быть назван «массовым экспериментированием». Метод фактически означает применение в материаловедении давно используемого химиками и фармацевтами скрининга, то есть массового обследования веществ с заданной целью. Новый подход с комбинированием огромного числа компонент уже доказал свою высокую эффективность, позволяя получать новые материалы в 100 раз быстрее, чем по традиционным методам. Указанным фирмам уже удалось разработать

таким способом некоторые материалы для топливных элементов, батарей, полупроводниковой техники, светоизлучающих диодов и т. п.

Метод, который может быть по праву назван «материаловедческой комбинаторикой», обещает в будущем вытеснить все традиционные способы, поскольку он позволяет образовывать и испытывать сочетания огромного числа известных веществ. В дальнейшем, вполне возможно, речь будет идти и о полном «переборе» всех возможных сочетаний, то есть создании полной «библиотеки материалов», возможность применения которых в конкретных задачах будет изучаться параллельным массовым тестированием, типа применяемого в комбинаторной химии и фармацевтической промышленности. Автоматизированные системы смогут за короткое время «вырабатывать» ту информацию, на получение которой исследователи раньше тратили годы изнурительного труда, что, естественно, существенно ускорит научно-исследовательские и конструкторские разработки во многих областях.

4.6. Попытки прогнозирования

Завершая разговор о коммерциализации нанотехнологий, автор предлагает некоторые соображения и прогнозы развития в этой области.

4.6.1. Краткосрочная перспектива, быстрое получение прибыли

- Изготовление инструментов и некоторых новых материалов (порошки, композиты) на основе нанотехнологий. Некоторые компании организовали такие производства и уже становятся доходными.
- Производство одномерных химических и биологических датчиков, портативных медицинских и диагностических устройств.
- Начало производства микроэлектромеханических устройств (МЭМС)

4.6.2. Среднесрочная перспектива

- Начало производства двумерных нанoeлектронных устройств (запоминающие устройства, дисплеи, солнечные батареи).
- Появление иерархически структурированных наноматериалов и освоение самосборки биомолекул в нанотехнологических процессах.
- Эффективное использование наноустройств для аккумулялирования и преобразования энергии.
- Развитие методов пассивной доставки лекарств в организме и диагностики. Производство имплантируемых медицинских наноустройств.

4.6.3. Далекая перспектива

- Развитие трехмерной нанoeлектроники.
- Развитие наномедицины. Разработка искусственных хромосом.
- Использование квантовых компьютеров для расчета характеристик молекул и других нанообъектов.
- Начало массового производства нанотоваров.

Разумеется, наиболее честным прогнозом в долгосрочной перспективе стало бы заявление, что самые важные и интересные открытия еще подлежат «открытию» и таят в себе множество непредсказуемых возможностей. Вообще говоря, будучи последовательным, разумно предположить, что нанотехнологии со временем смогут достигнуть такой миниатюризации объектов, которую мы не можем себе даже представить, особенно с учетом

тенденции к «оцифровыванию» всего окружающего, в результате чего (как это ни странно звучит) неким кодом может оказаться и сама материя. Как и в случае оцифровывания музыкальных произведений, процесс изучения неожиданно может привести нас не только к высочайшей точности воспроизведения, но и к новым возможностям «перераспределения» элементов текста. Иными словами, мы сможем обращаться с веществом примерно так, как современные музыканты и композиторы обходятся с текстами любых музыкальных произведений, варьируя и перетасовывая их в любых сочетаниях (собственно говоря, это означает превращение науки в технологию).

После создания самовоспроизводящихся молекулярных машин физика (возможно, неожиданно для самих физиков) рискует быстро превратиться в одну из отраслей цифровых технологий. Основой любого производства новых устройств и материалов до сих пор всегда выступало обнаружение новых закономерностей, но новая парадигма позволит осуществлять «планирование» открытий, логику развития и оптимальное использование ресурсов почти без участия человека, что в течение нескольких десятилетий должно радикальным образом изменить подход к научному творчеству. Гибкое, быстрое, автоматизированное и предельно экономное производство любых физических объектов может изменить не только общий подход к производству, но даже и само представление о правах собственности.

Серьезнейшие грядущие перемены в процессах производства любых товаров (буквально «всего на свете») должны, конечно, как-то отразиться в социальной структуре. Когда-то автор одного из фантастических романов придумал производство стоимостью в 1 доллар за фунт «чего угодно», но реальный переход к технологическим процессам типа биологических должен привести нас к каким-то принципиальным проблемам, относящимся к основам самого существования человечества и пределам его развития.

4.7. Этические проблемы. Гены, мемы и оцифровывание

Протекающие при таком развитии событий общественные процессы вовсе не будут «гладкими» или простыми, особенно если учесть возникающие возможности изменения самой наследственности человеческих существ. Вообще говоря, до сих пор человеческая история строилась по принципу свободной «генетической беседы» и вариантах ее развития (представьте себе генетический код в качестве одного из текстов, требующих обсуждения и голосования!). Историк Лэрри Лессиг предупреждает, что мы можем вновь попасть в ситуацию, которая возникла более 200 лет назад при заключении знаменитой Декларации независимости США. Любые высказывания в пользу ограничения «свободной речи» будут восприниматься как «дурные» или неправильные, поскольку при строгом научном подходе должны быть рассмотрены все «высказывания», а истина устанавливается именно при свободном обмене идеями. Появление в жизни или на рынке искусственных хромосом (особенно с возможностью их воздействия на граждан в зрелом возрасте) приведет к ожесточенным спорам относительно прав родителей и наследственного права вообще (в качестве шутки можно только предложить, чтобы такие социальные эксперименты осуществил Китай, с его известной традицией почитания предков!).

Реальная проблема состоит в том, что подсознательно мы, люди считаем себя венцом эволюции. В любых спорах относительно искусственного интеллекта и генетического улучшения человеческой природы можно заметить глубоко укоренившийся страх перед теми стремительными переменами (буквально в течение жизни одного поколения), которые наука неожиданно предложила человечеству. Например, совершенно неясно, как должен реагировать человек на возможность существенного изменения собственной природы (проще говоря, желаете ли вы, чтобы ваши внуки значительно превосходили вас по интеллекту и

физическому развитию?). В этой ситуации мы стоим перед непростым выбором между собственным эгоизмом и вечной мечтой человечества о хотя бы символическом бессмертии.

4.8. Заключение

Предсказания будущего трудны и становятся все труднее по мере ускорения развития науки. Можно считать, что именно нанотехнология является следующей великой «волной» в этом процессе, подтверждающей общность и величие закона Мура. Нанотехнологические инновационные разработки обещают возникновение множества прорывных бизнес-проектов, которые могут «взорвать» социальное равновесие и одновременно позволят нам «свести» вещество к какому-то коду, поддающемуся нашему воздействию и изменению. В близком будущем человечеству придется, по-видимому, пережить период бурного, экспоненциального роста новых технологий, связанного со слиянием целого ряда традиционных наук (особенно биологии, информатики и т. д.) и их взаимным обогащением и «перекрестным опылением».

Специалисты фирмы DFJ, которую я представляю, считают наше время наиболее подходящим периодом для инвестиций в инновационные компании (старт-апы). Эволюционный «взрыв» в далекой кембрийской эре породил множество новых форм жизни. Тогда каким-то организмам пришлось исчезнуть, но возникшие при «взрыве» виды смогли преобразовать окружающий их мир.

Глава 5

Инвестиции в нанотехнологию

Объем и направления развития нанотехнологий в будущем определяются теми инвестициями, которые вкладываются в них сейчас. Вложения в нанотехнологии осуществляются главным образом посредством заключения партнерских соглашений и лицензирования, а не создания новых компаний, нацеленных на безудержный рост. Венчурным капиталистам (ВК) можно смело рекомендовать вкладывать капиталы даже в тех случаях, когда направления развития новых технологий очень слабо связаны с привычной областью деятельности. Венчурными вложениями занимаются капиталисты, склонные рискнуть не очень большими деньгами в надежде на значительную прибыль в будущем. В этой главе рассматриваются некоторые проблемы финансирования нанотехнологических разработок венчурными фирмами и государственными организациями.

5.1. Инвестирование венчурного капитала

Даниэл В. Лефф

Долгие годы Даниэл В. Лефф был старшим компаньоном известной юридической фирмы Sevin Rosen Funds (Даллас, штат Техас), занимаясь проблемами финансирования организаций и производств, связанных с полупроводниковой промышленностью. Затем он перешел на работу в коммерческую группу Harris&Harris Group, где координировал финансовую деятельность многих известных инновационных фирм, включая Nanomix, InnovaLight, Sana Security и D2Audio.

Д. В. Лефф защитил докторскую диссертацию в отделении химии и биохимии в Калифорнийском университете Лос-Анджелеса (UCLA) под руководством профессора Джеймса Р. Хита (кстати, лауреата 2000 года премии Фейнмана в области нанотехнологий). Он является автором многих научных публикаций и двух патентов в этой области, а также входит в состав консультативных советов двух влиятельных инновационных организаций (NanoBusiness Alliance и California NanoSystems Institute, CNCI).

Обычно венчурный капитал вкладывается в начинающие, необеспеченные фирмы, единственным преимуществом которых является интересная научно-техническая разработка или идея, позволяющая надеяться на развертывание широкого производства и получение серьезных прибылей. В последние годы именно венчурный капитал был и остается важнейшим источником финансирования новых компаний, связанных с высокими технологиями (так называемых старт-апов). При этом венчурные капиталисты выступают в качестве агентов, находящих финансовые ресурсы для разработок и продвигающих новые товары на рынок, в обмен на оговоренное участие в собственности и будущих доходах. При этом они надеются добиться успеха за несколько лет (обычно за период от 4 до 7 лет), обеспечив в дальнейшем прибыльность 30–50 % в год от исходных вложений. Как показывает опыт, за указанный промежуток времени инновационные фирмы либо добиваются заметного начального успеха, либо разоряются, сливаются с другими и т. д.

Конечно, для венчурных капиталистов представляет интерес лишь небольшая часть высокотехнологических стартовых компаний, что особенно важно для нанотехнологий, поскольку коммерциализация нанонауки вообще только начинается. Принимая решение

об инвестициях в стартовые компании, ВК-инвесторы обычно оценивают ситуацию на основе пяти следующих требований: (1) наличие инновационной или прорывной научно-технической идеи (с достаточно хорошо защищенными правами на интеллектуальную собственность), обещающей в будущем появление конкурентоспособного продукта; (2) существование обширного и быстро растущего рынка; (3) возможность быстрой (1–3 года) организации коммерческого выпуска каких-то новых продуктов; (4) наличие слаженной и опытной команды менеджеров и (5) возможность быстрого нахождения рынка сбыта и стратегических партнеров по бизнесу на основе разумных прогнозов высокой прибыльности.

Разумеется, большинство стартовых инновационных компаний не может обладать всеми этими достоинствами, или (что еще более вероятно) такие оценки провести невозможно. В реальной жизни стартовые компании обычно начинают существование без достаточного финансирования, с неполной командой менеджеров, без заказчиков и стратегических партнеров по бизнесу и т. д. Все эти недостатки часто с лихвой искупаются только тем, что во главе стартапов стоят пассионарные и воодушевленные руководители, верящие в успех, способные организовать разработки и объединяющие сотрудников в единую группу.

5.1.1. Вложение венчурных капиталов в нанотехнологии

Представляется очевидным, что нанотехнологии относятся не к отдельному, сектору рынка, а скорее представляют собой целый набор уже существующих (и бурно развивающихся) новых технологий, способных внести весьма существенные изменения практически во все высокотехнологические отрасли промышленности. Уже сейчас отчетливо прослеживаются огромные возможности применения новой науки в телекоммуникационной технике, биотехнологиях, микроэлектронике, текстильной промышленности и энергетике. Многие инвесторы, кстати, вкладывая деньги в нанотехнологии, исходят исключительно из уникальных возможностей и свойств новых товаров, материалов и процессов. Разумеется, о проблемах нанотехнологий не задумываются и покупатели новых товаров и услуг, которых привлекают лишь преимущества новых товаров по стоимости либо свойствам (или по обоим параметрам).

Применение нанотехнологии для производства новых товаров связано либо со свойствами получаемых нанотехнологией материалов, либо с процессами их обработки на нанометрическом уровне. Следует сразу отметить, что наноматериалы в некоторых случаях действительно обладают множеством уникальных характеристик (включая оптические, электронные, магнитные, физические и химические), что само по себе создает чрезвычайно интересные возможности для их использования и комбинирования с уже существующими технологиями. Неожиданно выяснилось, что фундаментальные свойства и характеристики веществ можно варьировать в широких пределах, изменяя не их химический состав (обычный путь технологов и материаловедов), а физические масштабы элементов системы.

5.1.2. Нанотехнологические инновационные фирмы

По-видимому, в отличие от бурного и непредсказуемого развития Интернет-компаний в 90-е годы прошлого века, рост нанотехнологических инновационных фирм не будет нарушать фундаментальные законы бизнеса, то есть может быть охарактеризован стандартными представлениями промышленной и деловой активности. Другими словами, развитие нанотехнологий может быть связано, как всегда в бизнесе, с возможностью личного выбора, привычной стратегией торговых операций, стремлением к расширению производства, эффективным распределением капиталов, маркетингом обычного типа и другими параметрами, описывающими развитие новых отраслей производства и бизнеса.

С другой стороны, общее сходство инновационных компаний в области нанотехнологий проявляется в наличии некой научно-технической платформы и команды высокопрофессиональных ученых. Чаще всего такая команда не имеет формального бизнес-плана, сведений о рыночной конъюнктуре, продуманной стратегии выпуска товаров и даже состава менеджеров. Еще одной важной особенностью таких групп часто является их связь с крупными учеными и ведущими научными центрами. Иногда проблема развития сводится к тому, что такие группы и их руководители пользовались ранее лишь грантами на научные исследования, и испытывают затруднения, когда приходится переходить от лабораторных разработок к проектированию и набирать дополнительный персонал из других областей науки и техники или взаимодействовать с другими инновационными компаниями.

Естественно, что почти всегда такие группы состоят из классных специалистов (химиков, физиков, биологов, электронщиков и материаловедов), связанных с междисциплинарными исследованиями (это обстоятельство характерно практически для всех наноразработок, требующих высокого профессионализма). Обычно инновационные компании в области нанотехнологий начинают с поиска более крупных и финансово обеспеченных партнеров, надеясь получить от них не только техническую и инвестиционную поддержку, но и некоторый доступ к уже существующим каналам сбыта и распределения планируемых к коммерческому производству товаров и услуг.

С точки зрения коммерциализации инновационные фирмы (старт-апы) в области нанотехнологий удобно с самого начала разделить на шесть больших групп, в соответствии с областью научных интересов и приложений (наноматериалы и их обработка, нанобиотехнологии, нанопроекты в области программного обеспечения, нанофотоника, наноэлектроника и инструментальная база нанотехнологии). Особый интерес для коммерциализации представляет первая из упомянутых категорий, поскольку многие компании, связанные с наноматериаловедением, уже выпускают множество материалов. Такие фирмы часто пытаются одновременно расширить производство и развить методы обработки или применения новых материалов исходя из их необычных свойств и возможностей, поскольку новые материалы действительно значительно превосходят существующие по важнейшим характеристикам (прочность, сопротивление нагрузкам и «царапанью», высокие коэффициенты электро- и теплопроводности, износостойкость и т. д.). Многие из таких материалов уже выпускаются коммерчески, вследствие чего большинство инновационных фирм в области нанотехнологий связано именно с материаловедением, хотя можно отметить, что по объему инвестиций сейчас лидируют фирмы, занятые наноэлектроникой, нанофотоникой и оборудованием для исследований в области нанонауки.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.