

Все достижения физики твердого тела — только промежуточный этап на пути к нанотехнологиям

НАСТОЯЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ – ЭТО ИСКУССТВЕННАЯ ЖИЗНЬ



Действительно ли мы живем в эпоху нанотехнологической революции? Еще несколько лет назад о нанотехнологиях мало кто слышал. Сейчас о них с энтузиазмом говорят высокопоставленные чиновники и руководители предприятий электронной отрасли, на представительных и отнюдь не узкоспециальных конференциях всерьез обсуждают возможность «догнать и перегнать Америку» за счет внедрения в производство результатов нанотехнологических исследований, научная элита использует нанотехнологическую программу как один из решающих аргументов в своей борьбе с правительством за сохранение и упрочение позиций РАН, а в Интернете расторопные продавцы предлагают «напольные покрытия и другие товары для дома, созданные с использованием нанотехнологий». В этом потоке сенсационной информации совершенно теряются скучные сообщения о реальных результатах научных исследований и о серьезных теоретических проблемах, которые еще ждут своего решения. Принимая во внимание то значение, которое «нанотехнологическая революция» может иметь для будущего микроэлектроники, редакция журнала «Вестник электроники» решила обратиться за разъяснениями непосредственно к ученым, внесшим заметный вклад в развитие этой области исследований. Сегодня на наши вопросы отвечает профессор Святослав Габуда, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник Института неорганической химии Сибирского отделения РАН, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники.

– Говоря о нанотехнологиях, обычно подразумевают перспективы практического использования ряда открытий в области физики твердого тела, в том числе в теории полупроводников. Был момент, когда решение этой задачи ожидалось буквально «со дня на день», а производители микроэлектроники уже готовились разделить печальную участь Olivetti и других производителей механических и электромеханических пишущих машинок, с появлением ПК либо исчезнувших, либо радикально изменивших свой бизнес. Но сейчас аналитики стали гораздо осторожнее в своих прогнозах: признается наличие многих трудноразрешимых проблем, и конкретные сроки теперь предпочитают не называть. В то же время исследования по нанотехнологиям уже явно не укладываются в традиционные, более или менее четко обозначенные дисциплинарные границы... Что же, собственно, происходит?

– Без особого преувеличения можно полагать, что вторая половина XX века прошла под знаком полупроводникового транзистора, изобретенного в 1947 г. Бардином, Шокли и Браттейном. На бытовом уровне, все начиналось с карманного радиоприемника 1950-х годов «на семи транзисторах». В микропроцессоре Intel нынешнего ноутбука содержится уже более 100 млн транзисторов. Они размещены на площадке в два-три квадратных сантиметра, и нетрудно сосчитать, что размер одного транзистора здесь чуть больше одной миллионной метра, или микрона (мкм). Технология изготовления подобных микропроцессоров основана на фотографическом перенесении рисунка на кремниевое основание с помощью уменьшающей оптической системы. Используемые при этом световые волны имеют длину от 0,3 (синий цвет) до 0,6 мкм (красный цвет), поэтому проблематично «нарисовать» линии (элементы транзистора) тоньше 1 мкм. Камнем преткновения полупроводни-

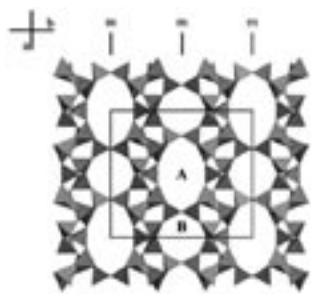
ковой микроэлектроники стало то, что нельзя использовать более короткие длины волн (рентгеновского диапазона), поскольку те не поддаются фокусировке. Большинство специалистов сходятся во мнении, что микронный размер – это предел миниатюризации деталей в существующих технологиях, а для дальнейшего прогресса потребуются принципиальные изменения, основанные на новых физических эффектах.

Оптимизм внушает тот факт, что в реально существующих биосистемах размер элементов памяти составляет около нанометра (нм) – одной тысячной микрона. Воображаемая технология управляемого изготовления устройств с подобной «биологической» плотностью укладки элементов памяти (порядка одного на нанометр, или миллиард элементов на сантиметр) могла бы называться «нанотехнологией», в отличие от процессов жизнедеятельности, где репликация столь плотно упакованной информации на носителях памяти в форме ДНК и РНК протекает спонтанно. В то же время, наивно относить к нанотехнологиям обыденное производство малых, или наночастиц в составе аэрозолей – различных дымов и пыли, и даже катализаторов, если в их функции не входит репликация (темплитирование) носителей информации, или ее запись.

Термин «нанотехнологии» вошел в широкое обращение с легкой руки science-writer'a (научного журналиста) Эрика Дрекслера, который представил открытие новых модификаций углерода – наносферической (фуллерены, 1985 г.) и нанотрубочной (1992 г.) в качестве свидетельств наступления нового этапа научно-технической революции, названного им «четвертой волной» (под «третьей волной» подразумевалось становление микроэлектроники). В ставших бестселлерами книгах «Машины творения» (E. Drexler. Engines of Creation: Fourth Estate. London, 1990) и «Наносистемы» (E. Drexler. Nanosystems: Molecular machine-

ry, manufacturing and computing. Wiley – N.Y., 1992) предрекалось, что уже через 15-20 лет (то есть в наши дни!) наука преодолеет фундаментальные трудности, связанные с пределами миниатюризации электронных устройств. И тогда появятся интеллектуальные роботы размером с амёбу, которые по команде будут копировать самих себя, извлекать из окружающей среды необходимые элементы и «выращивать на дому» жилые помещения, фурнитуру, транспортные средства, и даже производить «ремонт» нашего организма, путешествуя по кровяному руслу.

Итогом подобной супероптимистичной оценки успешности научного прогресса, производившей сильное впечатление на непосвященных, стало резкое увеличение рейтинга межнаучных еженедельников типа Nature и Science, рассчитанных на широкую аудиторию. Подкупало то, что в этих журналах публиковались «комментарии», дававшие самую лестную характеристику иногда очень даже сомнительным научным сообщениям, тщательно отобранным редакцией из сотен заявок на публикацию. Внимание общественности привлекали научные конференции по «нанотехнологиям» и проблемам создания «небиологической», или искусственной, жизни, их труды также пользовались повышенным спросом – например, «Искусственная жизнь» (Artificial Life. Laughton C. G., ed. Wesley – Redwood, CA, 1989). Надо ли удивляться, что нанотехнологии стали предметом внимания правительства как «проблема стратегического значения»? Вспоминаю курьезный случай 15-летней давности с заявкой на доклад на конференцию по проблемам нанотехнологий, которая должна была состояться в Калифорнии. Заявку приняли – особенно приятно, что с устным докладом и с обещанием оплаты всех расходов. Мой соавтор Эм Баскин, в то время сотрудник Института физики полупроводников СО РАН (теперь сотрудник Техниона в Хайфе, Израиль) в назначенный срок отпра-



● Рис. 1. Наноканалы. Проекция структуры цеолита клиноптилолита, типичного минерала вулканических туфов Сибири. Тетраэдры – чередующиеся группировки AlO_4 и SiO_4 . Канал А имеет сечение $0,6 \times 0,4$ нм; канал В – $0,4 \times 0,4$ нм; еще два семейства каналов ориентированы вдоль осей X и Y (в плоскости чертежа). В природных условиях каналы могут быть заполнены водой, аммиаком (в небольших количествах) и взаимозаменяемыми ионами Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , и др. Символом π обозначены плоскости совершенной спайности



● Рис. 2. Электронная микрофотография кристаллов клиноптилолита (крупные пластины) в смеси с тонкими вкраплениями сопутствующих минералов

вился в Москву за американской визой, но – сюрприз! – посольство США ему отказало на том основании, что данная область знаний (нанотехнологии) находится под жестким контролем Госдепартамента. Оказалось, что для участия в подобной конференции надо было подавать заявку за месяц! В других случаях – на конференции по проблемам элементарных частиц, по ракетным делам и т. д. – визы выдавались в течение одного-двух дней.

Трудно было вообразить, что весь этот бум закончится классической «панамой», аферой вроде нашего дефолта. Страсти вокруг нанотехнологий достигли апогея, когда в 1998–2001 гг. в журналах Nature и Science появился ряд сенсационных публикаций, сообщающих о создании «нанотранзистора» на базе одной молекулы (фуллерена). Это было похоже на воплощение радужных прогнозов. Стоимость акций научных компаний «зашкаливала», а основного автора публикаций – 30-летнего Яна Гендрика Шона, сотрудника лабораторий Bell, – прочили в Нобелевские лауреаты ближайшего года. Все было бы прекрасно, если бы не придрчивость научной общественности. Оказалось, что данные десятков публикаций Шона не подтвержда-

ются, а детальный анализ 16 из 24 сообщений об «одномолекулярном транзисторе» выявил «фальсификацию, или подделку». Итог: Шона уволили, а в отношении его соавтора и научного руководителя, профессора Бертрама Батлогга, был печатно употреблен термин buck («козел») [G. Brumfiel, Nature 419, 419–421 (2002)]. Ради спасения «чести мундира» корпорация Bell проинформировала общественность, что у них ежегодно патентуется около 7 тысяч изобретений, и только одно оказалось «гнилым». Тем не менее, финансовые потери были велики, и эта «чайная ложечка дегтя» оказалась весьма неприятной, ведь следствием скандала оказалось резкое падение курсов акций ключевых научных компаний; но вопрос о потерях вкладчиков не мог даже обсуждаться, ведь покупка акций – это был свободный выбор на основе имевшейся тогда «непредвзятой» информации.

– **Все это очень печально, но следует ли отсюда, что вообще вся программа исследования свойств «атомных кластеров», в рамках которой как раз и велись эксперименты с фуллеренами, оказалась научно несостоятельной?**

– Ни в коем случае! Сама «раскрутка» группировки Шона стала воз-

можной благодаря потоку новых научных результатов, связанных с поисками других подходов к проблемам нанотехнологий, в том числе основанных на использовании модификаций углерода. Выходка Шона на этом фоне – это не более, чем калька с не менее славного автопрогона О. Бендера «по бездорожью и разгильдяйству», правда на более масштабном уровне.

Побочным результатом ажиотажа вокруг новых модификаций углерода и нанотрубчатого состояния оказалось создание нового научного направления, связанного с проблемами изучения свойств веществ внутри нанотрубок, так называемых «наножидкостей». Одним из интригующих вопросов здесь является возможность замены электронных токов потоками наножидкостей в логических элементах на базе нанотруб. Это отдаленно напоминает известную в науке «пневмонику», в которой вместо электронных токов использовались потоки воздуха в схемах, составленных из трубочек и вентиля-переключателей. Между прочим, в природе встречаются так называемые нанопористые кристаллы каркасных алюмосиликатов (цеолитов), пронизанные трехмерной сетью «каналов» сечением порядка нанометра (см. рис. 1–4).

К настоящему времени разработаны методы получения их синтетических аналогов. В связи с интенсификацией потока исследований свойств наожидкостей и работ по поиску методов управления движением вещества в наноканалах издательство Springer начало выпуск нового международного журнала Microfluidics&Nanofluidics. Мы также не остаемся в стороне – за цикл работ, включавших разработку фундаментальных подходов к исследованию свойств наноожидкостей автору данных строк была присуждена Государственная премия РФ. К сожалению, полученные в 1997 г. миллионы «съел» достопамятный дефолт...

– **У сторонников «полупроводниковых» подходов к нанотехнологиям есть и другие идеи – такие, как «квантовые точки», «квантовые ямы»...**

– Конечно есть, это передний край современной физики полупроводников. На данном направлении сосредоточены огромные усилия, эти усилия оправданы достижениями современной полупроводниковой микроэлектроники. Но сама идея о «полупроводниковом» механизме сложнейших явлений в живых организмах (и о возможности искусственного воспроизведения подобных явлений с использованием полупроводников) – отнюдь не нова. Ее высказал биохимик Альберт Сент-Дьердьи в своей книге «Биоэнергетика» (1957, рус. пер. 1960). Жирную точку на этой идее поставил один из крупнейших физиков XX века Виталий Лазаревич Гинзбург, в 1960 г. подвергший подходы Сент-Дьердьи обоснованной критике. Современные «реаниматоры» полупроводниковой идеи жизнедеятельности стараются об этом эпизоде истории не вспоминать, а зря.

– **Святослав Петрович, нашим читателям важно знать, что произойдет с микроэлектроникой в обозримом будущем. Вы готовы сказать им прямо: никакой «четвертой волны» не будет?**

– Ситуация с «четвертой волной» напоминает историю со строи-



● **Рис. 3. Группа монокристаллов томсонита, относящегося к цеолитам семейства натролита**

тельством Панамского канала. Ни у кого не было сомнения, что Панамский перешеек можно перекопать. Но «на месте» оказались джунгли и болота, нещадные москиты, змеи и крокодилы. Были и мошенники, организовывавшие акционерные общества «по строительству Панамского канала», которые собирали деньги и исчезали. Оказалось, что проще было профинансировать Стефенсона с его первым в мире паровозом и построить Тихоокеанскую железную дорогу. А потом уже, с новыми силами, спустя полвека прорыли канал. Возможно, что как раз «квантовые точки» микроэлектроники и окажутся столь же важным промежуточным этапом на пути к нанотехнологиям «четвертой волны». Но не более того. По существу, у микроэлектроники есть очевидные ограничения, или пределы миниатюризации. Технически возможно изготовить транзистор в два раза меньшего размера по сравнению с транзисторами в процессорах Intel, это продемонстрировали ученые компании IBM. Но такой транзистор отказывается устойчиво работать, он включается и выключается спонтанно, когда «сам того пожелает». Это происходит из-за влияния квантовых флуктуаций, роль которых становится доминирующей на расстояниях порядка нанометра и менее. Ведь электрон – это элементарная частица, обладающая волновыми свойствами. Представьте, что мы попытаемся что-то написать на поверхности воды. Ничего не получится: волны и колебания поверхности тут же сотрут ваши письма. Так и наноустройства – от них не



● **Рис. 4. Отполированный образец цеолитового туфа. Состав: цеолиты семейства натролита**

удается добиться стабильности, необходимой для работы технических систем. И дело тут не в несовершенстве самих устройств, а в свойствах физического мира, который подчиняется собственным законам.

С другой стороны, наука уже достаточно разобралась в устройстве живой материи, чтобы понять, что там фундаментальные запреты квантовой механики каким-то образом преодолеваются. Ведь явления жизни, такие, как считывание информации и аутокопирование ДНК, основаны на атомных процессах, протекающих на наноуровне. И не кто-нибудь, а сам Евгений Вигнер, один из основателей квантовой механики и Нобелевский лауреат, доказал теорему, согласно которой квантово-механическая вероятность аутокопирования ДНК равна нулю! Может быть, биомолекулы принципиально отличаются от прочей материи, и законы физики на них не распространяются? Это вдохновляет сторонников божественного происхождения жизни, но ученые никогда не согласятся с таким положением, равносильным окрику «Не вашего ума дело!»

– **Прежде чем переходить к биоструктурам и их свойствам, давайте закончим с «традиционными» нанотехнологиями. Электроны подчиняются принципу неопределенности, но ведь существует и концепция оптического транзистора, где в качестве носителей используются фотоны. Разве создание оптического транзистора не будет преодолением того самого «предела миниатюризации»?**

– Оптические фотоны характеризуются длиной волны от 300 до 600 нм, что ближе к микронному размеру. Идеальное устройство для регистрации фотонов – это наш глаз. Отдельные элементы сетчатки – палочки и колбочки – регистрируют даже отдельные фотоны, и в определенном смысле исполняют функции оптического транзистора. Но надо заметить, что один фотон может возбудить только одну светочувствительную молекулу (родопсина), а в палочке таких молекул – миллиард. Поэтому сама палочка представляет собой устройство, в котором протекает сложный процесс усиления исходного импульса, и ее размер – порядка микрометра, ведь палочки и колбочки хорошо видны в микроскоп. Иными словами, живая природа использовала эти элементы только в форме «периферийного устройства», как мы используем клавиатуру компьютера.

Парадокс в том, что, по-видимому, наносистему можно изготовить только с помощью темплатирования, или репликации с использованием другой наносистемы. Это примерно как у ювелиров: алмаз самый твердый в природе материал, поэтому для получения бриллианта (правильно ограненного алмаза) его приходится шлифовать другим алмазом.

– Допустим, вопреки распространённым сегодня представлениям, никакие успехи физики полупроводников (и твердого тела) сами по себе не могут привести нас к подлинным нанотехнологиям. Чем же в таком случае может помочь исследование живой материи?

– Важнейший шаг был сделан математиком Дж. Фон-Нейманом, который детально показал, что так называемая линейность взаимодействий и связей в сложных системах неизбежно влечет за собой их неспособность к самокопированию и самовоспроизведению. Иными словами, секрет аутокопирования ДНК (и нанотехнологий будущего) состоит в нелинейном характере каких-то взаимодействий, кото-

рые, в конечном итоге, могут быть учтены современными методами квантовой механики больших молекул (квантовой химии). Под «нелинейностью» подразумевают, что реакция на воздействие не пропорциональна самому воздействию. Подобное нарушение пропорциональности было найдено в работах нашей группы при исследовании взаимодействий электронов и ядер в молекулярных системах. В рамках довольно грубого приближения теории движения частицы в быстропеременных полях (описанной в курсе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица) оказалось возможным учесть влияние быстрых электронных флуктуаций на относительно более медленные движения ядер водорода. Наша публикация на эту тему (совместно с сотрудниками Национальной лаборатории сверхсильных полей в Таллахасси, Флорида, США) вышла в международном журнале Solid State Communication.

– Каково практическое значение этой работы, и выходит ли оно за пределы молекулярной биологии?

– Прежде всего, проясняются тонкости механизма ауторепликации ДНК. Молекула ДНК представляет собой двойную спираль, и ее две «нитки» связаны водородными связями. При репликации эти связи должны сначала «порваться» (или выключиться), и вместо одной двойной спирали получаются две одностранные молекулы. Далее водородные связи должны включиться вновь, чтобы образовались две новые двойные спирали в двух новых клетках. Это и есть мейоз – основа жизни. Но физический механизм включения и выключения водородных связей оставался непонятен. В результате нашей работы выяснилось, что этот механизм может базироваться на некоторой корреляции движения электронов и протонов, которая в свою очередь связана с изменениями кислотности среды. Однако сейчас уже ясно, что механизм репликации, основанный на включении-выключении водородных связей, не является уникальной особеннос-

тью живых систем и ДНК. Недавно опубликованы данные ряда оригинальных исследований химиков из Оксфорда (A.G. Cairns-Smith. Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life. Cambridge University Press, 1984), которые обратили внимание на способность к самокопированию глинистых минералов (типа монтмориллонита), для которых характерен химически индивидуальный рисунок структуры поверхности нанослоев. При увеличении влажности миниатюрные кристаллы растут за счет образования водородных связей между слоями, а при высыхании расщепляются на абсолютно идентичные по индивидуальному рисунку пластинки. Каждая из таких пластинок может стать зародышем нового кристалла с тем же рисунком поверхности. Таким образом, просматривается механизм аутокопирования, отдаленно напоминающий процесс редупликации двойной спирали ДНК и тоже связанный с включением-выключением водородных связей.

– Итак, все не столь уж безнадёжно?

– Большую роль играет начальная установка, и если она выбрана (или угадана) правильно, то мы обязательно выйдем на решение имеющихся фундаментальных проблем. Классическая квантовая химия исходит из так называемого приближения Борна-Оппенгеймера, в соответствии с которым полагают, что движения электронов и ядер независимы друг от друга. В большинстве случаев это хорошее приближение, но в некоторых случаях, таких, как эффект Яна-Теллера, и, как оказалось, разрыв водородных связей – оно не работает, и приходится рассматривать корреляцию движения электронов и ядер. Заметим, что теория полупроводников и квантовая теория твердого тела также пользуются приближением Борна-Оппенгеймера. Это приближение хорошо поработало в микроэлектронике, но похоже, что на наноуровне оно уже неэффективно, что и привело к кажущейся неразрешимости проблем нанотехнологий.

– Если я вас правильно понял, перестав жестко связывать понятие нанотехнологий только с теорией полупроводников, прежде всего с исследованием полупроводниковых гетероструктур, и обратившись к таким областям, как изучение пористых кристаллов, редупликации ДНК, можно будет придать концепции нанотехнологий «второе дыхание». Значит, мы все-таки увидим когда-нибудь пресловутый «квантовый компьютер» в действии?

– И да, и нет. «Да» – это не только второе дыхание, но и возвращение к первоначальной установке идеологов «четвертой волны» на преодоление нерешенных химических проблем, которые по определению должны привести к конвергенции (объединению) биологических и физико-технологических подходов. «Нет» – относится к модному словосочетанию «квантовый компьютер». Это не более чем очередная химера и ловушка для акционеров. Компьютер не может быть квантовым по той простой причине, что обычные состояния 0 и 1 логических элементов в квантовом варианте могут существовать (в «чистом» виде) только в отсутствие каких-либо воздействий. При первой же верификации эти состояния перестают быть чистыми иными словами, они становятся смесями исходных состояний 0 и 1. А надо иметь в виду, что верификация состояний логических элементов осуществляется с тактовой частотой компьютера порядка миллиарда раз в секунду, поэтому любая информация в таком компьютере ни сохраняться, ни обрабатываться не может.

Реально, при поглощении одного фотона в молекуле зрительного пигмента родопсина электрон переходит в возбужденное состояние. Но и это состояние не является строго определенным квантовым состоянием, поскольку при возбуждении молекула изменяет конформацию, что влечет за собой изменение свойств среды и возникновение импульса в нервном окончании. Таким образом, движение электрона оказывается связанными

с перемещениями ядер (в тысячи раз более тяжелых, чем электроны), в итоге вместо квантового компьютера приходится говорить о существенно более сложном (но реалистичном) квантово-химическом варианте подобного гипотетического устройства.

– Уже почти полгода обсуждается российская национальная программа исследований по нанотехнологиям, разработанная под руководством Жореса Алфéroва. В ней предусмотрены бюджетное финансирование, налоговые и другие льготы для задействованных в программе научных организаций, привлечение частных инвесторов... Этого достаточно, чтобы Россия не «прозевала» очередную научную революцию?

– Национальная программа – вещь замечательная, но в программе Алфéroва мне показалось не совсем правомочным упоминание в качестве примера Манхэттенского проекта. Там задачей была практическая реализация атомной бомбы, а до этого был большой этап фундаментальных поисков, которые проходили на базе Чикагского университета. С нанотехнологиями мы находимся скорее на этом этапе, и деньги сейчас нужны не на «бомбу», а на фундаментальные исследования. Кроме того, для успеха дела в нынешних условиях необходима определенная перестройка системы управления и финансирования науки. Существующая организация российской науки сложилась в советский период, в условиях жесткого контроля со стороны партийных органов и госбезопасности, и хорошо известен уровень ответственности научных работников во времена Берии. В современных условиях почти нет ни контроля, ни ответственности. В этом сейчас убедился известный российский олигарх, который имел неосторожность выделить РАН \$ 33 млн на исследования в области водородной энергетики. В результате он получил отчет на двух страницах (фигурально выражаясь), разъярился и теперь пытается с помощью ревизоров выяснить, куда ушли его миллионы. Результат

расследования можно предугадать: деньги поглотила бесчисленная орда чиновников от науки, которые не хотят, да и не умеют организовать работу ученых в новых экономических условиях. Сейчас идет много разговоров о реформе науки. Либеральное крыло правительства предлагает, в сущности, приватизацию НИИ, но боюсь, в результате с наукой произойдет то же, что произошло с российской промышленностью.

По моему убеждению, науке в первую очередь нужны дебюрократизация и ясная система оценки научного труда. После Второй мировой войны такую реорганизацию провели в Германской (Кайзеровской) академии наук, очень похожей на нынешнюю РАН. Она превратилась в сеть небольших дееспособных институтов имени Макса Планка, которые совершили небывалый научный рывок: за период с шестидесятых по девяностые годы XX века немецкие ученые удостоились 30 Нобелевских премий. Науку Восточной Германии в девяностые годы тоже «перелопатили» – существенно сократили и передали фундаментальные исследования в университеты. При этом наука и высшее образование остаются государственными. Разработаны понятные критерии оценки качества интеллектуального труда: научный сотрудник должен публиковаться в рейтинговых журналах и отчитываться за гранты, университетский профессор – иметь на своем курсе определенное число студентов (которые, прошу отметить, записываются на курс добровольно). У нас же ученый – это человек, защитивший диссертацию. С высоты своей учености он говорит: «Вы мне дайте денег и отойдите, потому что только я могу понять, чем занимаюсь». Естественно, все меньше желающих делать такие вложения. Поэтому не уверен, что не имея концепции развития науки в целом, можно за счет одной нанотехнологической программы решить разом все проблемы. К сожалению, так не бывает.

Вопросы задавал Данила Ланин ■