

УДК 621.59(075.8)

С.И. Бондаренко

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, проспект Ленина, 47,
г. Харьков, Украина, 61103
e-mail: bondarenko@ilt.kharkov.ua

Г.К. Лавренченко

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украины, 65082
e-mail: uasigma@paco.net

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

На основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) уже сейчас могут решаться различные актуальные прикладные задачи. Сделан обзор состояния и работ в области ВТСП. Показано, каких результатов удалось достичь за 25 лет создания и исследования ВТСП. Приведены данные об основных областях применения ВТСП, проблемах и перспективах этого научно-технического направления.

Ключевые слова: Сверхпроводимость. Высокотемпературные сверхпроводники. Критическая температура. СКВИД.

S.I. Bondarenko, G.K. Lavrenchenko

HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS AND SOME ASPECTS OF THEIR APPLICATION

Based on the high temperature superconductors (HTSC) different actual applied problems can be solved already. Conclude with an outlook state and works in the field of HTSC. It is shown which results have been achieved in 25 years creation and studies of HTSC. It presents data on main areas of application HTSC, problems and prospects this scientific and technical direction.

Keywords: Superconductivity. High-temperature superconductors. Critical temperature. SQUID.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исполнилось 100 лет со дня открытия сверхпроводимости. В 1911 г. голландский физик *Камерлинг-Оннес* изучал поведение ртути при низких температурах. Результат этого исследования оказался неожиданным: при температуре ниже 4,15 К электрическое сопротивление ртути почти мгновенно исчезло.

Этот опыт проводился при довольно низкой температуре, которую можно было получить только с помощью жидкого гелия. Его впервые оживил тот же Камерлинг-Оннес в 1908 г. [1]. Сложность поддержания гелиевых температур долгие годы сдерживала экспериментальные работы. Что же касается теории сверхпроводимости, то объяснение этого явления на микроскопическом уровне было сделано лишь в 1957 г. американскими физиками (*Бардин, Купер и Шриффер*). Поиски новых сверхпроводников для так называемой сейчас НТСП (низкотемпературной сверхпроводимости) велись непрерывно. Однако необходимые для их поддержания в сверхпроводящем состоянии температуры не выходили из области гелиевых. Так, самым «высокотемпературным» на сегодняшний день среди НТСП является материал на основе Nb_3Ge с

критической температурой $T_c=23,2$ К. Критическое магнитное поле у него при экстраполяции к 0 К составляет 400 Гс. Низкотемпературные сверхпроводники используются в недавно введённом в эксплуатацию Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе; без них невозможно создание международного термоядерного реактора ITER в Кадараше [2]. Сверхпроводниковые магниты применяются в магнитно-резонансной томографии; их используют в поездах с магнитной подвеской.

Интерес к поиску высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) начал снижаться, пока в 1986 г. швейцарские учёные *К. Мюллер* и *Й. Беднорц* из Лаборатории американской компании IBM не открыли способность у керамики на основе La-Ba-Cu-O переходить в сверхпроводящее состояние при 30 К. Прогресс, на первый взгляд, — небольшое, но достаточное для повышения интереса к ВТСП. Действительно, уже через полгода появилась следующая работа с крайне положительным результатом: американскому физiku *Полю Чу* из университета города Хьюстон удалось найти соединение $Ba_2Cu_3O_{7-x}$ с температурой сверхпроводящего перехода в 93 К. Таким образом, если с НТСП можно было работать,

охлаждая их только гелием, то теперь появилась возможность перейти на более дешёвый и доступный криоагент — жидкий азот с температурой нормального кипения 77,2 К. Сегодня учёные стремятся к более высокой температуре, при которой сверхпроводник может сохранять свои ценные свойства, и к максимально повышенным токам, которые он может проводить [3]. Эти параметры, наряду с критической величиной приложенного поля, служат важнейшими характеристиками сверхпроводников.

Следовательно, на наших глазах произошла научная революция в истории сверхпроводимости, которая открыла новые возможности в её развитии и практическом использовании.

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И СВОЙСТВА СОВРЕМЕННЫХ ВТСП

За прошедшие 25 лет существования ВТСП сформировались четыре их основных типа, отличающихся структурой элементарной ячейки соответствующего материала, особенностями механизма спаривания электронов и механическими свойствами.

К первому типу ВТСП относятся керамические соединения (см. таблицу) со структурой, подобной La-Ba-Cu-O и Y-Ba-Cu-O, в виде цилиндров и пластин с характерными размерами до десятков сантиметров, а также тонких и толстых плёнок, получаемых вакуумным распылением и химическим осаждением [4]. Пластины и цилиндры изготавливаются из порошков оксидов, входящих в соединения элементов, методом прессования и высокотемпературного синтеза. Плёнки получают либо методом лазерного импульсного распыления в вакууме, либо магнетронным распылением в среде аргона мишеней в виде пластин или дисков соответствующего ВТСП. При нанесении толстых плёнок соединения Y-Ba-Cu-O на тонкую стальную ленту шириной порядка 10 мм можно получить отрезки (до сотен метров) гибкого керамического ВТСП с допустимым радиусом изгиба не менее 10 см.

Керамическая природа указанных соединений, характеризующаяся, как известно, повышенной хрупкостью, вызывает ряд технологических и технических проблем, влияющих на возможность их применения для создания некоторых сверхпроводящих устройств. К этим проблемам в настоящее время относятся следующие: получение качественного сверхпроводящего контакта между двумя образцами таких ВТСП, изготовление многослойных устройств с малым радиусом изгиба ВТСП; создание туннельных контактов Джозефсона; стабильность во времени сверхпроводящих свойств тонких плёнок; достаточно высокая стоимость чистых компонентов элементов, входящих в данные соединения; биологическая вредность химических элементов, используемых в некоторых ВТСП, например, таллия — Tl, ртути — Hg.

Параметры ВТСП первого типа, характеризующие их сверхпроводящие свойства, приведены в таблице. К ним относятся, кроме критической температу-

ры, второе критическое магнитное поле (H_{c2}) и плотность критического тока j_k в нулевом внешнем магнитном поле ($B=0$), приведённые к температуре $T=0$ К [5, 6].

Второй тип ВТСП включает соединения MgB_2 и другие на его основе с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние, равной 39 К. Этот материал получают к настоящему времени как в виде плёнок, так и — ленты [7]. Не будучи керамикой, материал обладает повышенной пластичностью и является сегодня одним из главных кандидатов на реализацию длинномерных высокотемпературных сверхпроводящих магнитов, создающих сильные магнитные поля в больших объёмах. Этот выбор объясняется также высоким значением критического поля данного сверхпроводника. Криогенной средой для подобных изделий может стать жидкий неон ($T_{кип}=27$ К), который по стоимости хотя и превосходит жидкий азот, но гораздо доступнее жидкого гелия.

Основные характеристики ВТСП

Сверхпроводник	T_c , К	j_k , А/см ² (при $B=0$)	* $B_{c2}^{ab}(0)/$ $B_{c2}^c(0)$
$La_{2-x}Ba_xCuO_{3+\delta}$	~30	~ 10^4	23/—
$La_{1,85}Sr_{0,15}CuO_{4-\delta}$	35	~(10^4 - 10^5)	45/10
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	93	~ 10^6 (плёнки)	140/28
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{5+\delta}$	85	~ 10^5 (плёнки)	260/40
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	120	~ 10^5 (плёнки)	~500/42
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$	134	—	—
MgB_2	39	~ 10^5	74/3,3
AFe_2As_2 ($A=Ba, Sr, Ca$)	38	~ 10^4	75/—
Rb_2CsC_{60}	33	—	—

Примечание: *) Расчётные данные для направлений поля вдоль плоскости «ab» и оси «c» кристаллической решётки материала в Tl

К третьему типу ВТСП следует отнести фуллериты — органические соединения с химической формулой A_3C_{60} , где А — атом щелочного или щелочноземельного металла [8]. Открытый 20 лет назад этот материал в виде соединения Rb_2CsC_{60} имеет максимальную критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние, равную 33 К. К сожалению, этот ВТСП пока получают только в виде неплотных массивных образований (с плотностью около 1,7 г/см³), имеющих значительную стоимость (25 долларов США за грамм) и пригодных только для лабораторных исследований, в частности, механизма сверхпроводимости в данных соединениях.

Наконец, к четвёртому типу ВТСП относится группа открытых экспериментально несколько лет назад соединений на основе FeAs (в частности,

соединения AFe_2As_2 , где $A=Ba, Sr, Ca$), содержащих атомы ферромагнитных материалов (вместо железа возможен кобальт) [9]. Эти соединения под названием пниктиды демонстрируют сосуществование в едином твёрдом теле ферромагнетизма (точнее, антиферромагнетизма) и сверхпроводимости, сама возможность которого отрицалась физиками в прошлом столетии. Рекордной критической температурой для этих соединений к настоящему времени является значение в 38 К. Это наиболее бурно развивающаяся область современной сверхпроводимости. Лидирующее положение в исследованиях пниктидов занимают японские учёные. Судя по материалам последней 26-й международной конференции по физике низких температур, проходившей в Пекине в августе 2011 г. [10], уже существуют пниктиды в виде металлических лент (железная лента с поверхностным слоем селена), плёнок; ведутся работы по созданию проводов. Именно в разработке ВТСП данного типа следует ожидать прорывов как в росте их критической температуры, так и в совершенствовании их технологии изготовления, пригодной для массового внедрения сверхпроводящих устройств в современную технику.

3. УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ВТСП

В настоящее время на основе ВТСП производятся и пользуются коммерческим спросом в основном четыре вида устройств:

- высокочувствительные (до 10^{-14} Тл) квантовые измерители медленно изменяющегося магнитного поля (диапазон частот поля от 0,01 Гц до 10 Гц) – СКВИДы. Эта аббревиатура соответствует возникшему в 1964 г. в США названию этих устройств на основе НТСП: Superconducting Quantum Interference Device -SQUID;
- сверхпроводящие ограничители тока для линий электропередачи;
- сверхпроводящие магнитные экраны;
- силовые сверхпроводящие кабели.

Кроме того, в стадии подготовки к массовому производству находятся также сверхпроводящие магнитные подвесы и сверхпроводящие приёмно-передающие устройства для мобильной радиосвязи. Ведутся исследовательские работы по созданию источников большого (до 100 Тл) замороженного магнитного поля на основе объёмных керамических ВТСП, магнитных сепараторов и быстродействующих электронных переключателей тока на основе пниктидов для вычислительных устройств.

СКВИДы на основе керамических плёнок ВТСП производятся в США (фирма «Superconductors»), в Германии (Institut fuer Photonik Technologie, г. Йена), в Японии.

Благодаря своей уникальной чувствительности они являются основными элементами авиационных геофизических комплексов для магнитной разведки месторождений различного минерального сырья, в частности, нефти, а также магнитных сканирующих СКВИД-микроскопов [11] (см. рисунок) и бескон-

тактных медицинских магнитокардиографов.

Токовый ограничитель представляет собой, как правило, керамическую трубку с длиной до трёх и более метров, покрытую толстой плёнкой керамического ВТСП. Помещённый в горизонтальный азотный криостат ограничитель включается в разрез каждого из линейных проводов линии электропередачи и не имеет сопротивления при номинальном токе в линии. При возникновении короткого замыкания линии на Землю ток в линии начинает резко увеличиваться, и плёнка под действием тока переходит в нормальное состояние, т.е. возникает значительное активное сопротивление в линии. В результате при заданном напряжении стационарного генератора ток в линии за короткое время (за десятки миллисекунд) уменьшается до допустимого значения и затем полностью отключается относительно простым и дешёвым механическим выключателем. При таком процессе ограничения тока также существенно снижается перенапряжение в линии, которое опасно для коммутационного оборудования при традиционном способе отключения линии во время короткого замыкания. В целом, применение ограничителей на основе ВТСП существенно удешевляет стоимость необходимого коммутационного оборудования и повышает его надёжность.



Внешний вид трёхканального сканирующего магнитного микроскопа на основе СКВИДов из ВТСП, разработанного во ФТИНТ НАН Украины

Сверхпроводящие магнитные экраны (СПМЭ) изготавливаются из керамических ВТСП, как правило, на основе висмута. Конструкция СПМЭ состоит из тонкостенной полый трубы или цилиндра с дном с диаметром отверстия до 150 мм при длине от нескольких сантиметров до метра. В области низких и инфранизких частот экранируемых магнитных полей они на порядки превосходят по коэффициенту экранирования традиционные ферромагнитные и электромагнитные экраны. СПМЭ используются в основном для калибровки СКВИД-магнитометров и несверхпроводящих высокочувствительных магнитометров в лабораторных и производственных помещениях с большим уровнем электромагнитных помех, а также в полевых условиях.

С появлением ВТСП и возможности работы при температуре дешевого жидкого азота вновь возрос интерес к сверхпроводящим силовым кабелям. В самые последние годы были разработаны, испытаны и поставлены под нагрузку силовые кабели в США в районе Нью-Йорка, а позже на одной из подстанций Москвы [12]. В США их длина пока не превышает 1000 м, а в Москве она составляет 300 м. Кабель изготавливают в виде стальной ленты с нанесённой на неё химическим методом толстой керамической плёнкой из соединения Y-Ba-Cu-O. Подобный ленточный кабель производят в США [13] и в Германии. В России работы по внедрению кабелей из ВТСП проводятся в Научно-исследовательском институте кабельной промышленности в г. Подольске и в Институте атомной энергии им. Курчатова в г. Москве. Считается, что использование кабеля из ВТСП целесообразно на участках линий электропередач, примыкающих к генерирующим электростанциям и несущих большие токи, т.е. до трансформирования напряжения генераторов на уровень высоковольтных линейных напряжений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие ВТСП расширило применение сверхпроводимости. Если 25 лет назад широко применялись только СКВИДы, сверхпроводящие многовитковые магниты (в частности, для медицинских ЯМР-томографов) и магнитные экраны на основе НТСП, то теперь к ним добавились силовые кабели и линейные ограничители тока. К тому же эксплуатация новых СКВИДов и магнитных экранов на основе ВТСП в связи с переходом на жидкий азот существенно удешевилась.

Обрела реальные черты возможность создания в ближайшие годы сверхпроводящих средств мобильной связи высокого качества, магнитных подвесов для транспортных средств и отдельных сверхпроводящих компонентов вычислительных комплексов.

Открытие новых механизмов возникновения сверхпроводимости, возросший уровень технологии, в том числе нанотехнологии, а также диагностики свойств материалов и микропроцессов в твёрдом теле являются важными предпосылками к скорому улуч-

шению параметров существующих типов ВТСП и к появлению новых.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бродянский В.М., Лавренченко Г.К.** Столетие ожигания самого «неподдающегося» газа-гелия// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 2-8.
2. **Буткевич И.К.** Успехи прикладной сверхпроводимости и прогресс криогенной техники// Технические газы. — 2011. — № 5. — С. 2-14.
3. **Котляр П.** Российские сверхпроводники пошли на рекорд/www.infox.ru/sciencel/lab/2011/07/07/Svyerhprovodnik.phtml.
4. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников. Под редакцией **Д.М. Гинзберга**. — М.: Мир, 1990. — 543 с.
5. **Мейлихов Е.З., Шапиро В.Г.** Критические поля ВТСП// Сверхпроводимость: физика, химия, техника. — 1991. — Т. 4. — № 8. — С. 1437-1486.
6. **Довгий Я.** Чарівне явище надпровідності. — Львів: Євровіт, 2000. — 440 с.
7. **Eisterer M.** Magnetic properties and critical currents of MgB_2 // Superconducting science and technology. — 2007. — V. 20. — P. 47-73.
8. **Локтев В.М.** Легированный фуллерит — первый трёхмерный органический сверхпроводник// Физика низких температур. — 1992. — Т. 18. — № 3. — С. 217-237.
9. **Изоумов Ю.А., Курмаев Э.З.** Высокотемпературные сверхпроводники на основе FeAs-соединений. — Москва-Ижевск: R & C Dynamics, 2009. — 311 с.
10. The 26th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, 2011, Beijing, China, Collection of the Conference thesis's. — 402 p.
11. Three channel non-force magnetic SQUID microscope/**Bondarenko S.I., Nakagawa N., Shablo A.A., Pavlov P.P.**// Physica B. — 2003. — No 329-333. — P. 1512-1513.
12. Третья Международная конференция «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости», 13-17 октября 2008 г., ФИАН, г. Звенигород, Сборник трудов.
13. <http://www.membrana.ru/articles/technic/2009/11/12/174300/html>.



ВТОРОЕ ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ — ЗА 2 ГОДА!



- необходимо наличие законченного высшего инженерно-технического образования;
- обучение в Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»;
- специальность 7.05060404 «Криогенная техника и технология»;
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учёбы — сдачей государственного экзамена;
- диплом Министерства образования и науки, молодёжи и спорта Украины признаётся в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87