

Что там, в одной миллиардной части метра?

Интервью члена-корреспондента РАН Н.Н. Сибельдина

Когда мы услышали слово «нано» и узнали, что на исследования наноструктур и нанотехнологии государство выделило средств больше, чем на финансирование Академии наук, многие испытали комплекс неполноценности: ведь мы раньше не слышали этого слова «нано» даже в курсе школьной физики, т.е. «ни бум-бум» в вопросе, который, оказывается, сверхважен для цивилизации. «РФГ» компенсирует пробел: опубликовали статью Е.А. Андрюшина (см. № 5, 2010) и читатели заинтересованно откликнулись. Теперь, с просьбой продолжить тему мы обратились к ученому секретарю Комиссии РАН по нанотехнологиям Н.Н. Сибельдину.

Н.Н. Сибельдин – заведующий Отделом физики твердотельных наноструктур Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, специалист в области физики полупроводников. Методом рассеяния света им осуществлено прямое наблюдение капель электронно-дырочной жидкости, обнаружено увлечение капель и экситонов фононным ветром, возбуждение импульсов первого и второго звука в жидком гелии на поверхности полупроводника, обнаружены магнитостабилизированные экситонно-примесные комплексы в полупроводниках, получено много других важных результатов.

– Николай Николаевич, что же такое - «нано»?

– Нанотехнологии – собирательный образ десятков, если не сотен, зачастую не связанных между собой технологий, продукты которых используются в разных областях науки и техники.

Слово «нано» (в переводе с греческого – карлик) – приставка к наименованию единицы измерения длины (метр): миллиметр – одна тысячная метра, микрон – одна тысячная миллиметра, а нанометр – одна тысячная микрона. Т.е. нанометр – одна миллиардная метра. Для иллюстрации: если в ряд расположить вплотную двадцать атомов водорода, то будет как раз один нанометр. Революционные перспективы нанотехнологий связаны с тем, что стало возможным собирать нечто с размерами наномасштаба из атомов или молекул и контролировать этот процесс с атомной точностью. При этом надо уметь сконструировать «наноизделие» с определенными свойствами или функциями, обладать технологиями, позволяющими изготовить его с атомной точностью, а также методами диагностики и контроля.

Появление нанотехнологий предсказал полвека назад один из ведущих физиков-теоретиков Ричард Фейнман на заседании Американского Физического общества в лекции «Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики», хотя слово «нано» там еще не прозвучало. В дальнейшем развитие нанотехнологий определялось естественным ходом самой науки (физики, химии, биологии) и появлением соответствующего инструментария. Важнейшим толчком в их развитии стало изобретение в 1981 г. Г. Биннигом и Г. Рорером сканирующего туннельного микроскопа – прибора, позволяющего манипулировать отдельными атомами.

Кстати, в основе многих современных достижений в этой области лежат результаты как мировых, так и советских исследований, начатых еще 30-40 лет тому назад.

– То есть нано – не есть нечто принципиально новое?

– Новым «нано» оказалось для высокого начальства, а также для тучи псевдонанотехнологов, неизвестно откуда появившихся в последнее время. Тогда как работы Нобелевского лауреата академика Ж.И. Алферова по полупроводниковым гетероструктурам были начаты в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе еще в 60-х годах прошлого века. Еще пример: в 1962 году в Физическом институте им. П.Н. Лебедева мой учитель академик Л.В. Келдыш, которому вместе с одним из «отцов» технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (одна из ключевых нанотехнологий; возникла в 1960-х) американским профессором А. Чо присуждена Международная премия в области нанотехнологий RUSNANOPRIZE-2009, предложил и рассмотрел сверхрешетки – один из основных структурных элементов современной наноэлектроники. В то же время, в исследованиях наноструктур и разработке нанотехнологий получено большое число принципиально новых важнейших результатов, в науке и технике появились новые понятия и термины, новые технологии, объекты исследования, материалы, приборы и устройства.

– Помогите нам заглянуть в физику наноструктур – чем занимаются ученые?

– Есть несколько краеугольных камней квантовой механики и их проходят студенты любого физического факультета. Например, принцип неопределенности Гейзенберга (1927 г.): нельзя одновременно точно определить положение и импульс квантовой частицы (например, электрона). Этот принцип объясняет целый ряд явлений. Если вы зажали электрон в пространстве, то у него увеличивается импульс, т.е. энергия частицы начинает зависеть от объема, в котором она находится. Поэтому когда размеры объекта (допустим, кусочка

металла) уменьшаются до нанометрового масштаба, его электронный спектр перестраивается, происходит так называемое размерное квантование.

Другой фундаментальный квантовый эффект – туннелирование. Если перед человеком бетонный забор, он сквозь него пройти не может. Иначе у электрона: если он летит на энергетический барьер, то в отличие от классической частицы он с какой-то вероятностью от барьера отразится, а с какой-то протуннелирует сквозь него, то есть, если с другой стороны барьера поставить счетчик, он будет считать «прошедшие» электроны.

Есть много и других важных законов, скажем, различного рода квантовые интерференционные эффекты: в рамках квантовомеханического дуализма «волна-частица» электронные волны могут между собой интерферировать – где-то электронов в вероятностном смысле может быть больше, где-то меньше.

Все эти квантовые эффекты в первой половине XX века были предметом чисто фундаментальных исследований, а затем постепенно начали проникать в технику. На них основана работа большого числа приборов и устройств (лазер, туннельный диод, магнитно-резонансный томограф и многое др.). При разработке наноустройств вообще нельзя обойтись без законов квантовой механики, то есть данная область науки для человечества становится предметом повседневной жизни.

– Текст, перегруженный научной терминологией, читателю будет труден, но потерпим: расскажите, как использовать квантовые эффекты в практических целях.

– Можно сделать, например, то, что называется «квантовой ямой» – два энергетических барьера, а между ними потенциальная яма. Тогда уровень энергии электрона будет зависеть от того, какова ширина этой ямы. Если рядом поставить две ямы, он может из одной ямы туннелировать в другую.

Теперь сделаем из этих ям то, что называется – сверхрешетка. Кристалл состоит из атомов – это атомно упорядоченная решетка. А можно из квантовых ям тоже сделать упорядоченную в одном направлении структуру – это и есть сверхрешетка. А если движение электрона ограничено барьерами во всех направлениях, то такой объект называется «квантовая точка» (или иногда говорят – искусственный атом). Расположив квантовые точки упорядоченно, можно сделать искусственное твердое тело, каждым элементом которого является квантовая точка. Так на наноуровне можно целенаправленно получать новые наноструктурированные материалы с определенными свойствами или добиваться заранее запланированного приборного эффекта.

Например, можно, на основании квантовых эффектов, заставить электрон, который свободно «бегает» в твердом теле, излучать энергию, причем, «хорошего» диапазона частот. Суть явления такова: в кристалле энергия электронов периодически зависит от их импульса; поэтому, если приложить к кристаллу электрическое поле, должны возникнуть периодические колебания электронов, называемые блоховскими осцилляциями (предсказаны Ф. Блохом (1928 г.) и К. Зинером (1932 г.)). Однако осуществить это в обычном твердом теле невозможно, потому что колебания электрона затухали бы значительно быстрее, чем он успевал бы совершить одно колебание. А в искусственной сверхрешетке – возможно: период колебаний электрона обратно пропорционален периоду решетки, который в сверхрешетке составляет десятки периодов обычного кристалла, и электрон может совершить много колебаний, прежде чем он рассеется. На этом принципе могут быть созданы, например, перестраиваемые по частоте генераторы микроволнового и даже терагерцового излучения.

Применения – огромные: это зондирование атмосферы, прием и передача самых различных сигналов, в том числе астрономических, локация, связь, биология, медицина, контроль качества продуктов, поиск взрывчатых веществ и многое другое. Особенно интенсивно сейчас исследуются различные возможности генерации и детектирования терагерцового излучения. Для многих применений нужны достаточно эффективные и малогабаритные источники и приемники излучения. Их можно разработать на основе наноструктур – над этим и работает сегодня много специалистов.

Развитие микроэлектроники естественным образом ведет к нанотехнологиям. Как известно, плотность транзисторов на кристалле удваивается каждые полтора года (закон Мура, точнее, одна из его более поздних формулировок; сам закон предложен в 1965 г. одним из основателей компании Intel Гордоном Муром). Вот как уменьшается размер элементов в чипе – 0,18 микрона; затем 0,13; 0,09; 0,065; 0,045; потом 0,032 микрона, то есть будем иметь дело уже с размером 32 нанометра. Следовательно, если уменьшить элементы еще в несколько раз, электроны в чипе будут вести себя уже не как классические, а как квантовые частицы, то есть с точки зрения применений, техника (наноэлектроника в данном случае) идет в область очень малых размеров и, таким образом, становится квантовомеханической, то есть законы, на которых основана работа этих устройств, тоже будут другие – квантовомеханические. Происходит то, что и предсказывал Фейнман.

– А самые впечатляющие применения?

– Трудно сказать, впечатляющих применений возможно очень много. Но, наверное, все-таки – в медицине: например, адресная доставка лекарств с

помощью наноконтейнеров в организме человека – куда нужно и сколько нужно. С помощью нанотехнологий можно будет на больные клетки ставить излучающие метки – сейчас довольно много работ в этом направлении. Словом, результаты исследований обещают нам кардинальное изменение качества жизни – можно будет вовремя выявлять болезни и эффективно их лечить.

Впрочем, есть много разработок, которые сегодня используют модное слово «нано». Например, раньше назывались ультрадисперсными материалами такие, у которых чрезвычайно уменьшены «кристаллические зерна»: до размеров, скажем, тысяча и даже сотня нанометров. То есть, если это сталь, то она, в этом случае, не просто улучшается, а приобретает новые свойства. Разумеется, такую сталь перестали называть ультрадисперсным материалом, и сейчас называют наноматериал. Подобных примеров множество – но часто приклеивают термин «нано» вообще к тому, в чем никакого «нано», в смысле кардинального изменения свойств, нет.

У меня дача рядом с Рогачевским шоссе, едем по нему купаться на озеро и видим огромный биллборд – написано аршинными буквами: «Нано Мойка» автомобилей, разумеется. Таких несуразниц несметное число, у меня среди физиков есть знакомые, которые даже коллекционируют предметы с надписью «нано».

– Чтобы не заставлять читателя продирается сквозь научный текст, скажите хотя бы два слова простым языком про нерешенные теоретические проблемы.

– Таких проблем достаточно. Например, есть, так называемый, двумерный электронный газ – система, в которой электроны могут двигаться только вдоль плоскости (электрон зажат в квантовой яме, не может из нее выйти и потому движется только вдоль плоскости). Исследование этой системы привело к открытию ряда принципиально новых явлений, и, прежде всего, целочисленного (1980 г.) и дробного (1982 г) квантового эффекта Холла. Эти открытия удостоены Нобелевскими премиями по физике, соответственно, в 1985 (К. фон Клитцинг) и 1998 (Д. Цуи, Х. Штермер, Р. Лаффлин) годах. Появился ряд новых представлений и понятий: композитные фермионы, скирмионы, лаффлиновская жидкость и другие. Поведение таких двумерных систем при низкой электронной плотности и сверхнизких температурах – предмет современного активного изучения, и ясности нет, что там происходит; физики сомневаются, удастся ли наблюдаемые явления объяснить в рамках существующих представлений.

– Известно, что и лично ваши исследования внесли значительный вклад в исследование наноструктур.

– Определенное время назад мы занимались электронно-дырочной жидкостью. Если освещать полупроводник светом при низких (гелиевых) температурах – в нем образуются так называемые экситоны. (Экситон от лат. *excito* – «возбуждаю» – квазичастица, представляющая собой электронное возбуждение в диэлектрике или полупроводнике, мигрирующее по кристаллу и не связанное с переносом электрического заряда и массы. – Ред.). Электрон и дырка внутри полупроводника друг с другом связываются и получается как бы атом, квазиатом. В 1931 г. советский ученый Я.И. Френкель предположил существование экситона, а далее независимо от него и независимо друг от друга представления об экситоне развили английский ученый Н.Ф. Мотт (1938 г.) и швейцарец Г.Х. Ванье (1937 г.). В полупроводниках образуются экситоны большого радиуса, они называются экситонами Ванье-Мотта, а в молекулярных кристаллах экситон – возбуждение отдельного атома, это экситон Френкеля. А открыт был экситон спустя 20 лет, в 1952 г., в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в экспериментах знаменитого советского физика члена-корреспондента АН СССР Е.Ф. Гросса и его аспиранта Н.А. Каррьева. С тех пор экситоны активно исследуются, поскольку ими определяются оптические спектры полупроводников и диэлектриков, особенно при низких температурах.

А если много экситонов в полупроводнике – что будет? Будет экситонный газ, очень похожий на обычный атомарный газ – формулы почти те же. Что происходит с обычным газом, когда его сжимают при низкой температуре? Конденсируется в жидкость. Академик Л.В. Келдыш в 1968 г. предположил и теоретически обосновал, что экситонный газ тоже может конденсироваться в капли металлической жидкости, то есть в металл, который состоит из электронов и дырок. Уже в следующем году электронно-дырочная жидкость была экспериментально обнаружена практически одновременно в Институте радиотехники и электроники АН СССР, в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе и в нашем. Эти работы стали активно развиваться во многих лабораториях мира. Наша группа тоже включилась в эти исследования и нам удалось получить ряд важных результатов. Ответа на вопрос – может ли такая жидкость существовать в двумерных системах – до недавнего времени не было. Точнее, теория давала положительный ответ, а экспериментального подтверждения не было. Буквально несколько лет назад стали появляться работы, в которых жидкость была обнаружена и найдены условия для существования такой жидкости, среди них, в частности, есть и наши работы. Само по себе явление интересное, красивое. Вот чем мы сейчас занимаемся.

– Болезненная тема – отставание российской науки. В наноисследованиях мы отстаем или нет?

– Сложное положение. Уехали многие – хотя я бы так вопрос не ставил: многие уехали, но многие остались, проблема не в том. Руководители Минобрнауки любят толковать, что уехали лучшие, наиболее мобильные, а тех, кто здесь остался, и слушать не надо – это, мол, отстой. Полная чушь! Уехали все, кто хотел уехать, не обязательно самые лучшие. Плохо, что уехало много людей среднего возраста и молодежь уезжает или меняет профессию. Несмотря на это сегодня множество прекрасных специалистов мирового класса работают в России. Или еще: с руководящих этажей прозвучала такая мысль – зачем нам ученые, надо будет, мы их купим. И, кстати, они сейчас придумывают, как покупать.

А проблема совсем в другом: удержать молодого человека в науке очень сложно. Только что мой аспирант, прекрасный парень спустя год сказал – «семейные обстоятельства», и ушел. Никто сейчас не хочет с родителями жить, молодые люди снимают квартиры, особенно если женятся, на это нужна тысяча долларов, и еще почти столько же, чтобы прожить. А зарплата у младшего сотрудника с надбавкой за кандидатскую, да плюс с грантов, может быть тысяч 20-25 наберется – конечно, молодые люди убегают.

Вторая проблема – с научным оборудованием. Реально последний раз массовое обновление оборудования в физике (не буду говорить за другие области науки) произошло в 1986 г., когда была по-настоящему организована программа исследований высокотемпературной проводимости и смежных областей физики. Председателем совета по этой программе был Председатель правительства Н.И. Рыжков, а его заместителем по науке – академик Ю.А. Осипян, и в оснащение коллективов оборудованием были вложены огромные деньги. В лабораториях физиков сейчас доживает как раз то, что тогда удалось получить. Сегодня в каких-то отдельных группах ученых есть хорошее оборудование, но его купили сами исследователи за счет своих грантов, это не есть вложение государства. Дорогое, в частности, технологическое оборудование на эти деньги не купишь. Специалисты есть, а работать им, грубо говоря, не на чем.

Не хочу никого обидеть, но, в отличие от вузов, академическая наука всегда находилась около мирового уровня – где-то выше, где-то на уровне, где-то ниже. Академия привыкла так работать, сложилась психология, традиция – люди стремятся к мировому уровню, в силу возможностей достигают его, всегда ориентируются именно на него. Поэтому и сегодня в Российской академии наук много лабораторий в различных институтах, которые работают на уровне, близком к мировому.

Что же касается исследований твердотельных наноструктур для наноэлектроники и нанофотоники, то в стране они проводятся на приличном уровне примерно в 25 организациях, где ими занимаются 1,5-2 тысячи человек. Их-то и надо обеспечить первоклассным оборудованием. Я не говорю сейчас о других направлениях работ в области нанотехнологий и наноматериалов, так как их хуже знаю. Но, думаю, что приведенное число надо увеличить примерно в 4 раза.

– Исследования ученых могут принести не только благо, но и много вреда – в чем защита человечества?

– Во-первых, в научной добросовестности – это должно быть главным. Во-вторых, человечество стало более осторожным. Когда разрабатывалось ядерное оружие, множество людей умерло от того, что не понимали опасности. В американской книге «Ярче тысячи солнц» рассказывается, как критическую массу определяли, сдвигая отвертками две лодочки с ураном. Сейчас и про наших создателей бомбы стали появляться книги. Подобных примеров огромное количество.

И по поводу нанотехнологий люди уже более-менее понимают, что опасность возможна, что надо изучать – как наночастицы проникают сквозь поры в организм человека, каково взаимодействие различных веществ с наночастицами и так далее. Ну и, в третьих, нужны определенные законы – ученые и политики должны разрабатывать их вместе. С тем же клонированием в разных странах принимают законы, которые контролирует это клонирование. Политики должны слушать ученых. К сожалению, наши политики слушать ученых не любят.

– А, в-четвертых, может быть, защитой выступит религия?

– Я атеист. Мое отношение к введению в школе и в армии России элементов религии – резко отрицательное. Это путь в средневековье. Конечно, культурный человек должен иметь представление об истории мировых религий, но изучать это надо в рамках курсов мировой и отечественной истории, поскольку история религии неразрывно переплетается с историей стран и народов. У нас светское государство, церковь от него отделена. И если уж кто-то склонен к тому, чтобы верить в Бога, он должен к вере прийти сам, навязывать ему этого нельзя. А поскольку и та, и другая очевидные вещи у нас сейчас игнорируются, то в нашем государстве религия становится опасной для развития страны и общества.

– Как вы относитесь к своей профессии физика?

– Всю жизнь, кроме последних лет, когда появилась куча административных обязанностей, занимался тем, что люблю. В школьные годы увлекался фотографией, радиолубительством, любил работать на различных станках и

выяснилось, что все это и многое другое можно совместить в профессии физик-экспериментатор. Любой физический эксперимент – это измерение чего-то. Когда удастся понять, как, например, применить, какой-нибудь старый метод, который, может быть, сто лет как известен, понять, как применить его к новому объекту, или придумать новый метод, или измерить то, что никто никогда не измерял и обнаружить что-то ранее неизвестное, конечно, возникает чувство удовлетворенности. Что любил с детства, тем и занимаюсь – я действительно счастливый человек – повезло с выбором профессии.

Сентябрь 2010

Беседовал **Сергей Шаракшанэ**

E-mail: sash_50@mail.ru

Сайт: <http://sergey-sharakshane.narod.ru>