

**CHEMICAL
SUPERCONDUCTORS –
TEN YEARS
AFTER ITS DISCOVERY**

Yu. D. TRETYAKOV

The paper deals with the most important events and achievements in the history of high temperature chemical superconductors.

В статье рассмотрены важнейшие события и достижения в истории высокотемпературных химических сверхпроводников.

**ХИМИЧЕСКИЕ
СВЕРХПРОВОДНИКИ – СПУСТЯ
ДЕСЯТЬ ЛЕТ ПОСЛЕ ОТКРЫТИЯ**

Ю. Д. ТРЕТЬЯКОВ

*Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова*

*Мы никогда не старимся настолько,
Чтобы не верить в чудеса.*

У. Дисней

Удивительные события, участником и свидетелем которых мне посчастливилось стать десять лет назад, перестали теперь волновать многих исследователей, озабоченных более проблемой выживания, чем творческими исканиями. Но, к счастью, университетские аудитории и сейчас ежегодно заполняются молодежью, для которой атмосфера научного поиска и радость открытия остаются средним смыслом жизни. Им-то и адресована эта история, которая продолжается и сейчас несмотря на то, что каждый шаг вперед стоит все больших усилий. Начало этой истории положил в 1911 году голландский физик Х. Камерлинг-Оннес, впервые получивший жидкий гелий и открывший путь к систематическим исследованиям материалов при температурах, близких к абсолютному нулю. Он обнаружил, что при 4 К ртуть полностью теряет электрическое сопротивление и становится сверхпроводником (СП). В 1933 году В. Мейснер и Р. Оксенфельд показали, что СП одновременно является идеальным диамагнетиком, то есть полностью выталкивает линии магнитного поля из объема СП. Все это открыло фантастические возможности для создания эффективных систем производства, накопления и передачи энергии на большие расстояния, сверхмощных генераторов, высокоскоростного транспорта на магнитной подушке, мощных магнитных систем, необходимых для осуществления термоядерного синтеза, ускорителей элементарных частиц, сверхбыстрых ЭВМ и чувствительных диагностических устройств, способных реагировать на мельчайшие отклонения в психическом состоянии человека (рис. 1). Однако длительное время на пути к практической реализации этих идей существовала фундаментальная преграда – крайне низкая температура перехода в СП-состояние, называемая также критической температурой. За 75 лет ее удалось поднять до 23,2 К (рекордсменами оказались сплавы ниобия с германием), что означало необходимость использования в качестве хладагента дорогого и крайне капризного в эксплуатации жидкого гелия. Прогресс в создании материалов с более высокой критической температурой (T_c) давался с огромным

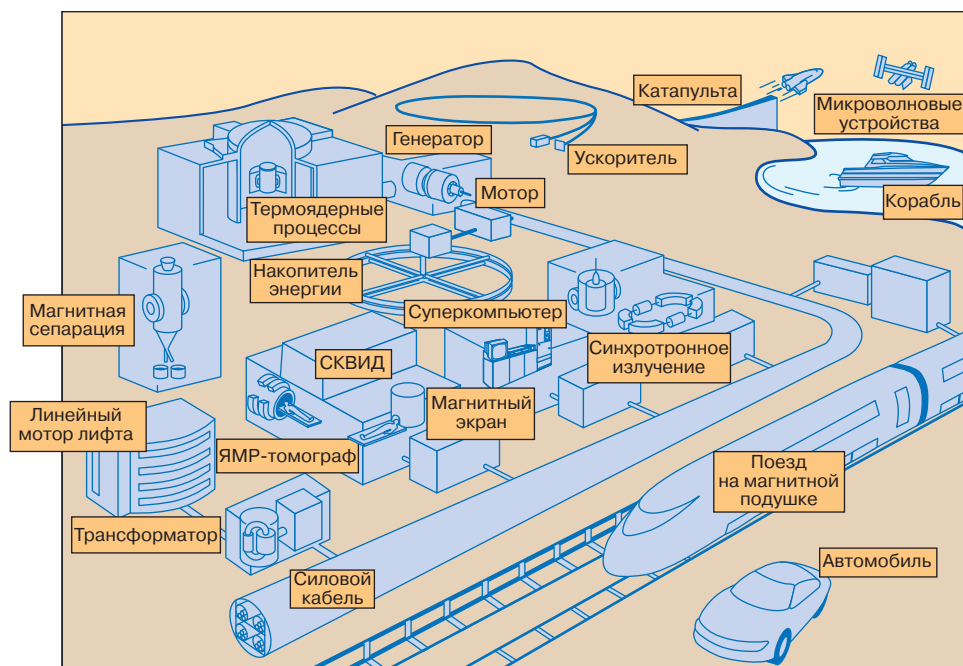


Рис. 1. Возможные области использования сверхпроводящих материалов

трудом, и Британское королевское общество в начале 80-х годов учредило премию в 10 тыс. фунтов стерлингов за повышение критической температуры на один градус. Но самое печальное состояло в том, что общепризнанные теории СП не только не нацеливали исследователей на прорыв температурного барьера СП, а даже порождали неверие в принципиальную возможность такого прорыва, рассматривая его как своеобразный перпетуум-мобиле. Поэтому громом среди ясного неба стала публикация 18 октября 1986 года в журнале “Zeitschrift für Physik” статьи швейцарских ученых И. Беднорца и К. Мюллера о способности керамики на основе оксидов меди, лантана и бария ($\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$) переходить в СП-состояние при 30 К. Логика открытия первого из так называемых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) лучше всего описана в лекции, прочитанной авторами открытия при вручении им Нобелевской премии и опубликованной в переводе на русский язык в журнале “Успехи физических наук” в 1988 году.

Самым поразительным в этом открытии было то обстоятельство, что сверхпроводимость проявляли не особые органические или полимерные структуры, на которые возлагали надежды физики-теоретики, а оксидная керамика, для которой более характерны диэлектрические или полупроводниковые свойства. Но больше всего потрясло специалистов то, что оксидные композиции, на которых И. Беднорц и К. Мюллер обнаружили СП, были синтезированы довольно давно. В 1978 году это сделали сотрудники Института общей и неорганической химии

им. Н.С. Курнакова РАН В. Лазарев, Б. Кахан и И. Шапльгин, опубликовавшие свои результаты год спустя в “Журнале неорганической химии”. Говорят, что они пытались исследовать синтезированные образцы, но жидкий гелий был им недоступен, как недоступен он оказался и для французских исследователей (К. Мишель, Б. Раво), синтезировавших несколько позже аналогичные и многие другие купраты независимо от российских коллег. Трагична судьба первооткрывателей – двое (В. Лазарев и И. Шапльгин) преждевременно ушли из жизни, третий (Б. Кахан) эмигрировал в США и перестал заниматься наукой.

Но вернусь к Беднорцу и Мюллеру, которые, разумеется, не были плагиаторами, а нашли то, что искали целеустремленно и настойчиво вопреки прогнозам и теориям. Главная заслуга швейцарских ученых состояла в том, что их первоначальный и сравнительно скромный успех разрушил все теоретические, технологические и даже психологические барьеры и позволил в течение короткого времени создать новые, еще более совершенные поколения оксидных СП, что было сделано почти одновременно в США, Японии, Китае и России. Но этот скачок был подготовлен всей логикой развития химии твердофазных материалов. То, что казалось гениальной, но случайной находкой для специалистов в области СП, по существу было закономерным результатом развития неорганической химии на стыке с физикой твердого тела.

Хронология событий передает их высокий динамизм: январь 1987 года – несколько лабораторий США, Японии и Китая подтверждают открытие швейцарских исследователей; февраль 1987 года – исследователи Техасского университета под руководством профессора К. Чу синтезируют СП-керамику из оксидов бария, иттрия и меди $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с критической температурой $T_c = 93$ К, то есть выше точки кипения жидкого азота.

Это фантастическое открытие стало известно научному сообществу 2 марта 1987 года благодаря публикации в журнале “Physical Review Letters” и ознаменовало новый виток гонки, в результате которой были синтезированы редкоземельные аналоги иттрий-бариевого купрата, то есть соединения состава $\text{LnBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с критической температурой 85–95 К. Любопытно, что впервые благодаря электронной почте научная информация распространилась повсюду с огромной скоростью и потребовались лишь одна-две недели, чтобы исследователи многих стран воспроизвели, а в некоторых случаях превысили достижение группы Чу. В нашей стране это было впервые сделано группой химиков и физиков Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, впервые ощутивших себя в положении сямских близнецов, способных достичь успеха только в сотрудничестве друг с другом.

В апреле 1987 года были созданы первые образцы СП оксидных пленок и покрытий, проволок и соленоидов, показавшие, что высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) может стать технической реальностью. Вот тогда-то сверхпроводимость из проблемы научной превратилась в проблему государственную. Хорошо помню погожий день 26 мая 1987 года, когда профессионалы-исследователи и политики встретились вместе, чтобы, по сути дела, дать старт государственной программе по ВТСП. Важнейшей ее частью стала программа фундаментальных и прикладных исследований, в которой важное место отводилось решению химических и технологических проблем. И это не случайно, если учесть, что большинство ВТСП-материалов являются исключительно сложными по составу оксидными фазами переменного состава, крайне чувствительными к условиям синтеза, термообработки и последующей эксплуатации. Они по праву получили название химических СП, так как именно химические факторы (состав, кристаллическая и керамическая структура, способ приготовления и переработки исходных реагентов, условия термической обработки и спекания) в первую очередь определяют важнейшие технические параметры СП, будь то критическая температура, критическое магнитное поле или критическая плотность тока.

За прошедшие десять лет химия ВТСП достигла значительных успехов. В первую очередь это касается синтеза новых химических сверхпроводников с более высокой T_c . Среди них следует назвать откры-

тую в январе 1988 года Х. Маеда (Япония) серию соединений состава $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$, среди которых фаза с $n = 3$ имеет $T_c = 110$ К. Месяц спустя американский физик А. Херман синтезировал сверхпроводник $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ с $T_c = 125$ К.

После длительного периода затишья в 1993 году произошел новый прорыв, совершенный международной командой исследователей, в которой главную роль сыграли молодые российские химики – сотрудники МГУ Е. Антипов и С. Путилин. Ими были синтезированы ртутьсодержащие сверхпроводники состава $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ ($n = 1-6$), где δ – индекс нестехиометрии по кислороду. Температура перехода в СП-состояние возрастает от первого члена семейства ($n = 1$) до третьего ($n = 3$), а затем уменьшается. Структуры первых трех представителей Hg-содержащего семейства показаны на рис. 2. Атомы Cu располагаются в октаэдрах (Hg-1201), в пирамидах (Hg-1212) и одновременно в пирамидах и квадратах (Hg-1223), образованных атомами кислорода. Атомы кислорода в слое с катионами ртути (обозначены малыми серыми шарами) создают необходимую концентрацию дырок в зоне проводимости и способствуют появлению СП. Рекордсменом в настоящее время является $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (Hg-1223), имеющий критическую температуру 135 К. При наложении внешнего давления 350 тыс. атм температура перехода возрастает до 164 К, что лишь на 19 К уступает минимальной температуре, зарегистрированной в природных условиях на поверхности Земли (рис. 3).

Есть ли надежда достигнуть большего? Время от времени в печати появляются сенсационные сообщения о создании СП с T_c выше комнатной температуры. Последний раз с таким утверждением выступила группа французских исследователей из Лиона, заявившая о достижении успеха на синтезированных ими смешанных гидридах магния и бериллия. И хотя безмедные СП известны довольно давно, известно и то, что на них никогда не удавалось достичь сколько-нибудь высокой температуры перехода в СП-состояние (максимальные значения T_c для безмедных СП достигнуты у $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ (30 К) и у фазы внедрения на основе фуллерена ($\text{C}_{30}\text{C}_{60}$). Поэтому сообщение из Лиона было встречено специалистами как первоапрельская шутка и после экспериментальной проверки дружно отвергнуто всеми. Злые языки говорят, что “утка” из Лиона, появившаяся на свет накануне принятия во Франции бюджета, имела целью повлиять на лиц, принимавших решение. Кстати, размеры государственных субсидий на реализацию национальных программ по ВТСП (а такие программы были приняты в 1987–1988 годах в большинстве развитых стран) резко сократились почти везде, пожалуй, за исключением Японии, где, как и десять лет назад, они составляют величину порядка 200 млн долларов в год. И эта разница отражает принципиально различные стратегию и национальные надежды, связанные с

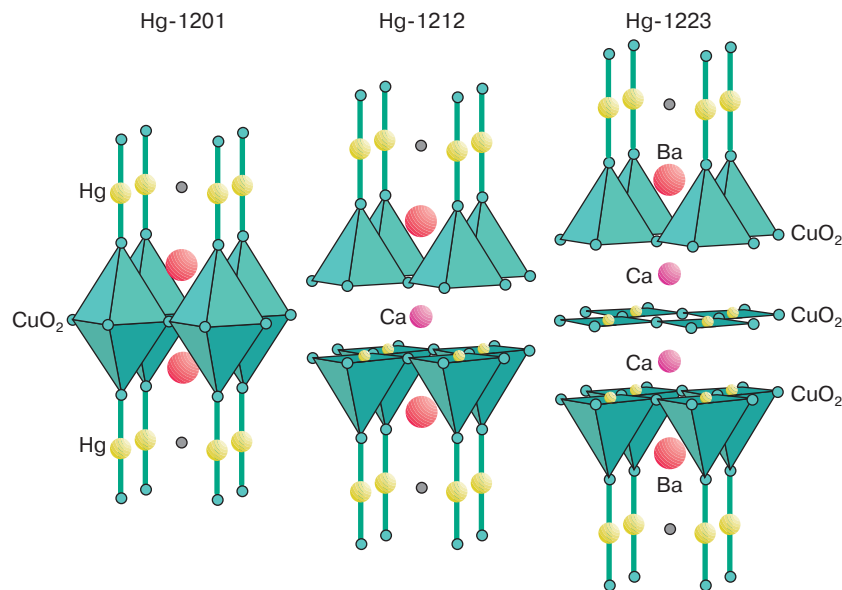


Рис. 2. Структуры первых трех членов гомологического ряда $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ ($n = 1, 2$ и 3 для Hg-1201, Hg-1212 и Hg-1223 соответственно)

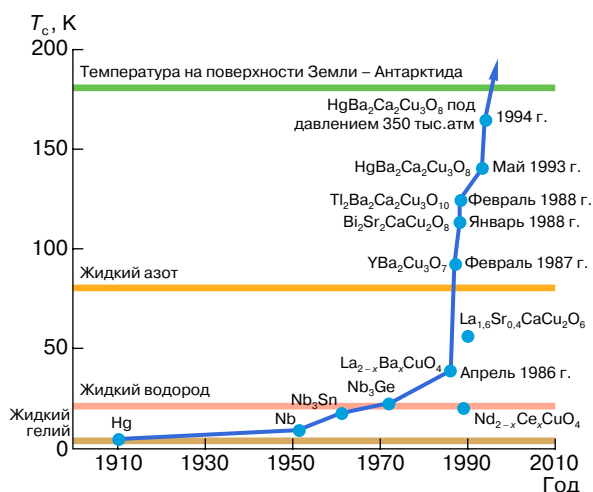


Рис. 3. Эволюция в создании новых поколений сверхпроводников

использованием высокотемпературных сверхпроводников. Ведь не случайно именно в Японии в этом году бюджетные расходы на науку были резко увеличены несмотря на пессимистическую в целом экономическую ситуацию в стране. В любом книжном магазине Токио или Осаки, как и десять лет назад, можно найти много книг, посвященных сверхпроводимости, начиная с переводов монографий академика В. Гинзбурга и кончая красочными комиксами, в которых незамысловатые жизненные истории переплетаются с коллизиями, созданными открытием и применением ВТСП. Кстати, именно

в Токио функционирует единственный в мире международный центр сверхпроводимости, который привлекает многих зарубежных исследователей, включая моих российских коллег.

Что касается России, то расходы, связанные с реализацией программы по ВТСП, за десять лет сократились почти на два порядка и это побудило некогда обширную по масштабам деятельность сократить до нескольких приоритетных областей. Но за первые несколько лет после открытия ВТСП было сделано немало. Помимо синтеза новых типов химических СП большое внимание уделялось разработке новых методов синтеза и технологии получения керамических прекурсоров, включая методы соосаждения, золь-гель-процессы, криохимическую технологию. Большие успехи были достигнуты в изучении термодинамики и равновесных условий образования химических СП, процессов химической и токовой деградации, в разработке эффективных химических методов получения СП тонких пленок и покрытий, монокристаллов и вискеров (монокристаллических волокон).

Но безудержная эйфория первых лет после открытия химических СП сменились глубоким скепсисом, в котором были повинны, пожалуй, сами исследователи. Немногие из них, особенно химики и технологи, осознали фундаментальные различия металлических сверхпроводников и СП-купратов, которые на первых порах создавали, казалось бы, непреодолимые преграды на пути технического использования последних. Дело в том, что в подавляющем большинстве случаев возможность практического использования сверхпроводниковых

материалов связана со способностью их в СП-состоянии противостоять разрушающему действию мощных магнитных полей, неизбежно возникающих при пропускании тока. Чем выше критический ток (максимальный ток, при котором сохраняется СП), тем больше перспектив использовать сверхпроводниковый материал в технике. Например, в системах, генерирующих, аккумулирующих и транспортирующих электрический ток, при создании транспорта на магнитной подушке или в ЯМР-томографах сверхпроводимость должна сохраняться при токах порядка 10^5 А/см² в магнитном поле от 2 до 10 Т. Такова же величина критического тока для СП-материалов, используемых в микроэлектронике, вычислительной технике, сквид-устройствах и для магнитного экранирования, но в этих случаях требования по отношению к магнитному полю не столь категоричны (от 0,01 до 0,1 Т).

Между тем оказалось, что первые образцы сверхпроводниковых купратов имели более чем скромную величину критического тока $I_c \cong 1$ А/см². Переход от металлических СП к керамическим решал проблему повышения T_c и вместе с тем создавал проблему резкого уменьшения критических токов. Последнее было следствием фундаментальных различий металлических и керамических СП. Если первые изотропны и имеют длину когерентности до 200 Å, то вторые сильно анизотропны и в них длина когерентности не превышает 20 Å. Как следствие в поликристаллическом состоянии граница раздела кристаллитов в металлических СП соизмерима с длиной когерентности и создает эффективную преграду движению магнитных вихрей, повышая критический ток. В химических же сверхпроводниках это не так, особенно если поликристаллические материалы на их основе получать с использованием традиционных керамических процессов, как и происходило на первых порах, пока исследователи считали, что с купратами надо обращаться так же, как с обычной керамикой. Но, как говорят, клин вышибают клином, и первым это понял П. Макджин, применивший для получения СП-керамики расплавную технологию, традиционно используемую при получении металлических, а не керамических материалов. В настоящее время известно много вариантов расплавной технологии. Все их оказалось возможным реализовать благодаря исключительной легкоплавкости СП-купратов по сравнению с традиционной керамикой на основе MgO, Al₂O₃ или ZrO₂.

Некоторая специфика СП-керамики состоит в том, что из-за сложности химического состава она плавится инконгруэнтно, то есть с образованием оксидного расплава и новой твердой фазы. При плавлении YBa₂Cu₃O₇ образующийся расплав обогащен оксидами бария и меди, а твердая фаза имеет состав, соответствующий формуле Y₂BaCuO₅. При охлаждении происходит обратный процесс, но, тщательно контролируя условия кристаллизации, его стремятся осуществить так, чтобы получить ке-

рамику с оптимальной керамической структурой — с определенным размером, формой и ориентацией кристаллитов. Важнейшей особенностью продукта расплавной технологии является его характерная структура, образованная кристаллитами СП-фазы YBa₂Cu₃O₇, правильно ориентированными относительно друг друга, и микровключениями фазы Y₂BaCuO₅, гомогенно распределенными в объеме. Иначе говоря, продукт расплавной технологии, как правило, неоднороден. Но, как говорят, нет худа без добра, поскольку именно включения несверхпроводящей фазы ответственны за появление дополнительных центров пиннинга, то есть торможения магнитных вихрей, следствием чего является значительное увеличение устойчивости СП-состояния в магнитном поле. Здесь уместно отметить принципиальную разницу между двумя важнейшими характеристиками СП: критической температурой и критическим током. Если первая является фундаментальным параметром, определяемым в первую очередь составом и особенностями кристаллической структуры, включая ее дефекты, то вторая относится к числу так называемых структурно-чувствительных параметров, обусловленных особенностями керамической структуры (микроструктуры), и формируется благодаря изменениям в технологии получения и термической обработки СП-материалов.

Итак, переход к расплавленным методам стал своеобразной революцией в технологии ВТСП-керамики, поскольку именно он открыл путь к техническому использованию последней, хотя бы в тех областях, где можно ограничиться использованием малых магнитных полей (микроэлектроника, ЭВМ, магнитное экранирование). Во всех остальных случаях, где возникновение сильных магнитных полей неизбежно, длительное время предпочтение отдавали СП-керамике на основе висмут-кальций-стронциевых купратов, для которых зависимость критического тока от величины магнитного поля заметно меньше, чем у керамики на основе иттрий-бариевых купратов. Но менее трех лет назад произошло событие, которое позволяет утверждать, что круг замкнулся. Первое поколение ВТСП, с которого начинается эта история, вновь оказалось в центре внимания, когда благодаря существенному продвижению вперед в понимании того, как можно и нужно воздействовать на сложную систему типа La—Ba—Cu—O, удалось ее недостатки обратить в достоинства. Все началось с того, что у редкоземельных аналогов YBa₂Cu₃O₇, включая LaBa₂Cu₃O₇, обнаружили способность сохранять СП-состояние вплоть до 95–100 К. Если этого не удалось достичь на заре создания ВТСП, то лишь потому, что в отличие от YBa₂Cu₃O₇, сохраняющего фиксированную катионную стехиометрию в широком интервале параметров состояния, его аналоги, содержащие вместо иттрия легкие редкоземельные элементы, являлись фазами со значительной катионной нестехиометрией Ln_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O₇, определяемой температурой

и парциальным давлением кислорода. Это, в свою очередь, означает, что изменение технологических параметров, мало сказывающееся на свойствах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, оказывается крайне важным при формировании свойств его редкоземельных аналогов. Оно сводится не только к изменению T_c , но и к открытию недавно в $\text{Ln}-\text{Ba}-\text{Cu}-\text{O}$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Eu}$) пик-эффекту, заключающемуся в существенном увеличении критического тока в сильных магнитных полях (рис. 4). Открытие указанного эффекта стало значительным событием, породившим новые надежды на возможность радикального улучшения технологии и технологических параметров сверхпроводниковых материалов.

Природа пиннинга, связанного с появлением пик-эффекта, принципиально отличается от пиннинга, обусловленного введением гетерофазных несверхпроводящих включений типа 211 (422) фазы. Изучение в монокристаллах Nd123 микроструктурных изменений, сопутствующих пик-эффекту, позволило предположить, что пиннинг возникает за счет твердофазного распада $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с образованием наноразмерных участков твердых растворов, обогащенных неодимом и отличающихся заметно более низкой T_c , чем у Nd123 стехиометрического состава, получаемого в восстановительных условиях. Как следствие указанные включения твердых растворов $\text{Nd}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_7$ становятся в сильных магнитных полях несверхпроводящими и создают сильный пиннинг.

Если пик-эффект связывать с таким твердофазным распадом, то станет понятна наблюдаемая экспериментально обратимость, но неясно, почему пик-эффект проявляется лишь в определенном, достаточно узком интервале температур термической обработки и исчезает за его пределами как в сторону увеличения, так и понижения температур. Нам ка-

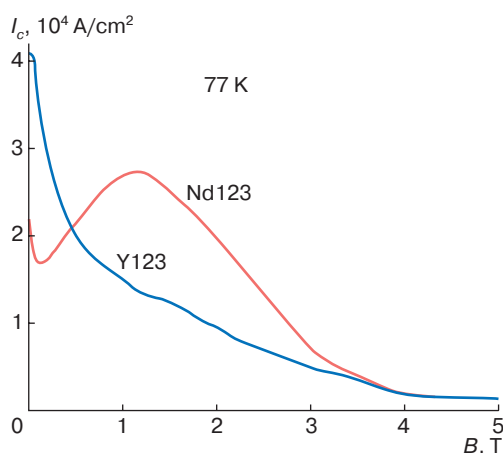


Рис. 4. Зависимость плотности критического тока J_c от величины внешнего магнитного поля B . Y123 — $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, Nd123 — $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

жется, что особенности появления и исчезновения пик-эффекта естественно объясняются, если предположить, что при высоких температурах в стехиометрической по катионному составу фазе Nd123 ($\text{Sm}123$) происходит значительное антиструктурное разупорядочение, то есть переход ионов неодима и бария из регулярных позиций кристаллической решетки в несвойственные им позиции в результате обмена местами.

В пользу такого разупорядочения свидетельствует: 1) легкость образования твердых растворов со значительным избытком неодима; 2) повышение T_c по мере отклонения состава в сторону дефицита Nd (или, что то же, избытка Ba), которое естественно связывать с акцепторной активностью избыточных ионов бария, способствующих появлению дополнительного количества свободных дырок. Закалка (быстрое охлаждение) до комнатных температур приводит к значительному пересыщению системы антиструктурными дефектами, то есть ионами бария и неодима в нерегулярных позициях. Эти дефекты из-за низкой подвижности катионов сохраняются неизменными в метастабильном состоянии. Повышение температуры отжига до 500°C делает дефекты значительно более подвижными и наблюдается указанный выше твердофазный распад, как это происходило бы при кристаллизации из пересыщенного раствора.

При температуре выше или равной 600°C антиструктурные дефекты, то есть ионы бария и неодима в нерегулярных позициях становятся более подвижными, но степень пересыщения ими структуры заметно падает по сравнению с 500°C . Таким образом, лишь в определенном ограниченном интервале температур, близких к 500°C , антиструктурные дефекты являются эффективными центрами кристаллизации из пересыщенной ими системы.

Указанная модель может быть подтверждена в результате более обстоятельного изучения системы $\text{La}-\text{Ba}-\text{Cu}-\text{O}$, в которой по размерным соображениям (большее сходство La с Ba по сравнению со всеми легкими РЗЭ) можно ожидать большей степени антиструктурного катионного разупорядочения, чем в системе $\text{Nd}-\text{Ba}-\text{Cu}-\text{O}$.

Было бы несправедливо, обсуждая проблему химических сверхпроводников на примере объемной керамики, обойти вниманием другие виды сверхпроводящих материалов. Для физика совершенные тонкие пленки, монокристаллы и вискры оксидных сверхпроводников несравненно более привлекательны, чем объемная керамика, так как существенно облегчают интерпретацию экспериментальных результатов и позволяют сделать фундаментальные выводы, важные для разработки теории сверхпроводимости. Более того, СП-пленки и гетероструктуры с их участием незаменимы для создания СВЧ-резонаторов и микроволновых фильтров с техническими параметрами, значительно превосходящими

традиционные материалы. Еще более масштабны перспективы создания сильноточных систем с использованием толстых пленок и покрытий на металлических подложках (Ni) с кубической структурой.

Интерес к СП-оксидным пленкам побудил исследователей развивать новые методы их получения, среди которых в первую очередь выделяются так называемые МОСVD-процессы, то есть процессы получения пленок из высоколетучих металлоорганических предшественников путем транспорта последних через газовую фазу и осаждения оксидных продуктов термического разложения на специальных монокристаллических подложках. Для получения эпитаксиальных пленок высокого качества исключительно важно их структурное сходство с подложкой. При отсутствии такового прибегают к нанесению специальных эпитаксиальных подслоев, как это делают, например, при получении пленок $\text{LuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ на дешевой и технологичной подложке из сапфира, разделяя их тонким подслоем CeO_2 , то есть создавая гетероструктуру $\text{LuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7|\text{CeO}_2|\text{Al}_2\text{O}_3$.

Кстати, в СП-пленках удается достичь рекордно высоких значений критических токов и других технических параметров. В качестве примера может служить все тот же $\text{LuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, для которого получены пленки с критическим током $2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$. Физикохимия МОСVD-процессов не менее сложна, чем в методах расплавной технологии и требует постановки фундаментальных термодинамических и кинетических исследований, а также создания оригинальных химических реакторов, позволяющих в той или иной мере избежать неприятностей, обусловленных неодинаковым поведением реагентов в смеси металлоорганических соединений, используемых для получения оксидных пленок и покрытий. Значительный вклад в этом направлении был сделан группой исследователей МГУ под руководством Соросовского профессора А.Р. Кауля. Следует отметить, что костяк этой группы составляют Соросовские аспиранты и Соросовские студенты кафедры неорганической химии химического факультета МГУ, выпускниками которой в разное время были и другие важные действующие лица этой истории – “неудачник” И. Шаплыгин и достигшие успеха Е. Антипов и С. Путилин, равно как и лауреаты Государственной премии России среди молодых ученых О. Горбенко, Д. Григорашев и Е. Гудилин. Последнего читатели могут видеть на рис. 5, иллюстрирующем эффект левитации в системе, состоящей из магнитного диска, парящего над диамагнитным керамическим постаментом, изготовленным из высокотемпературного сверхпроводника на основе купрата иттрия и бария.



Рис. 5. Левитация магнитного диска над диамагнитным керамическим постаментом

Итак, история химических сверхпроводников продолжается и пусть в ней достойное место займут те, для кого идея новой технической революции столь же привлекательна, как и прежде, кто никогда не старится настолько, чтобы не верить в чудеса, рожденные явлением сверхпроводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беднорц И.Г., Мюллер К.А. // Успехи физ. наук. 1988. Т. 156, вып. 2. С. 323–346.
2. Гинзбург В.Л., Андришин Е.А. Сверхпроводимость. М.: Педагогика, 1990.
3. Мняк М.Г. Сверхпроводники в современном мире. М.: Просвещение, 1991. 158 с.
4. Melt Processed High-Temperature Superconductors / Ed. M. Murakami. Singapore: World Sci., 1992. 361 p.
5. Третьяков Ю.Д., Казин П.Е. // Неорг. материалы. 1993. Т. 29. С. 1571–1581.
6. Антипов Е.В., Путилин С.Н. // Российская наука: Выстоять и возродиться. М.: Наука, 1997. С. 154–159.

* * *

Юрий Дмитриевич Третьяков, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой неорганической химии химического факультета МГУ, действительный член РАН. Область научных интересов – неорганическая химия и химическая синергетика. Автор десяти монографий и свыше 500 научных статей и изобретений.