

05;12

Долговременная стабильность сверхпроводящей ленты на основе Bi(2223) и Dy(123) в цепи постоянного тока

© Г.Н. Михайлова,¹ Е.И. Демихов,² В.П. Аксенов,¹ Л.Х. Антонова,¹ Л.Д. Исакова,³ Л.Н. Жерихина,²
Е.А. Костров,² С.В. Лаврищев,³ В.С. Михайлов,¹ А.В. Троицкий,¹ А.М. Цховребов²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

² Физический институт им. И.П. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

³ Научный центр волоконной оптики РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: at@kapella.gpi.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2008 г.)

Изучена стабильность критических параметров T_c и I_c коммерческих образцов высокотемпературных сверхпроводящих проводов после длительного пропускания транспортного тока порядка $0.7I_c$ в жидком азоте при 77 К. Исследованы вольт-амперные характеристики $U(I)$ и значения критического тока и критической температуры для герметичного многожильного провода Bi(2223) и для сверхпроводящей ленты Dy(123), покрытой тонким слоем Ag.

В случае ленты Bi(2223) после 323 h пропускания тока было обнаружено существенное уменьшение критического тока (\sim на 30%) и вздутие образца. Аналогичное поведение наблюдалось и на контрольном образце, через который ток не пропускался, но который также находился в жидком азоте в течение 700 h.

Высказано предположение, что уменьшение критического тока на образце Bi(2223) вызвано проникновением внутрь композитного проводника жидкого хладагента, который, испаряясь и расширяясь при отогреве, создает сильную деформацию материала.

Продемонстрирована высокая стабильность критического тока образца Dy(123), полученного по эпитаксиальной технологии, после пропускания тока в течение 400 h и нахождения в жидком азоте в течение 1000 h.

PACS: 74.72.-h

Введение

Успехи в технологии получения длинномерных высокотемпературных сверхпроводящих проводов открывают новые горизонты в создании силовых многожильных кабелей, трансформаторов, двигателей, ограничителей тока для электроэнергетики. Однако вопросы долговременной надежности и стабильности характеристик сверхпроводящих проводов нуждаются в дальнейшем изучении.

Близость сверхпроводящего, структурного и магнитного переходов в купратных высокотемпературных сверхпроводниках с d -спариванием обуславливает кристаллохимическую неустойчивость, которая проявляется и в процессах синтеза, и при взаимодействии сверхпроводников с внешними факторами. Ранее было установлено, что в результате длительного пропускания постоянного тока в керамических высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) при температурах от комнатной до гелиевой происходят локальные изменения фазового состава сверхпроводника, что было объяснено электростимулированной диффузией тяжелых ионов и кислорода. Этот эффект был обнаружен в толстых керамических пленках на основе Y(123), Bi(2212), Bi(2223) и исследован в [1–4]. Недавно деградация характеристик ВТСП при пропуске тока через ленточные провода была описана в [5,6].

Другим эффектом, который может ухудшать свойства ВТСП-провода в процессе эксплуатации, является вздутие проводов [7], которое может иметь место при термодинамическом циклировании. Этот эффект связан с проникновением внутрь сверхпроводника жидкого хладагента, который, испаряясь при отогреве, вызывает сильную деформацию материала.

Целью настоящей работы является изучение стабильности критических свойств T_c и I_c образцов ВТСП-проводов на основе Bi(2223) и Dy(123) в процессе длительного пропускания транспортного тока порядка $0.7I_c$ в жидком азоте при 77 К.

Экспериментальная методика и образцы

Исследовался герметичный многожильный провод Bi(2223) на основе соединения $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ (HTS Hermetic wire, производства American Superconductor Company, США), так называемый провод первого поколения, $I-G$. Сверхпроводник заключен в матрицу из серебра и ламинирован латунью для герметизации и увеличения механической прочности.

Другая серия экспериментов проводилась на образцах сверхпроводящей ленты Dy(123) на основе соединения $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (производство THEVA, Герма-

ния) — провод второго поколения, 2—G. Сверхпроводник $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ наносился с помощью электронного луча по технологии эпитаксиального роста на подложку из сплава Хастеллой с подслоем MgO . Сверхпроводник покрывался тонким (350 nm) слоем серебра.

Исследование структуры и химического состава образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 5910-LV, укомплектованного платформой INCA для энергодисперсионного микроанализа, производства компании Oxford Instruments. Образцы перед проведением рентгеноспектрального микроанализа предварительно полировались. Для характеристики изменений, происходящих со структурой и составом образцов, сравнивались изображения, полученные в режиме выявления контраста от различия в химическом составе и контраста, связанного с рельефом поверхности. Для характеристики вариаций химического состава на разных участках образцов строились карты распределения элементов.

Введем следующие обозначения: образец состава $\text{Bi}(2223)$ — B1, через который пропускался ток; B2 — контрольный без тока; образец B0 — исходный. Образцы D1 и D2 соответственно для $\text{Dy}(123)$.

Лента на основе $\text{Bi}(2223)$, 1—G

Прямолинейный образец ленты $\text{Bi}(2223)$ (B1) размером $108 \times 4 \times 0.4$ mm имел критические параметры $T_c = 110$ K и $I_c = 126$ A. Схема крепления образца приведена на рис. 1. Образец был помещен в криостат с жидким азотом для длительного пропускания транспортного тока. Использовались прижимные токовые контакты с промежуточным слоем индия. Потенциальные контакты позволяли контролировать наличие сверхпроводящего состояния в образце. Также в криостат был помещен контрольный образец B2 такого же провода тех же размеров. Через образец B1 пропускался транспортный ток 85 ± 2 A и периодически снимались вольт-амперные характеристики $U(I)$. После первых 100 h пропускания тока значения $U(I)$ и I_c не изменились. Суммарная токовая нагрузка в проводе B1 составила 323 h. В результате критический ток в образце существенно уменьшился —

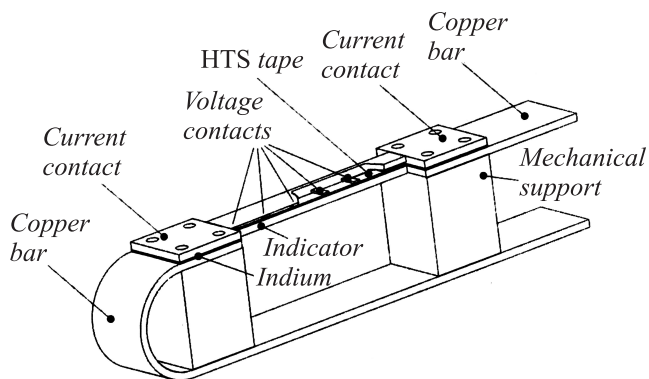


Рис. 1. Схема крепления образца ВТСП-ленты.

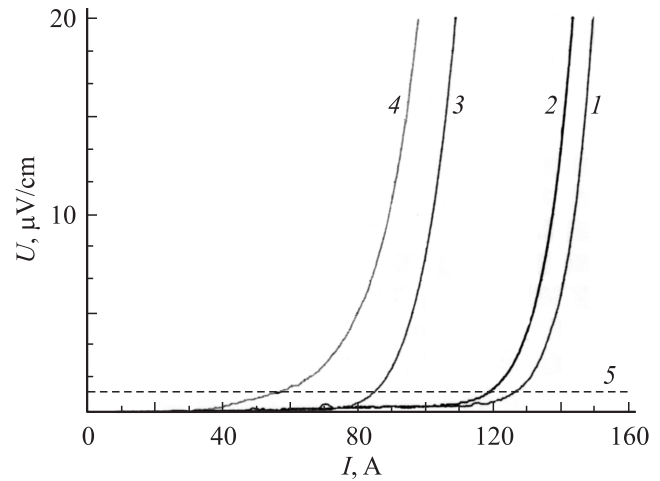


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики $U(I)$ экспериментального (B1) и контрольного (B2) образцов ленты $\text{Bi}(2223)$: 1 — исходная $U(I)$ для образца B1, $I_c = 126$ A; 2 — исходная $U(I)$ для образца B2, $I_c = 119$ A; 3 — $U(I)$ образца B1 после пропускания тока в течение 323 h, $I_c = 85$ A; 4 — $U(I)$ образца B2 после окончания эксперимента, $I_c = 55$ A. Образец B2 находился в жидком азоте в течение 700 h без тока; 5 — критерий определения значения критического тока, $1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

от 126 до 85 A (рис. 2, кривые 1, 3). После отогрева было обнаружено вздутие образца B1, его толщина увеличилась с 0.4 до 0.7 mm. Необходимо подчеркнуть, что образцы B1 и B2 находились в жидком азоте около 700 h (ток включался только в дневное время суток).

Вольт-амперные характеристики $U(I)$ контрольного образца B2 (770 h в жидком азоте без пропускания тока) представлены на рис. 2 (кривые 2, 4). Критический ток контрольного образца B2 уменьшился от 119 до 55 A, его толщина также увеличилась. Критическая температура обоих образцов (экспериментального и контрольного) оставалась неизменной — 110 K.

Лента $\text{Dy}(123)$, 2—G

Прямолинейный образец ленты $\text{Dy}(123)$, D1, размером $108 \times 4 \times 0.1$ mm имел $I_c = 63$ A, $T_c = 90$ K. Схема крепления образца представлена на рис. 1. Здесь также использовались прижимные токовые контакты с промежуточным слоем индия. Контрольный образец D2 тоже был помещен в криостат. Через образец D1 пропускался ток 44 A в течение 300 h при $T = 77$ K. На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики $U(I)$ $\text{Dy}(123)$ образца D1. В результате эксперимента на обоих образцах (D1 и D2) не обнаружено заметных изменений в значениях критического тока и критической температуры, а также в геометрических размерах.

Затем транспортный ток на образце D1 повысился до 80 A ($> I_c$), ток пропускался в течение 100 h, при температуре жидкого азота. Никаких изменений в значениях $U(I)$ и критического тока в образце D1 не было зарегистрировано.

Результаты химического анализа (at.%) образцов Bi(2223)

Образец	Химический элемент					
	Bi(± 0.39) [*]	Pb(± 0.37)	Ca(± 0.1)	Sr(± 0.23)	Cu(± 0.23)	O(± 0.32)
B0	10.16	0.89	10.26	10.77	15.37	2.545
B1	9.61	0.94	9.53	10.52	12.98	56.42
B1	10.05	0.95	9.57	11.27	13.84	54.31
B1	10.72	0.85	11.1	11.39	16.24	49.7
B1	10.22	0.8	10.43	11.18	14.7	52.67

* В скобках приведены погрешности определения σ , %.

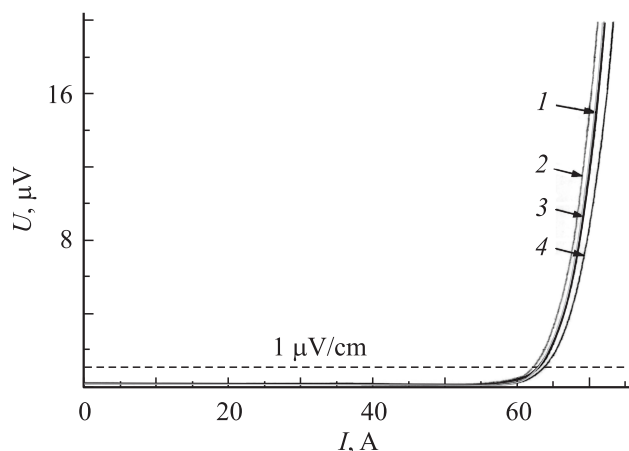


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики $U(I)$ до и после пропускания тока 44 А через образец D1 ленты Dy(123) в жидком азоте при $T = 77$ К: 1 — до пропускания тока; 2 — после пропускания тока в течение 100 h; 3 — в течение 200 h; 4 — в течение 300 h. Во всех случаях $I_c \sim 63$ А.

Итак, лента 2-G на основе Dy(123) в результате эксперимента по пропусканию тока в течение 400 и 1000 h в жидком азоте не претерпела никаких заметных изменений критических параметров I_c и T_c .

Микроанализ ленты Bi(2223)

Исходный B0, экспериментальный B1 и контрольный B2 образцы провода Bi(2223) были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа с рентгеноспектральным микроанализатором с целью обнаружения изменений структуры и фазового состава сверхпроводника. Усредненный химический состав исходного образца B0 Bi(2223) представлен в таблице (первая строчка). Средние значения определялись в результате анализа пяти произвольно выбранных точек. Следующие строчки в таблице показывают элементное распределение для четырех выбранных участков экспериментального образца B1. Как видно из таблицы, наибольшая разница в составе отдельных проб фиксируется для меди и кальция.

На рис. 4 представлены изображения участков поперечных сечений образцов Bi(2223); 1 — исходный B0; 2, 3 — экспериментальный B1; 4 — контрольный B2. Видно, что после пропускания электрического тока изменяется расположение прослоек из серебра (светлые участки) и ВТСП (серые участки), а также увеличивается количество дефектов (темные участки), которые, как было показано в результате исследований, представляют собой поры.

На исходном образце B0 карты распределения химических элементов, построенные по площади $60 \times 60 \mu\text{m}$, выявляют тенденцию к образованию микроучастков, обогащенных кальцием или медью. Картирование поверхности показало, что такие участки имеют протяженность от 1 до $5 \mu\text{m}$. На экспериментальном образце B1

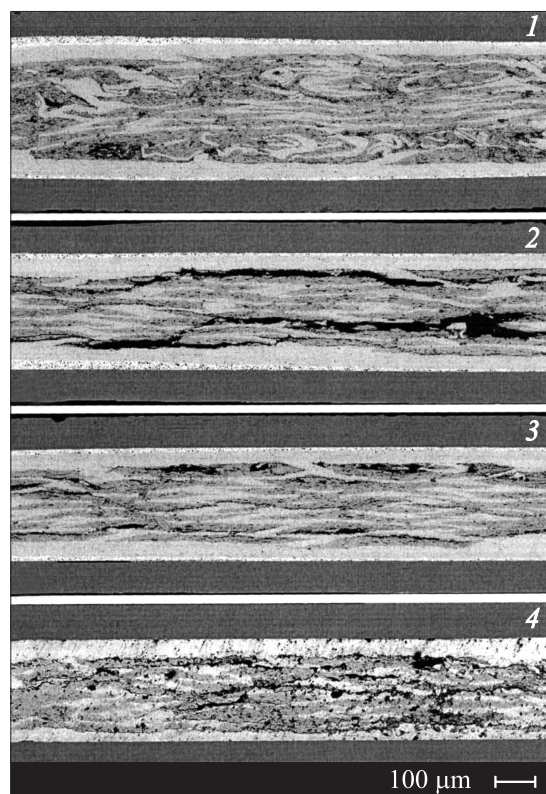


Рис. 4. Микрофотографии поперечных сечений ВТСП-ленты Bi(2223) до и после пропускания транспортного тока при 77 К. Масштаб — $100 \mu\text{m/cm}$.

изменение состава выражено более отчетливо. Состав контрольного образца В2 более равномерный.

Заключение

Исследования долговременной стабильности критических параметров I_c и T_c образца многожильного провода Bi(2223) на основе соединения $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ показали, что после пропускания транспортного тока в течение 323 h в жидком азоте критический ток образца В1 уменьшился с 126 до 85 А, также наблюдалось увеличение геометрических размеров (вздутие). Такие же изменения произошли и с контрольным образцом В2 (700 h в жидком азоте), через который ток не пропускаться. Значение T_c после эксперимента не изменилось ни в В1, ни в В2.

Рентгеноспектральный микроанализ выявил образование микропор в сверхпроводящих жилах в обоих образцах В1 и В2. Для объяснения природы изменения пространственного распределения элементов на изучаемых образцах требуются дальнейшие эксперименты.

Было высказано предположение, что причина уменьшения критического тока и формирования микропустот в ленте Bi(2223) могла быть вызвана эффектом, связанным с термоциклированием, известным как вздутие, а не электростимулированной диффузией ионов. Вздутие провода вызвано проникновением внутрь композитного проводника жидкого хладагента, который, испаряясь и расширяясь при отогреве, создает сильную деформацию материала, что приводит к уменьшению критического тока.

На образцах сверхпроводящей ленты Dy(123) на основе соединения $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ была продемонстрирована хорошая стабильность в цепи постоянного тока при 77 К в течение длительного времени (400 h).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-02-08205).

Список литературы

- [1] Осипьян Ю.А., Николаев Р.К., Сидоров Н.С., Бобров В.С., Цой В.С. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. Вып. 5. С. 257.
- [2] Прохоров А.М., Гуфан Ю.М., Крапивка А.Е., Лубнин Н.Е., Михайлова Г.Н., Рудашевский Е.Г., Сеферов А.С., Сумароков В.Н., Тарасенко В.А., Чистов А.Г. // ДАН. 1990. Т. 311. № 1. С. 75.
- [3] Mikhailova G.N., Prokhorov A.M., Shchurova L.Yu., Troitskii A.V. // Physica C. 2004. Vol. 408–410. P. 692.
- [4] Михайлова Г.Н., Прохоров А.М., Щурова Л.Ю., Троицкий А.В. // Неорг. мат. 2000. Т. 36. № 8. С. 969.
- [5] Bae D.K., Lee S.J., Bae J.H., Sim K.D., Park K.Y., Ko T.K. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. Vol. 13. N 2. P. 2349.
- [6] Wang X., Banda S., Ueda H., Ishiyama A., Iigima Y., Saitoh T., Kashima N., Mori M., Watanabe T., Nagaya S., Katoh T., Machi T., Shiohara Y. // EUCAS'07. 2007. Vol. 0266-M1. P. 282.
- [7] Hornung F., Klaser M., Schneider Th. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. Vol. 17. N 2. P. 3117.