

НА ПУТИ В НАНОЭЛЕКТРОНИКУ

ИСТОРИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛЕЛИ И СОПОСТАВЛЕНИЯ

Невиданный в истории России факт – на развитие научного направления государство намеревается выделить порядка ПЯТИ МИЛЛИАРДОВ долларов – вызывает двойственное чувство. С одной стороны, это должно радовать – наконец-то фундаментальным исследованиям и заделным работам (а в нанотехнологии пока иных и быть не может) оказывается реальная государственная поддержка, в денежном исчислении – на уровне ведущих мировых держав. С другой стороны, явное отсутствие единого понимания, что же такое нанотехнологии, отсутствие ясной проработанной программы в этой области вызывает опасение, что "мегазатраты приведут к нанорезультатам". А это, в том числе, даст повод окончательно превратить Россию в придаток к нефтяной трубе.

Электроника уже достаточно давно оперирует наноразмерными объектами и эффектами. Более семи лет назад планарные размеры полупроводниковых приборов перешагнули заветную отметку 100 нм, а о толщинах слоев и говорить не приходится. Поэтому государственные инициативы, объединенные модным словом "нанотехнология", прежде всего должны относиться к нашей отрасли. В этой связи чрезвычайный интерес представляет взгляд на проблему развития нанотехнологий и нанозлектроники таких экспертов, как известный ученый и специалист-практик Ю.Р.Носов и генеральный директор ОАО НПП "Сапфир" А.Ю.Сметанов. Напомним только, что их мнения, безусловно, не бесспорны. Возражайте!

Ю.Носов
А.Сметанов

ФИЛОСОФСКОЕ ОСМЫСЛЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Как известно, вопрос о нанотехнологиях поднят на государственном уровне [1], Президент РФ уделил ему особое внимание, вплоть до технических подробностей, чего не было при рассмотрении каких-либо иных научно-технических программ. Цена вопроса впечатляет – удвоение затрат на науку. Это обстоятельство делает обязательным обсуждение эффективности различных путей реализации государственного "социального заказа", или другими словами – **российского нанопрокта**. И если вполне правомерно формулировать общие макроэкономические характеристики – направление вектора развития, место в жизни страны, финансирование и т.п., то научно-технический анализ нанопрокта в столь же общей форме не имеет смысла. Его результаты либо лозунгово-банальны, либо некорректны, так как в своей конкретике применимы только к отдельным отраслям. Поэтому мы затронем лишь ту часть проекта, результаты которой относятся к сфере электроники, т.е. нанозлектронику, стоящую особняком среди всех нанотехнологий. Принципиально, что наши выводы ни в коей мере не следует распространять на нанотехнологию в целом.

В своей работе мы опирались на методологию историко-сравнительного анализа. Историк науки, по мысли А.Эйнштейна, нередко способен глубже проникнуть в суть происходящих процессов, чем сами ученые – творцы этих процессов [2]. Нанозлектроника рождается не на пустом месте, это очередное звено в столетней истории электроники, начавшейся с изобретения вакуумного триода в 1907 году. Поэтому историко-сравнительный подход правомочен и креативен. Подчеркнем, что "исторический опыт – не рецепт для лечения сегодняшних болезней", исследовательские программы должны исходить из существа научно-технических проблем, а не из истории. Неприемлем упрощенный детерминизм и редукционизм, пытающийся объяснить настоящее прошлым и свести сегодняшнее сложное к менее сложному вчерашнему [3]. Но история ставит вопросы, соотносит прошлое и настоящее с той целевой функцией, которая константна для электроники вообще; "незнание истории ...ставит под угрозу всякую попытку действовать в настоящем" [4].

Как любое новое крупное общественное явление, наноэлектроника требует своего философского осмысления. Все мы, от министра до инженера, в повседневной деятельности руководствуемся некими априорными установками, чаще всего интуитивно, не отдавая себе в этом отчета. Не имея общего представления, легко запутаться в частностях. Бытующий ныне так называемый прагматизм, фетишизирующий сиюминутную выгоду, в большом деле чаще всего заводит в тупик. От того, какую философию исповедуют общество и его лидеры, зависит решение сугубо практических вопросов распределения финансовых, материальных, людских ресурсов.

РЕВОЛЮЦИЯ ИЛИ ЭВОЛЮЦИЯ?

Представители академическо-университетской науки (имеется в виду лишь ведомственная принадлежность соответствующих институтов) трактуют возникновение нанотехнологий как научно-техническую революцию, изменяющую картину мира, или как **смену парадигмы**, по аналогии с переходом от классической физики к квантовой в начале прошлого века [5]. Применительно к наноэлектронике аргументируется это тем, что микроэлектроника развивается эволюционно в направлении уменьшения характеристических размеров (сверху вниз). Нанотехнология развивается принципиально иначе – "с уровня атомов, складывая из них, как из кубиков, нужные материалы и системы с заданными свойствами" [5], т.е. снизу вверх. Это положение, к сожалению, вошло и в директивный документ [1], где говорится об "атомном и молекулярном конструировании", как о сути нанотехнологий.

Понятие *парадигмы* было введено применительно к истории науки в 1962 году в работе [6], где оно рассматривается как некая методологическая концепция, которую научное сообщество признает истинной и способствующей прогрессу. Прогресс, согласно [6], обусловлен главным образом научными революциями, вызываемыми сменой господствующей парадигмы, т.е. утверждением новой и отрицанием предыдущей, устаревшей. Призыв к "смене парадигмы" – шаг ответственный, отрицание действующих концепций всегда болезненно, в технике – особенно: уничтожаются материальные ценности, рушатся людские судьбы. Призывать революцию всуе не следует.

Несомненная смена парадигм в электронике произошла лишь однажды – в связи с изобретением в 1948 году транзистора и последующим переходом от вакуумной электроники к твердотельной. При том колоссальном прогрессе, который это принесло радиоэлектронике, был закрыт ряд вакуумных производств, исчезли некоторые специальности. Многим, вплоть до профессоров, пришлось переучиваться, начиная с азов новой полупроводниковой науки.

Переход же в 1960-е годы к микроэлектронике, несмотря на гигантские изменения во всей радиоэлектронике, в том числе и качественные, нельзя назвать сменой парадигмы –

физико-технологическая концепция дискретной транзисторной электроники распространилась на микроэлектронику без каких-либо принципиальных изменений. Характерно, что транзисторные заводы без потрясений перешли на производство микросхем и в ряде случаев обошли "чистых" микроэлектронщиков (пример – минский "Интеграл": этот изначально диодный завод в конце 1970-х годов производил около 40% всех отечественных микросхем). В ближайшее десятилетие мы станем свидетелями смены парадигмы в светотехнике – светодиоды все увереннее вытесняют лампы накаливания, ряд стекольных производств фирм Osram и Philips уже закрыт.

Приведенные примеры показывают, что смену парадигмы подтверждает не грандиозность достижений нового научно-технического направления, а лишь онтологические, сущностные отличия нового направления от предшествующего. Итак, **означает ли возникновение и становление наноэлектроники смену парадигмы в электронике? Наш ответ – нет.** Наноэлектроника есть логическое продолжение и развитие микроэлектроники, а не перешагивание через нее и не отрицание. Это не умаление значимости наноэлектроники, а всего лишь корректная характеристика ситуации.

"ТРАДИЦИОННАЯ" И "НОВАЯ" НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Обратимся к истории. Полупроводниковая электроника изначально имела дело с наноразмерами, так ширина области объемного заряда p-n-перехода стабилитрона составляет десятки нанометров, а туннельного диода – единицы*. В 1970–1980-е годы в полупроводниковую технику вошли такие наноразмерные структуры, как гетеропереходы, сверхрешетки, квантовые ямы, квантовые проволоки и точки. Для их создания были разработаны технологические процессы, родившиеся как логическое развитие и совершенствование полупроводниковой классики: эпитаксии, диффузии, имплантации, напыления, окисления и литографии. Получила распространение молекулярно-лучевая эпитаксия, ионно-плазменная обработка, ионно-лучевое напыление, фотонный отжиг и др. Разумеется, переход к манипулированию потоками свободных атомов, молекул, ионов привел к значительным изменениям в классических технологических схемах. В частности, существенным стало явление самоорганизации – самопроизвольное образование тех или иных пространственных структур на поверхности подложки (разумеется, эта самопроизвольность инициируется извне). Сверхпрецизионность перечисленных технологий позволяет воспроизводимо получать изолированные кластеры, содержащие сотни атомов; однородные оптические пленки с "шероховатостью" менее

*Формальной границей перехода к наноразмерам служит величина 100 нм, однако нанотехнику связывают все же не просто с малыми размерами, но с возникновением при этом новых качественных эффектов, малозаметных при больших размерах исследуемых объектов. Для ориентации – диаметры атомов полупроводников близки к 0,25 нм, а межатомные расстояния в кристаллической решетке – к 0,55 нм. С определениями и характеристикой основных понятий наноэлектроники можно познакомиться в работах [7, 8].



0,2 нм; гетероструктуры, состоящие из разнородных нанослоев заданного состава и т.п. Фактически эти технологии – первый шаг на пути "атомного конструирования". Приборное подтверждение жизнеспособности перечисленного – в широко известных достижениях новейших микросхем, лазеров, светодиодов, фотоприборов (подробнее см. [7–9]). Таким образом, развитие микроэлектроники естественно и логично привело ее к нанозлектронике, которую мы условно назовем *традиционной нанозлектроникой*.

Но в 1980–1990-е годы произошли события и принципиально иного рода. Это изобретение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ, 1981 г.) и атомно-силового микроскопа (АСМ, 1986 г.), позволивших манипулировать нанометровыми кластерами, вплоть до отдельных атомов и молекул. В 1985 году открыты фуллерены – новая структурная форма существования углерода. В 1991 году на их основе созданы нанотрубки – углеродные пористые структуры цилиндрической формы, обладающие целым рядом уникальных свойств, вплоть до сверхпроводимости. Наконец, в 1998 году на базе нанотрубок получен транзисторный эффект [10]. Эти открытия дали старт нанозлектронным исследованиям, опирающимся на схему "снизу вверх", с ее идеологией конструирования устройств буквально из единичных атомов. Зародилось то, что мы условно назовем *новой нанозлектроникой*. Подчеркнем ее исследовательский, непроизводственный характер – ведь технику СТМ и АСМ даже с натяжкой нельзя отнести к технологии в общепринятом понимании (в этом утверждении мы расходимся с авторами работ [8, 7]). Строго говоря, это не что иное, как техника физического эксперимента.

По авторитетному мнению [11], модернизированная полупроводниковая классика – как в технологии, так и в теории транзисторов – будет работать по крайней мере до 10 нм. Правда, при этом "потребуется решение ряда принципиальных проблем", но мы полагаем, что все они – из разряда технических. Действительная же смена парадигмы наноприборов – переход к функционированию по квантовым законам – произойдет лишь с появлением промышленных технологий атомного масштаба (0,5–0,1 нм), ориентировочно к 2030 году.

Итак, если принимать во внимание не ожидания, а реальный приборный выход, то можно говорить лишь о традиционной нанозлектронике. Более того, ситуация вряд ли изменится в ближайшие годы – это опять же подсказывают нам исторические сопоставления. Если отсчет истории новой нанозлектроники начать с нанотрубок и транзистора на их основе, отнеся все остальное к предыстории, то и тогда получится 10–15 лет, срок немалый. За такой же начальный период (после изобретения транзистора в 1948 году) были созданы практически все разновидности транзисторов, диодов, тиристоров; эти приборы прошли аппаратную обкатку в Корейской войне (1950–1953 годы); началось их производство на десятках предприятий многомиллионными тиражами. По-

лупроводниковые приборы вошли во многие военные системы; была подготовлена технологическая база – планарная технология – для будущей микроэлектроники. Весомо, не так ли? С еще большим ускорением и по аналогичному сценарию развивались микросхемы, стартовавшие в 1958–1959 годы. Укажем лишь, что уже в 1971 году появились микропроцессоры, кардинально изменившие идеологию электронного аппарата строения. А **что** в тех же критериях оценки – типы, штуки, заводы, военные применения – **за такой же срок дала новая нанозлектроника? Если коротко – ничего.**

Исторический опыт учит, что если новое научно-техническое направление не проявляет себя за время естественного воплощения, то это означает одно из двух: либо его принципиальную нереализуемость, либо преждевременность. Первое означает, что новое направление онтологически ущербно (физически, технологически и т.п.) и не реализуется в принципе, как компьютер на туннельных диодах. Преждевременность подразумевает, что еще нет объективных условий для технической реализации, как в случае с разработкой противосамолетного "лучевого оружия" в ленинградском НИИ-9 в 1930-е годы. Время естественного воплощения нового эффекта в практику рассчитать невозможно – слишком много неопределенностей. Но история, наш эксперт, предлагает некоторые ориентиры. Так, во второй половине 20 века ни один из крупнейших проектов не продолжался более 10 лет: американский и наш атомные проекты – 6–7 лет, высадка человека на Луну – 7–8 лет. Это не случайность, а историческая обусловленность – любые заложенные у "истоков" идеи, технические решения, материалы за 10 лет не просто устаревают, а становятся архаикой. И если проект не воплотился в "металл", то его и продолжать не стоит, дешевле начать заново. Таков нынешний динамизм – либо делать быстро и выставлять "на продажу", либо – не браться. Разумеется, речь идет о создании изделий, решении других конкретно-осязаемых задач. К нанонауке это не относится – исследования фундаментальных проблем могут продолжаться неограниченно долго (хотя и здесь длительное отсутствие результата "утомляет" общество и самих ученых, пример – полувековой поиск дешевой термоядерной энергии заметно поутих).

УСЛОВИЯ УСПЕХА

Сравнительно-исторический анализ позволяет сформулировать ряд важных тезисов об условиях успеха нового направления не в приближенно-сослагательном формате, как это было выше, а вполне определенно, доказательно и безальтернативно.

Тезис первый – *успех микроэлектронного проекта был бы невозможен, если бы "под него" не нашелся адекватный полупроводниковый материал – кремний, универсальный в части одновременного достижения функциональных, эксплуатационно-надежных, технологических, стоимостных*

характеристик микросхем. По отдельным позициям могут оказаться предпочтительнее арсенид галлия, германий, экзотические тонкие пленки и т.п. Но они – не универсальны, и в итоге обречены лишь на частности. Напротив, те новые направления, которые ориентированы на кремний – "кремний на диэлектрике", микромеханика – имеют безусловную перспективу, трудности и проблемы обязательно разрешатся за счет всей мощи технологического потенциала микроэлектроники.

Дискретные приборы – транзисторы, лазеры, светодиоды, фотоприемники и др. – используют широчайший спектр разнообразных полупроводников, что позволяет достигать рекордов в соответствующих сферах применения, но одновременно исключает возможность интеграции – значимость дискретных приборов несоизмерима со значимостью микроэлектроники. Характерный пример, обратный микроэлектронике – интегральная оптика. Очень рьяно заявив о себе еще в 1970 году, она не нашла универсального базового материала и в результате так и осталась на периферии.

Новая наноэлектроника пока универсального материала не обрела – нанотрубки на эту роль не смотрятся, – поэтому от нее можно ожидать прорывов лишь в сфере отдельных видов дискретных приборов и каких-нибудь гибридных конгломератов. А любой, даже очень полезный, прорыв вне интегральной технологии решает лишь частности.

Тезис второй – успех микроэлектроники в сфере применения обусловлен комплексным подходом к нуждам радиоэлектронных систем. Единовременно разрабатываются микропроцессорные комплекты, функционально полные наборы микросхем, естественно и логически оправдано устремление к "системам на кристалле". Но ни одна "сверхпродвинутая" микросхема не обеспечивает реального прогресса аппаратостроения. Более того, разнородность микросхем и дискретных приборов (по материалам, технологии, конструкции), используемых в системе, очень часто становится причиной ненадежности, высокой стоимости, функциональной ограниченности. Нередко ради комплексности отказываются от уникальных и вроде бы выигрышных единичных решений. Новая наноэлектроника, обещая появление множества замечательных изделий – терабитной памяти, микродисплеев и др., системных комплексных решений пока не предлагает.

Тезис третий: успех микроэлектроники предопределен и комплексным подходом другого рода – *одновременным и обязательным сочетанием в микросхеме полного "джентльменского набора" компетенций: высокой степени интеграции, значений функциональных параметров, надежности, технологичности.* Новая наноэлектроника добивается рекордов то в одном, то в другом направлении, но почти всегда оставляет решение вопросов надежности "на потом". Однако из самых общих соображений очевидно, что для элементов наномира проблема надежности (точнее, ненадежности) являет-

ся определяющей. Характерно, что военные (в том числе и в США) до сих пор с осторожностью относятся к микросхемам с проектными нормами менее 0,35–0,25 мкм. Что же говорить о нанотрубках, нанотранзисторах и нанопроводниках!

Тезис четвертый: *решающим условием успеха отечественной микроэлектроники стала и комплексность в подходе к созданию адекватной инфраструктуры отрасли, а именно организации специального материаловедения, машиностроения, аналитики, метрологии.* Исторический пример: в числе трех первых зеленоградских микроэлектронных предприятий был НИИ точного машиностроения (1963 г.); первым специализированным электронным вузом страны стал Московский институт электронного машиностроения (1962 г.); в 1978 году в электронике был создан ряд региональных физико-химических центров, оснащенных уникальными измерительными и аналитическими приборами. Подобной комплексности в новой наноэлектронике нет. В частности, нет отечественного специального машиностроения, а ориентация на импорт обрекает нас, как минимум, на пятилетнее отставание в развитых направлениях и на полную безоружность в новых, прорывных, областях (ограничения типа закона Вэника-Джексона будут только ужесточаться).

Тезис пятый: *достижение всех перечисленных видов комплексности стало возможным исключительно благодаря нацеленности на военные применения.* Участие военного ведомства в постановке, разработке и реализации микроэлектронного проекта, методологически единый сквозной контроль производства материалов, микросхем, аппаратуры, долгосрочное финансирование проекта – все это не смог бы обеспечить никакой другой крупный заказчик, кроме МО, пусть даже и концерн типа "Алмаз-Антей". Сегодня для нас это особенно принципиально, так как реального гражданского полупроводникового рынка в стране нет. И в ближайшее время его не будет, поскольку нет потребности. Еще более важно, что только оборонный проект в России может быть по-настоящему амбициозным, а без этого он нежизнеспособен, что понимают как госуправленцы, так и общественность [12, 13].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ

Центральный вопрос любого проекта – распределение финансирования. Президентское послание предполагает первоочередное финансирование наноэлектроники как основы развития новой наноэлектроники. Это, безусловно, оправданно. Только от академических-университетских ученых можно ожидать первых реальных шагов. Как бы ревниво, порой заносчиво, не напоминали электронщики о своих приоритетах в приборной сфере, история свидетельствует об ином: первый плоскостной транзистор, первая солнечная батарея, первый гетеролазер у нас в стране были созданы в ленинградском Физтехе. Первый туннельный диод, первый мазер и полупроводни-



ковый лазер – в ФИАНе, первые линии задержки на поверхностных акустических волнах – в ИРЭ. В НИИ и ОКБ эти приборы пришли из академических лабораторий. Но это лишь часть истины.

Дело в том, что электронная промышленность всегда получала информацию о приборных новинках по двум каналам: от академическо-вузовской науки и непосредственно от Запада (журналы, конференции, стажировки, разведданные и др.), причем второй канал доминировал и доминирует во все большей степени. Идеализированных схем – академия разрабатывает приборно-технологические принципы, а НИИ внедряют в промышленность – никогда, за редкими исключениями, не было. Электронное сообщество, как некое неформальное вневедомственное единство ученых на профессиональной основе, в стране так и не сформировалось. Скорее наоборот – в 1950-е годы А.Ф.Иоффе, В.М.Тучкевич, Б.М.Вул – от академии, и А.И.Берг, Н.П.Сажин, А.В.Красилов, С.Г.Калашников – от промышленности могли сидеть за одним столом и понимать друг друга. К 1970–1980-м годам "академики" и "отраслевки" разошлись по своим квартирам. И это – принципиально.

В обширной литературе, лоббирующей нанопроект, "автоматически" предполагается, что "наука" – это РАН (см. например [13]). Отраслевая же наука, где и сосредоточен технологический потенциал страны, выводится за скобки. При этом вопреки очевидности утверждается, что Россия в области научного задела по нанотехнологиям находится приблизительно на одинаковых стартовых позициях с передовыми странами мира.

История подсказывает: финансовый поток наноэлектронного проекта должен потечь в два русла, причем "прикладникам" всегда и всего надо намного больше, чем "академикам". Развивая по преимуществу традиционную наноэлектронику, промышленные НИИ тем самым неизбежно будут готовить и инфраструктуру (технологии, метрику, аналитику, кадры и др.) для активного восприятия приборных первенцев новой наноэлектроники.

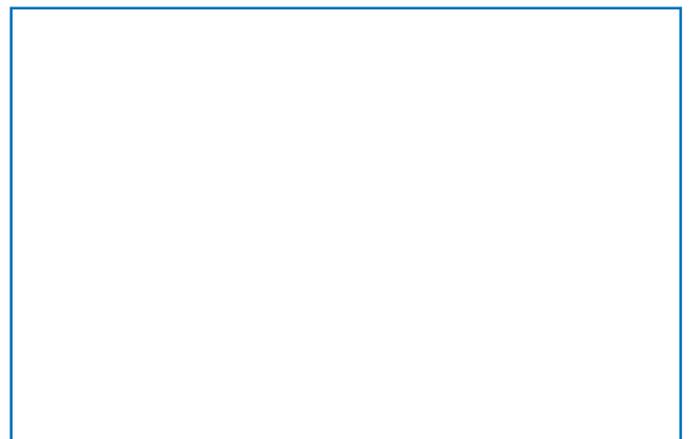
Номинальные руководители проекта фактически не сформулировали его цель, говоря вместо этого "давайте сначала попробуем" (Г.О.Греф) [12], или пускаясь в туманные рассуждения о том, что "материальная сфера будет полностью оцифрована, аналоговый мир устареет" (А.А.Фурсенко) [13] и о "восстановлении целостной картины мира" (М.В.Ковальчук) [5], а также о натурфилософии времен Ньютона [13]. Каких результатов можно ожидать при этом? Вырастет индекс цитируемости РАН, увеличится представительство России в международных организациях по нанотехнологиям, повысится "стоимость" наших талантливых физиков и химиков, уезжающих на Запад. Хорошо, но маловато, по крайней мере для тех, кто остается. Приходится еще раз вспомнить, что нанопроект нацелен не на изучение окружающей среды, а на

создание новых реальностей. **Жаль, если в результате мегазатраты приведут к нанорезультатам.**

О КОРПОРАЦИИ ПО НАНОТЕХНОЛОГИЯМ

История нашей микроэлектроники обычно персонифицируется с Зеленоградом. Однако напомним, что первая отечественная микросхема была создана на "Пульсаре" (кто-то возразит: в Риге на "Альфе", но в данном контексте это не принципиально), а первая микросхема с военной приемкой – на Воронежском полупроводниковом заводе. И планарная технология пришла в НИИМЭ и "Микрон" с "Пульсара". Ситуация исторически типичная: **первые образцы новой техники рождаются не в специально создаваемых структурах, а на действующих традиционных предприятиях с мощным научно-технологическим потенциалом и кадрами.** Лишь бы был динамичный амбициозный лидер да вышестоящее руководство не мешало. Разумеется, при всем том создание Зеленограда было объективно необходимо – переход от транзисторов к интегральным схемам носил достаточно принципиальный характер и без крупного специализированного концерна было не обойтись.

Нынешняя ситуация отличается неизмеримо меньшей реальной потребностью в изделиях наноэлектроники, поэтому целесообразнее подобную специализированную корпорацию сформировать в форме горизонтальной интеграции действующих предприятий. По нашим субъективным представлениям, главенствующее место должны занять "Пульсар", НИИМЭ (с "Микроном"), НИИСИ, "Полюс", "Орион". Тем самым наноэлектроника получит воплощение во всех определяющих направлениях: интегральная техника, СВЧ-электроника, лазеры и оптоэлектроника, фотоника, ИК-техника, сенсорика. Названные предприятия в наибольшей степени сохранили научный потенциал, кроме того, их лидеры достаточно молоды, энергичны, амбициозны и, что немаловажно, имеют прочные связи с академическо-университетской наукой и ею признаны (бюджетные деньги следует давать дееспособным коллективам и их лидерам, без этого любым бизнес-планам грош цена в базарный день). В корпорации должно найтись место и другим предприятиям, нацеленным на наноэлектронику:



"Ангстрему", "Истоку", "Волге", "Светлане", "Сапфиру", НИИИС, "Монокристаллу"... В составе перечисленных предприятий корпорация будет иметь четкую промышленную ориентацию на разработку и производство изделий нанoeлектроники, подобно авиа- и судостроительной корпорациям, упомянутым в Послании Федеральному собранию [1].

Что касается Российской корпорации нанотехнологий с безгранично широким представительством всех и вся и членами Федерального собрания в ее руководстве, то вряд ли подобная рыхлая структура сможет выполнять какие-либо иные функции, кроме декоративных. Критериями для "пропуска" предприятий в нанопроект должно стать:

- наличие дееспособного научного потенциала,
- наличие военного представительства,
- принятие системы добровольной сертификации в соответствии с РД В 319.015-2006,
- длительный опыт производства приборов для военных целей,
- отсутствие существенных нарушений государственной дисциплины.

Недопустима дискриминация по пункту формы собственности – и ФГУПы и ОАО равно достойны получения государственного финансирования по нанопроекту.

Ориентация на действующие научно-производственные предприятия позволит получить быструю и существенную отдачу от нанотехнологии благодаря ее использованию при модернизации выпускаемой продукции. Особенно заметно это проявится там, где применяются сложные полупроводниковые структуры. Простой пример: наши оценки показали, что в производстве КМОП-микросхем на основе "кремния на сапфире" переход от кремниевых пленок толщиной 0,3–0,6 мкм к 100-нм пленкам (а это возможно лишь методами нанотехнологии) даст тройной эффект – выход годных вырастет в 1,5–1,8 раза; на порядок повысится степень интеграции и увеличится радиационная стойкость микросхем. Как следствие, себестоимость снизится на 35–40%.

ПОТРЕБНОСТЬ КАК ВЕЛИКАЯ ЦЕЛЬ

В заключение подчеркнем, что главной проблемой в развитии нанoeлектроники являются не деньги, оборудование, кадры – это решаемо, а отсутствие в стране реальной потребности на изделия нанoeлектроники, фактически – **отсутствие Великой цели** (как это было при создании транзисторной и микроелектронной отраслей). Заостряя, можно сказать, что **это – единственная проблема**. История свидетельствует, что проблема спроса на элементную базу существовала и раньше, хотя поверхностному взгляду представлялось, что транзисторов и микросхем хронически не хватало. Полупроводниковая планарная технология такова, что едва заканчивается подготовительный период, производство способно очень быстро наращивать объемы – массовость и ди-

намизм органически заложены в самой сути микроелектроники. К столь же динамичному наращиванию потребности аппаратостроение неспособно, это также заложено в его сущности. В 1970–1980-е годы проблему нивелировало огромное число аппаратостроителей – кто-то успевал на НИРовских образцах разработать аппаратуру, кто-то имел возможность создавать задел по комплектации – так или иначе, полупроводниковое производство поддерживалось потребителями. В сегодняшней реальности рынок потребления отечественных электронных компонентов отсутствует (мягче говоря – очень узок). О причинах этого написано немало; главные из них две: неконкурентоспособность наших изделий в сравнении с западными и деградация аппаратостроения. Многие полупроводниковые предприятия работают на одного-двух заказчиков, отсюда перебои в потребности, вплоть до коллапса. Именно от того, как лидеры и научное сообщество в целом сумеют решить проблему потребности, и зависит успех нанoeлектронного проекта.

По некоторым фрагментам статьи у читателя может сложиться впечатление о беспросветном пессимизме авторов. Но пессимисты вряд ли стали бы пристрастно анализировать то, во что не верят и чем не предполагают заниматься. Исторические сопоставления – не доказательства, они лишь ставят вопросы, дают подсказки, предостерегают от опасностей. Каждое время неповторимо, "сегодня" в меньшей степени зависит от того, что было "вчера", нежели от того, каким обществу видится "завтра". Современная наука и технология достигли таких высот, что прорывных открытий можно (и должно) ожидать когда и где угодно, причём и вопреки логике истории. Надо держать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путин В.В. Послание Федеральному собранию. – Известия, 27 апреля 2007 г.
2. Шленовф Д. Век с Эйнштейном. – В мире науки, 2004, №12, с.83.
3. Фролов И.Т. Органический детерминизм, телеология и целевой подход в исследовании. – Вопросы философии, 1970, № 10.
4. Блок М. Апология истории, или Ремесло историка. – М.: Наука, 1986.
5. Ковальчук М.В. Нанотехнологии в России... – Газета "Нанoeлектроника": МИРЭА, 2007, № 1.
6. Кун Т. Структура научных революций. – М.: АСТ, 2003.
7. Авдонин Б.Н., Мартынов В.В. Электроника. Вчера...Сегодня. Завтра? – М.: ИКП Дека, 2005.
8. Нанотехнологии в электронике /Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005.
9. Алфёров Ж.И. Физика и жизнь. – СПб.: Наука, 2000.
10. Tans S.J., Verschueren A.R.M., Dekker C. – Nature, 1998, № 393, p.49–52.
11. Валиев К.А., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А. Кремниевая нанoeлектроника: проблемы и перспективы. – Нанотехнологии и материалы, 2005, с.17–29.
12. Живая электроника России, 2007, с.24.
13. А.А. Фурсенко. Интервью – Известия, 15.06.2007.