

Нанoeлектроника: проблемы техники и проблема кадров

Валерий Устюжанинов, д.т.н., профессор, Владимирский государственный университет

Появившиеся в последнее время многочисленные комментарии к программе развития нанотехнологий в нашей стране свидетельствуют о практически полном непонимании сути проблемы на всех уровнях. Уверенность в том, что нанотехнологии означают всего лишь малые размеры объекта, а не новую физическую природу явлений и процессов, просматривается во многих средствах массовой информации, включая комментарии госчиновников, принимающих решения. Очевидная опасность недооценки значимости теоретических исследований и сведения проблемы к объемам финансирования, а также новизна нанoeлектроники, как научно-технического направления, обуславливает необходимость реализации эффективной системы подготовки и переподготовки кадров, призванных обеспечить прорыв в столь наукоемком направлении.

Обнародованные в Послании Президента Федеральному Собранию РФ новые приоритеты в области высоких технологий предусматривают беспрецедентное финансовое обеспечение разработок в области нанотехнологий. Создание государственной корпорации по нанотехнологиям с объемом финансирования 180 миллиардов рублей неизбежно повлечет необходимость решения наиболее актуальных теоретических проблем в области нанoeлектроники. Комплексный характер этих проблем обуславливает необходимость разработки теоретических основ физических эффектов в структурах пониженной размерности, прикладных аспектов технологии промышленного синтеза наноструктур с заданными свойствами, исследования энерго-информационных характеристик процессов в наноструктурах.

Провозглашение амбициозных планов — завоевание ведущего положения в мире в области нанотехнологий с объемом производства 10-15 процентов от мирового, создание «рынка нанoуслуг» к 2012 году и др. не сопровождается какой-либо конкретикой. Отсутствует информация о целях, задачах, сроках и ожидаемых результатах разработки и внедрения нанотехнологий. Применительно к нанoeлектронике сообщается лишь о создании супер-нанокomпьютеров, способных решить все проблемы в области информационных технологий. Отсутствие структурирования проблемы создает ситуацию, когда на всех уровнях вертикали власти все понимают, что «надо», но не знают, что именно. При этом, по умолчанию, считается, что необходимым и достаточным условием достижения «нуж-

ного» является обеспечение финансирования разработок.

Особенностью начавшейся кампании информационной поддержки нового научно-технического направления является отсутствие каких-либо попыток сравнительного анализа мирового опыта, состояния проблемы, ожидаемых результатов, темпов развития, объемов финансирования и других показателей, которые необходимо учитывать при разработке долговременных программ.

Ситуация напоминает недавнее прошлое, когда приоритетным направлением провозглашался курс на массовое внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) при отсутствии технического и программного обеспечения. Основным итогом той кампании явилась генерация плеяды Лауреатов Государственной Премии при практически неизменных показателях количества и качества выпускаемой продукции. Не менее масштабной была кампания по разработке и внедрению комплексных систем управления качеством продукции (КСУКП). Которая закончилась созданием на каждом предприятии огромного числа (десятки тысяч!) инструкторов, определяемых как «стандарты предприятий», для каждого рабочего места без существенного повышения качества продукции. Можно упомянуть и о массовом внедрении «системного подхода» во все сферы деятельности, когда участники процесса не понимали сути происходящего и, соответственно, трактовали ее в меру своего понимания.

Прошлый опыт нескольких поколений ученых, разработчиков, руко-

водителей производства стимулирует критический анализ крупномасштабных долговременных проектов, особенно в области высоких технологий, когда отсутствует теоретическое обоснование, а основные результаты получены интуитивно-эмпирическим путем. При этом основная продукция получена не промышленным, а лабораторным способом. Скептическое отношение появляется и усиливается по мере знакомства с наивно-безграмотными сообщениями в различных средствах массовой информации о чудо-нанороботах, которые будут доставлять лекарства к больному органу и чуть ли не к каждой его клетке. Рассказы о квантовых компьютерах, как продукции едва ли не завтрашнего дня, также не способствуют ориентации общественного мнения на понимание сложности проблемы, необходимости концентрации усилий, ресурсов и средств на решении глобальной проблемы в интересах, прежде всего, будущих поколений. Ожидания грядущих успехов по принципу «еще немного, еще чуть-чуть» — бесперспективны. В этом смысле провозглашенные сроки и результаты являются, мягко говоря, недостаточно аргументированными.

Отмеченные особенности указывают на необходимость анализа состояния ключевой области нанотехнологий — нанoeлектроники. Оценки должны учитывать:

- наличие адекватных математических моделей квантовых эффектов в структурах с пониженной размерностью, классифицируемых как наноструктуры;

- состояние лабораторных и промышленных технологий получения

наноструктур с заданным химическим составом, топологическими и физическими характеристиками;

– возможность использования в информационных технологиях физических эффектов, лежащих в основе «аппаратной» реализации параллельных алгоритмов обработки информационных массивов.

Такой анализ вполне возможен применительно к нанообъектам различных типов, что подразумевает необходимость определения и уточнения основных понятий.

Анализ состояния теоретических основ и физики наноструктур может быть выполнен путем адаптации фундаментальных моделей квантовой физики конденсированных сред к структурам, содержащим счетное множество (десятки и сотни) атомов. Переход от непрерывного континуума к счетному числу взаимодействующих атомов в ряде случаев позволяет получить счетное число вариантов распределения частиц или квазичастиц по состояниям и энергиям с последующим определением наиболее и наименее вероятных. Решение такой задачи является необходимым условием определения физических и электрических характеристик нанообъектов, что и является конечной целью исследований.

По значениям электропроводности непрерывные среды относят к металлам, полупроводникам и диэлектрикам. Такая классификация на уровне наноструктур позволяет определить перечень фундаментальных положений физики твердого тела, которые необходимо адаптировать к конечным объектам. В частности, в квантовой теории теплопроводности твердого тела выделяют электронную и решеточную компоненты, ответственные за процессы переноса тепла (энергии).

Для *металлов* и, соответственно нанокластеров с металлическим типом проводимости, вследствие высокой концентрации свободных электронов влияние решеточной подсистемы на процессы переноса тепловой энергии пренебрежимо мало. При этом выполняется определенное соотношение между значениями электро- и теплопроводности в виде закона Лоренца. В конечном итоге это означает, что роль упругих колебаний узлов кристаллической решетки в

энерго-информационных процессах на уровне нанокластеров пренебрежимо мала, то есть процессы фонон-фононного взаимодействия не вносят заметного вклада в энергетический спектр наноструктур. При этом по закону Лоренца существует возможность определения электрофизических характеристик нанокластера по теплофизическим и наоборот.

Для *диэлектриков* и соответствующих наноструктур вследствие практического отсутствия свободных электронов теплопроводность определяется решеточной подсистемой, то есть процессами фонон-фононного взаимодействия и рассеяния фононов на неоднородностях (дефектах структуры). Энергоинформационные процессы в подобных наноструктурах обусловлены законами распространения упругих колебаний решетки, то есть фононами, характеристики которых вследствие счетного числа атомов и конечного числа вариантов распределений по энергиям и взаимодействиям между собой, поддаются определению.

В наноструктурах *полупроводникового* типа с предельно высокой концентрацией примесей и, соответственно, свободных носителей вклада электронной и решеточной компонент теплопроводности могут быть сопоставимы. Однако в реальных полупроводниковых наноструктурах энергоинформационные процессы обусловлены решеточной компонентой, то есть определяются особенностями распространения фононов.

По квантовым свойствам структуры с пониженной размерностью классифицируются как квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Квантовые ямы являются аналогом «потенциальной ямы» в квантовой теории твердого тела. Основной особенностью подобных объектов является существование квантовых свойств микрочастиц лишь по одной координате и, соответственно, возможность классического описания свойств микрочастиц по двум другим координатам. Энергетический спектр микрочастиц в таких структурах (2D-структуры) определяется в теории Зоммерфельда в результате решения одномерного уравнения Шредингера. В рамках этой теории обосновывается возможность нахождения энергетического спектра микрочастицы в трехмерном

кристалле путем свертки (произведения) решений по каждой координате. Применительно к задачам наноэлектроники зонная теория Зоммерфельда в полной мере применима к нанокластерам с конфигурацией в виде куба или параллелепипеда, т.е. для объектов с вертикальными стенками по каждой координате. В конечном итоге отмеченные особенности позволяют синтезировать теоретические модели физических характеристик нанокластеров с различного химического состава.

Квантовые нити (проволоки) — структуры 1D-типа — характеризуются наличием квантовых свойств по двум координатам. Для проволоки круглого сечения одна из координат полярная, что является одной из причин отсутствия решения двумерного уравнения Шредингера приемлемой сложности и вытекающего последствия в виде отсутствия теоретической модели энергетического спектра электронов в наноструктурах с металлическим типом проводимости. Для проволоки квадратного сечения в рамках теории Зоммерфельда задача может быть сведена к случаю квантовой ямы, то есть представлению волновой функции такой системы произведением волновых функций по каждой координате с последующим определением энергетического спектра электронов.

Квантовые свойства нанообъектов, определяемых как квантовые точки, проявляются по трем координатам (нуль-мерные структуры). Энергетический спектр микрочастиц — электронов в таких структурах зависит от размеров и конфигурации. При этом возможны варианты (в декартовой системе координат), когда задача поиска решений уравнения Шредингера и последующего определения энергетического спектра электронной подсистемы сводится к задаче для квантовой ямы. Не исключена возможность нахождения решений для полых тонкостенных образований типа фуллеренов и нанотрубок.

Принципиальной особенностью рассмотренных выше объектов с металлическим типом проводимости является преобладающее влияние электронной подсистемы на процессы переноса энергии. При этом решеточная подсистема и соответственно процессы фонон-фононного взаимодействия практически не рас-

смаиваются как определяющие характеристики энергоинформационных преобразований в масштабах наноструктур. Достижимые значения тепло- и электропроводности определяются интенсивностью процессов электрон-фононного взаимодействия. Для подобных объектов наиболее достоверно выполняется закон Лоренца. Уместно отметить, что счетное множество атомов в составе наноструктур, в отличие от классического варианта неограниченных конденсированных сред, сохраняет теоретическую возможность нахождения решения уравнения Шредингера для электронов в составе каждой элементарной ячейки (атома) и на этой основе определения энергетического спектра микрочастиц для ячеек и наноструктур сложных конфигураций.

Приведенные результаты качественного анализа показывают, что для известных классов нанобъектов с *металлическим* типом электропроводности возможно теоретическое обоснование и прогнозирование физических и электрических свойств во взаимосвязи с характеристиками элементарной кристаллической ячейки, конфигурацией и размерностью структур. Закономерно предположение о том, что для нанобъектов, относящихся к классу *диэлектриков*, характеристики энергоинформационных процессов существенно отличны от соответствующих значений в наноструктурах с металлическими свойствами. Отсутствие электронной компоненты теплопроводности означает, что внутренняя кинетическая энергия определяется суммой энергий волновых процессов, обусловленных упругими колебаниями узлов кристаллической решетки, т. е. процессами распространения фононов. Это означает, что физические характеристики подобных структур обусловлены преимущественно особенностями процессов фонон-фононного взаимодействия. Количественные оценки таких особенностей лежат в основе теоретических моделей физических характеристик нанобъектов из класса диэлектриков со сложными химическими составами.

Результаты качественного анализа, вытекающие из квантовой теории теплопроводности твердого тела Дебая-Эйнштейна, показывают, что в классе наноструктур с диэлектрическими

свойствами понятие пониженной размерности теряет смысл. Это является следствием практического отсутствия электронного газа и соответствующего влияния электронной системы на процессы переноса энергии. Такой вывод означает возможность распространения основных положений теории переноса и взаимодействий фононов на объекты с наноразмерными параметрами.

Особый теоретический интерес и практическую значимость представляют нанобъекты с различными степенями ограничения размерности (от нуль-размерных до двухразмерных, реализуемых в виде тонких слоев) из класса *полупроводниковых* соединений. Соизмеримые вклады в процессы переноса энергии электронной и решеточной подсистем обуславливают необходимость анализа влияния размерных эффектов и фононных процессов на энергетический спектр наноструктур. Рассмотрение внутренней энергии подобных объектов как суммы энергий электронной подсистемы с дискретно-непрерывным спектром, фононной подсистемы с дискретным спектром и энергии взаимодействия электронной и фононной подсистем позволяет искать решения относительно сложных задач определения характеристик частотно-энергетического спектра в виде суперпозиции менее сложных решений.

Иначе говоря, теоретическое решение основной задачи физики твердого тела — определение энергетического спектра электронной и решеточной подсистем применительно к нанобъектам с полупроводниковым типом проводимости вполне возможно. При этом повышение степени размерности (т.е. уменьшение числа координат, по которым проявляются квантовые свойства) приводит к упрощению задач теоретического анализа. В прикладном плане это положение означает, что теоретические модели наиболее просты и адекватны для нанобъектов в виде тонких пленок и слоистых структур, отождествляемых с понятием квантовой ямы. Условием адекватности моделей является приближение значений толщины пленки к длине волны де-Бройля по соответствующей координате. Полезно заметить, что технологически подобные объекты воспроизводятся наиболее

просто с погрешностью до одного атомного слоя.

Представленные результаты качественного анализа теоретических проблем исследования и синтеза наноструктур пониженной размерности позволяют определить наиболее перспективные направления и условия развития нанoeлектроники. Очевидно, что известные в настоящее время объекты класса фуллеренов и нанотрубок могут быть классифицированы как двумерные тонкопленочные наноструктуры, образующие замкнутые поверхности в трехмерном пространстве. Они характеризуются наличием дискретной компоненты энергетического спектра для электронной подсистемы в направлении, нормальном к поверхности, и непрерывной компоненты для двух координат в каждой точке поверхности. Решеточная подсистема подобных объектов характеризуется дискретным спектром упругих колебаний замкнутых одномерных цепочек атомов. Разрешенные для генерации колебаний значения длины каждой из таких замкнутых цепей зависят от размеров и хиральности нанотрубки или фуллерена. Они образуют дискретный ряд разрешенных значений, определяющий, в конечном итоге, дискретный энергетический спектр фононной подсистемы для каждого типа нанотрубок или фуллеренов.

Для двумерных наноструктур рассматриваемых типов, образованных атомами одного вида, представляется возможным решение теоретической задачи синтеза моделей энергетического спектра электронной и решеточной подсистем. Это является необходимым, а в ряде случаев достаточным условием получения расчетных оценок электрических и физических характеристик наноструктур, т.е. определения взаимосвязей между структурно-топологическими и физическими параметрами нанотрубок и фуллеренов. Решение подобных задач для нанобъектов на основе атомов различных химических элементов позволит сформировать теоретическую основу для решения широкого круга прикладных задач.

Выше изложенное означает, что для двумерных наноструктур различных конфигураций — плоские тонкие пленки, тонкостенные замкнутые трехмерные поверхности типа фул-

леренов или нанотрубок и др. существует теоретическая возможность математического моделирования энергетического спектра. Сложность подобных моделей возрастает, при соответствующем понижении степени адекватности, по мере увеличения сложности химических соединений. Однако даже на уровне полуконкретного описания закономерностей математическое моделирование обеспечивает возможность целенаправленного поиска и совершенствования технических решений на основных стадиях синтеза соединений и разработки технологических процессов их получения.

Краткое изложение теоретических задач наноэлектроники позволяет определить необходимые условия их решения. Наиболее сложным из них представляется разработка теоретических моделей спектрально-энергетических характеристик нанообъектов и совершенствование их до уровня расчетного аппарата. Решение подобных задач дает возможность перехода от эмпирического подхода к расчетно-прогностическому методу синтеза наноструктур различных классов с заданными спектрально-энергетическими характеристиками.

Очевидное условие решения столь сложных теоретических задач — наличие кадров соответствующей квалификации. В свою очередь, решение проблемы высококвалифицированных научных кадров подразумевает наличие системы подготовки специалистов в области квантовой физики твердого тела и полупроводников, физической химии и смежных специальностей в высшей школе, аспирантуре и непосредственно на высокотехнологических производствах.

Анализ современного состояния системы высшего технического образования показывает, что перспективы решения кадровой проблемы постоянно ухудшаются. Массовый

переход от подготовки специалистов-инженеров к выпуску бакалавров и, в меньших объемах, — магистров науки и техники, с соответствующим сокращением времени изучения фундаментальных и естественно-научных дисциплин уместно рассматривать как понижение уровня подготовки и квалификации специалистов в ведущих, по мировым меркам, отраслях высоких технологий. В этих условиях комментарии высокопоставленных чиновников и политиков, в частности, о «завоевании мирового рынка нанослужб к 2012 году» представляются необоснованно оптимистичными, свидетельствующими о непонимании всей глубины и сложности проблемы, объявленной национальным приоритетом. При сохранении существующих тенденций в области высшего специального образования к 2012 году придется реализовывать программу не только приобретения импортного высокотехнологического оборудования, но и массовой закупки зарубежных мозгов для его разработки и эксплуатации.

Для предотвращения очередного технологического провала, теперь уже в области нанотехнологий, крайне необходима организация соответствующего направления в перечне специальностей высшего образования и расширение подготовки кадров высшей квалификации, в первую очередь, в области наноэлектроники. Выделение даже малой части средств из объема в 180 миллиардов рублей, предусмотренных программой развития нанотехнологий на ближайшие 3 года, на финансовую поддержку ВУЗов, обеспечивающих подготовку профильных специалистов, может стать одним из наиболее эффективных начальных шагов в деле решения стратегической задачи.

Появившиеся в последнее время многочисленные комментарии к программе развития нанотехнологий

свидетельствуют о практически полном непонимании сути проблемы на всех уровнях. Уверенность в том, что нанотехнологии означают всего лишь малые размеры объекта, а не новую физическую природу явлений и процессов, просматривается во многих средствах массовой информации, включая комментарии госчиновников, принимающих решения. Отсюда следует очевидная опасность недооценки значимости теоретических исследований и сведения проблемы к объемам финансирования.

Очевидная актуальность и новизна наноэлектроники, как научно-технического направления, обуславливает необходимость реализации эффективной системы подготовки и переподготовки кадров со специализациями по теоретическим, технологическим и прикладным аспектам, организации постоянно действующих теоретических и научно-практических семинаров и конференций, специализированных учебных курсов и дисциплин. Подобная образовательная структура, создаваемая на корпоративных началах, должна отличаться гибкостью, способностью к оперативной концентрации усилий и ресурсов на исследование перспективных направлений, ориентированной на опережающее развитие научных, технологических и технических направлений. Она должна выполнять функции координатора исследований и разработок, а также аналитического центра, разрабатывающего рекомендации на основе оценок оперативной научно-технической информации.

Масштабы проблемы и ожидаемая практическая значимость результатов исключают возможность использования традиционных подходов и методов для ее решения. Ведь сегодня в значительной мере востребованы не только новые знания, но и новое мышление на всех уровнях принятия решений.

НОВОСТИ РЫНКА

Приказом Федерального агентства по промышленности от 23 октября 2007 г. № 457/лс Суворов Александр Евгеньевич назначен на должность государственной гражданской службы начальника Управления радиоэлектронной промышленности и систем управления.

Приказом Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации от 17 октября 2007 года № 2149/к Борисов Юрий Иванович с 19 октября 2007 года назначен на

должность государственной гражданской службы заместителя руководителя Федерального агентства по промышленности.

Приказом Роспрома от 19 октября 2007 года № 455/лс Ю.И. Борисов освобожден от должности начальника Управления радиоэлектронной промышленности и систем управления.

www.russianelectronics.ru

В Роспроме сменился начальник Управления радиоэлектронной промышленности