

## Академик Виталий Гинзбург: Нанотехнологии и сверхпроводимость

Уже 70 лет я занимаюсь физикой (в смысле - работаю в этой области) после окончания в 1938 году физфака МГУ. Но, грешен, о нанотехнологиях узнал лишь несколько лет назад. Конечно, речь не о сути, а о термине, о том, что по-гречески нанос (nanos) - это карлик. Неудобно, конечно же, говорить о “карликовых технологиях”. Основным объектом физики и химии XXI века является микромир - мир молекул, атомов и еще более “маленьких” частиц. Работу же, например, туннельного сканирующего микроскопа и создание различных микросхем можно отнести к нанотехнологиям. Несомненно, какое-то, в первую очередь словесное, выделение нанотехнологий и особое внимание к ним оправданы, но пока что главным достижением в области нанотехнологий у нас является предоставление Российской академии наук новых 10 вакансий академиков и 20 вакансий членов-корреспондентов для лиц, считающих себя нанотехнологами. Несомненно, выборы в мае с.г. будут с успехом проведены и таким образом будет, о чем рапортовать.

Хотелось бы видеть и более “материальные” успехи, поэтому перейду к тому, ради чего в первую очередь пишу эту статью.

Важной, быть может, одной из самых важных проблем в области нанотехнологии является создание комнатно-температурных сверхпроводников. Это утверждение нужно пояснить, что вряд ли возможно, если не обратиться к истории изучения сверхпроводников.

Сверхпроводимость, то есть протекание электрического тока через проводник без сопротивления и, следовательно, без потерь (в первую очередь без выделения тепла), была открыта в 1911 году в Лейдене (Голландия) на примере ртути. В этом случае критическая температура  $T_c$ , выше которой сверхпроводимость исчезает, равна 4,15K (то есть 4,15 градусов Кельвина; в этой температурной шкале нулю градусов Цельсия соответствует 273K). При такой температуре все вещества, кроме гелия, являются уже твердыми, и таким образом охлаждать образец можно только жидким гелием. Но гелий - это довольно редкий и дорогой элемент. Главное же, он сжижается, то есть переходит из газового состояния в жидкое, только при температуре в 4,2K. Получен жидкий гелий был только в 1908 году в том же Лейдене, и целых 15 лет Лейденская криогенная лаборатория была единственным обладателем жидкого гелия. Лишь в 1923 году жидкий гелий был получен в Канаде. У нас (в СССР) жидкий гелий впервые стал доступен в 1932 году в Харькове в результате усилий Л.В.Шубникова - очень талантливого физика-экспериментатора, получившего вскоре ряд важных результатов при изучении сверхпроводимости. Но, увы, его работа была прервана в 1937 году - ученого совершенно безвинно арестовали и расстреляли (ему было всего 36 лет).

Но вернемся к сверхпроводимости. После открытия этого свойства вещества всем стало ясно, что оно сулит огромные выгоды, если его удастся использовать в электротехнике и, конкретно, в линиях электропередачи. Но для этого, очевидно, нужно иметь сверхпроводники, критическая температура  $T_c$  у которых достаточно высока и составляет хотя бы 30°C (30 градусов Цельсия - это около 300K). И вот вся история исследований сверхпроводимости, не говоря об ее изучении как физического явления, происходит под знаком поиска и создания сверхпроводников с возможно более высокой критической температурой  $T_c$ . Эта задача оказалась очень трудной. Несмотря на немалые

усилия, к 1974 году удалось получить вещество с  $T_c \sim 24\text{K}$  ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ )<sup>1</sup>. После этого довольно долго не удавалось найти вещества с более высоким значением  $T_c$ , пока в 1986 году не было обнаружено, что в одном из купратов, содержащих медь,  $T_c \sim 35\text{K}$ . Это и родственные ему вещества часто называют высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП). Я думаю, однако, что ВТСП разумнее называть вещества с  $T_c > 77,4\text{K}$ , то есть те, для которых  $T_c$  выше температуры кипения (при атмосферном давлении) жидкого азота. Такие ВТСП и были получены уже в начале 1987 года. Очевидно, ВТСП уже можно охлаждать для перехода в сверхпроводящее состояние жидким азотом, который несравненно дешевле и доступнее жидкого гелия. Открытие ВТСП привело к подлинному буму, одним из проявлений которого явилось присуждение Нобелевской премии по физике уже в 1987 году за открытие упомянутых купратов с  $T_c \sim 35\text{K}$  (как ясно из сказанного, они еще не являются ВТСП при указанном выше определении ВТСП). Однако именно на их базе (при изменении их состава путем введения некоторых элементов) получают подлинные ВТСП. В результате многочисленных исследований к настоящему времени удалось получить ВТСП с  $T_c \leq 135\text{K}$  при атмосферном давлении (при высоком давлении достигнуто значение  $T_c = 165\text{K}$ ). Нужно сказать, что крайне оптимистические надежды, связанные с открытием ВТСП, в основном не оправдались, ибо известные ВТСП материалы (керамики) нелегко использовать в технике. Но все же, например, кабели для электропередачи на основе ВТСП уже сделаны и применяются.

Стоящая сегодня задача состоит в том, чтобы найти или создать вещества с  $T_c \sim 300\text{K}$ , то есть комнатно-температурные сверхпроводники (КТСП). Эта цель кажется вполне достижимой, если подходить к делу чисто формально, ведь за примерно 100 лет (с 1911 года по настоящее время)  $T_c$  для известных сверхпроводников возросла в 25-40 раз (с 4,15K для ртути до 100-135K в известных ВТСП). Казалось бы, поднять  $T_c$  еще раза в три должно быть не так уж трудно. Но так рассуждать, конечно, нельзя - получение КТСП является очень трудной задачей.

Эта задача, насколько мне известно, была поставлена в реальном плане только в 1964 году (до открытия ВТСП) Б.Литтлем (США) и мною. После этого в Теоретическом отделе ФИАН была создана группа теоретиков во главе с Д.А.Киржницем и мною, которые занялись анализом возможностей создания ВТСП и КТСП. Плодом нашей работы явилась книга “Проблема высокотемпературной сверхпроводимости”, изданная у нас в 1977 году (М.: “Наука”) и в английском переводе в 1982 году. Эта книга оставалась единственной в мировой литературе на тему о ВТСП и КТСП вплоть до тех пор, пока ВТСП не была открыта в 1986-1987 годах. В нашей работе было опровергнуто имевшееся в литературе утверждение о том, что ВТСП вообще невозможна. Были указаны также некоторые пути, ведущие к цели (слоистые квазидвумерные соединения и т.п.). Как это обычно бывает в подобных случаях, к нашей деятельности до 1987 года относились весьма скептически, и даже недоброжелательно (как сейчас помню одного физика, с кривой улыбкой спрашивающего меня: “Ну, как дела с вашей жаропрочной сверхпроводимостью?”).

После открытия ВТСП положение коренным образом изменилось, и работы по сверхпроводимости посыпались как из рога изобилия. Тем не менее до сих пор многое в отношении ВТСП остается неясным, ибо эти материалы оказались очень сложными. Особенно важно, что окончательно не выяснен механизм ВТСП и, конкретно, такой же он, как в низкотемпературных сверхпроводниках, или какой-то другой. Но писать об этом здесь было бы, к сожалению, неуместно (см., например, журнал “Успехи физических наук” **175** 187 (2004) и **178** №2 (2008); журнал имеется в Интернете: [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)).

Здесь достаточно сказать, что в других странах сейчас энергично ведется работа по дальнейшему изучению ВТСП. Особенно впечатляюще эксперименты Ивана Бозовича (это американец сербского происхождения), работающего в Брукхэвенской лаборатории в

---

<sup>1</sup>  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  это сплав ниобия с германием. Более известен и, главное, важен с точки зрения практических применений сплав  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (Sn – олово) с  $T_c = 18,1\text{K}$  (получен в 1954 году).

США (его доклад публикуется в УФН 178 №2 (2008) и уже доступен на сайте [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)). Теоретики продолжают активно обсуждать возможности создания КТСП.

Поскольку вопрос не выяснен, могу лишь высказать свое мнение. Думаю, что создание КТСП особенно вероятно с использованием так называемого электрон-фононного взаимодействия<sup>2</sup> в веществах, где это взаимодействие достаточно сильное. Для этого, в частности, нужны вещества с соответствующей кристаллической решеткой. Вообще же, создание веществ с заданной кристаллической структурой - это одна из важнейших задач физики твердого тела. Сделать кое-что здесь можно традиционными химическими методами, но они весьма ограничены. Будущее здесь принадлежит нанотехнологиям. В настоящее время для вещества с известной кристаллической решеткой можно определить все его свойства как экспериментально, так и теоретически, в том числе рассчитать критическую температуру сверхпроводимости  $T_c$ . Но вот обратная задача еще не решена: как оптимизировать кристаллическую решетку для получения заданной величины такого “интегрального” параметра, как  $T_c$ , или некоторых других параметров, улучшающих практические свойства используемых нами веществ. Это задача и теоретическая (поскольку метод перебора природно существующих комбинаций достиг границ применимости), и экспериментальная (модельных расчетов совершенно недостаточно). Создание КТСП - это получение искусственных структур с определенным электронным спектром и сильным электрон-фононным взаимодействием. Сложность этой задачи обуславливается отсутствием так называемого малого параметра и необходимостью учета электронных корреляций. В то же время сверхпроводимость значительно менее чувствительна к “чистоте технологии” по сравнению с эффектами, наблюдаемыми (и используемыми) в полупроводниковых структурах. Это связано с тем, что характерные для сверхпроводников плотности электронов существенно больше, чем для полупроводников, и потому сверхпроводящие материалы менее чувствительны к дефектам и остаточным примесям - “грязи”, определяемой возможностями технологии. Это позволяет, в принципе, конструировать искусственные слоистые сверхпроводниковые наноструктуры, нанося атомные слои не только из тех материалов, у которых параметры кристаллической решетки близки друг к другу (как требуется для полупроводниковых структур). Таким образом, можно использовать гораздо большее разнообразие проводников и диэлектриков, нанося их монослои с атомной точностью для создания искусственного электронного и фононного спектров. Именно это позволяет сделать исследования сверхпроводящих материалов неким “полигоном” для отработки нанотехнологических методов для сильно-коррелированных структур.

Итак, создание КТСП - это, в значительной мере, нанотехнологическая проблема и, на мой взгляд, одна из важнейших. Для исследования этой проблемы нужно иметь современную лабораторию типа упомянутой лаборатории И.Бозовича в США. Но у нас такой лаборатории нет. Между тем во времена СССР мы были в первом ряду в изучении сверхпроводимости. Необходимо возродить в России исследования в этой области. Для этого имеются подходящие возможности. Я инициировал такой проект в 2006 году. Призыв не остался без ответа, вижу в этом признаки новой политики, направленной на осуществление долгосрочных проектов. Министр образования и науки Андрей Фурсенко помог начать создавать лабораторию. Инициативу поддержал и директор Физического института им. П.Н.Лебедева РАН академик Геннадий Месяц, в институте был создан Центр высокотемпературной сверхпроводимости и наноструктур. В настоящее время в

---

<sup>2</sup> Электрон-фононное взаимодействие - это взаимодействие электронов проводимости с колебаниями атомов и ионов, образующих кристаллическую решетку твердого тела. Эти колебания представляют собой совокупность звуковых волн, на квантовом языке называемых фононами.

Правительстве РФ рассматривается проект инвестиций в центр. К сожалению, порядки внутри академии таковы, что все это дело очень затягивается.

Хочу надеяться, что Центр высокотемпературной сверхпроводимости и наноструктур станет одной из узловых точек создаваемой в стране инфраструктуры нанотехнологий, будет источником красивых физических результатов, генератором знаний о методах создания новых материалов, базой для подготовки квалифицированных специалистов, исходной точкой для так называемого трансфера технологий.