

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени П. Н. ЛЕБЕДЕВА

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

КРАТКИЕ  
СООБЩЕНИЯ  
ПО ФИЗИКЕ

3

Москва — 2017

Информация

Страница журнала “Краткие сообщения по физике ФИАН” в интернете:

<http://ksf.lebedev.ru>

Издательство ALLERTON PRESS, INC., 18 WEST 27-th STR. NEW YORK,  
N.Y. 10011 USA издает на английском языке полный перевод журнала “КРАТКИЕ  
СООБЩЕНИЯ ПО ФИЗИКЕ” под названием Bulletin of the Lebedev Physics Institute  
(Russian Academy of Sciences), volume 44 (2017).

**РЕДКОЛЛЕГИЯ**

Н. Н. Колачевский – главный редактор  
О. Н. Крохин – зам. главного редактора  
В. П. Силин – зам. главного редактора  
Л. Л. Чайков – ответственный секретарь  
П. И. Арсеев – член редколлегии  
И. Г. Зубарев – член редколлегии  
В. К. Конюхов – член редколлегии  
Ю. А. Михайлов – член редколлегии  
А. И. Никишов – член редколлегии  
Н. Г. Полухина – член редколлегии  
А. А. Рухадзе – член редколлегии  
В. Н. Сорокин – член редколлегии

УДК 538.955; 538.945

## ТОКОНЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ВТСП ЛЕНТ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 2–100 К

Л. Х. Антонова<sup>1</sup>, А. В. Троицкий<sup>1</sup>, Г. Н. Михайлова<sup>1</sup>, Т. Е. Демихов<sup>2</sup>,  
С. В. Самойленков<sup>3</sup>, А. А. Молодык<sup>3</sup>, Ж. Нудэм<sup>4</sup>, П. Бернштейн<sup>4</sup>

*Была исследована токонесущая способность ВТСП лент второго поколения на основе  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  (GdBCO), изготовленных в компании СуперОкс методом импульсного лазерного напыления. Измерения критического тока в магнитных полях были проведены двумя способами: резистивным и магнитным с помощью СКВИД магнетометра. Полученные результаты сравниваются с характеристиками YBCO ленты, изготовленной методом химического осаждения (SuperPower, США).*

**Ключевые слова:** ВТСП ленты, магнитное поле, СКВИД магнетометр.

Высокотемпературная сверхпроводимость была обнаружена более 25 лет назад [1]. Перспективы этих уникальных соединений были очевидны сразу после их открытия. Тем не менее, потребовалось длительное время для того, чтобы разработать технологию производства этих материалов для практического применения. Результатом высоких технологий стало производство длинномерных гибких металлических лент, содержащих слой высокотемпературного сверхпроводника, так называемых ВТСП лент второго поколения (ВТСП-2). Такие проводники могут быть использованы в электрических сетях и крупных магнитных системах. Существуют также проекты использования ВТСП-2 в ускорителях, в термоядерных устройствах с магнитным или инерционным удержанием плазмы, в накопителях энергии, в плазменных двигателях космических аппаратов и т.д. В этой статье мы представляем результаты резистивных и магнитных измерений токонесущей способности лент ВТСП-2 на основе  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  (GdBCO), изготовленных

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: lpa@kapella.gpi.ru.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>3</sup> ЗАО “СуперОкс”.

<sup>4</sup> CRISMAT-ENSICAEN and Université de Caen-Basse Normandie, Caen, Франция.

в компании СуперОкс методом импульсного лазерного напыления. Полученные результаты сравниваются с характеристиками  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) ленты, изготовленной методом химического осаждения (SuperPower, США).

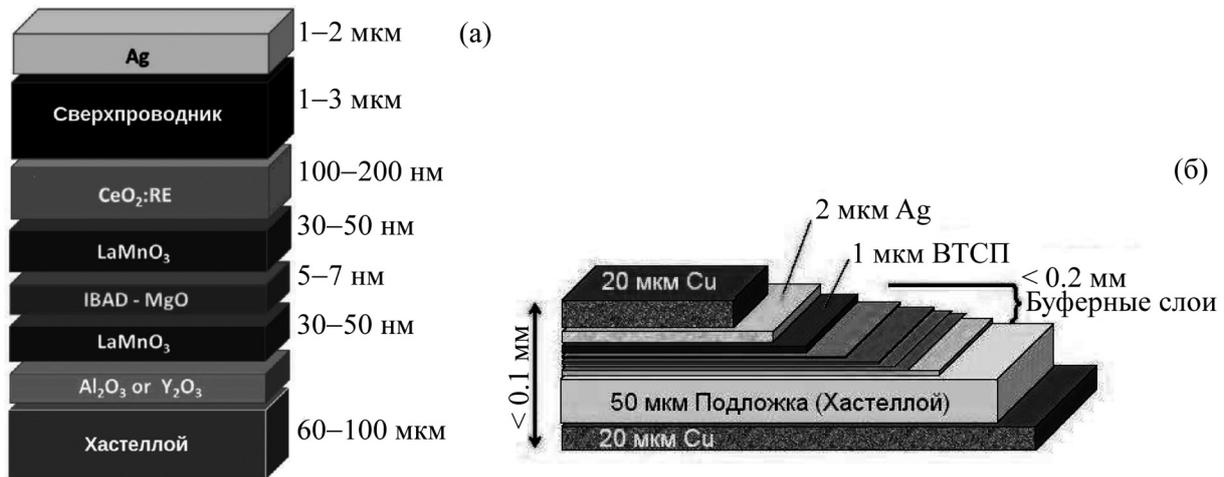


Рис. 1: Структура лент  $\text{GdBCO}$  (СуперОкс) (а) [2] и  $\text{YBCO}$  (SuperPower) (б) [3].

Компания СуперОкс была основана с целью разработки экономически эффективных технологий для изготовления  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  лент с использованием самых передовых методов химического и физического осаждения слоев [2]. Ленты шириной 12, 6 или 4 мм имеют многослойную структуру, содержащую металлическую подложку (хастеллой С276), несколько буферных слоев из оксидов металлов и пленку сверхпроводника  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  толщиной 1–3 мкм, покрытую сверху слоем Ag толщиной 1–2 мкм (см. рис. 1(а)). В настоящее время ток на единицу ширины ленты может достигать 500 А/см при 77 К, производственные мощности позволяют выпускать до 30 км 12-мм ленты в год. Также могут быть изготовлены ленты со стабилизирующим покрытием Cu, и имеются возможности для изменения соответствующих параметров лент по требованию заказчика.

Измерения зависимости электрического сопротивления ленты от температуры  $R(T)$  проводились с использованием стандартного четырехзондового метода для определения критической температуры ( $T_c$ ).  $T_c$  для лент  $\text{GdBCO}$  была равна 93 К.

Измерения критического тока в магнитных полях были проведены двумя способами: резистивным и магнитным с помощью СКВИД магнетометра. В первом случае значение критического тока ( $J_c$ ) при  $T = 77$  К определялось по данным измерений вольт-амперных характеристик с использованием четырехзондового метода. Критери-

ем для определения критического тока принимался ток, при котором напряженность электрического поля на сверхпроводнике равнялась  $E = 1$  мкВ/см. Поскольку величина критического тока исследуемой GdBCO ленты в собственном поле при  $T = 77$  К была больше, чем 300 А, а толщина стабилизирующего покрытия была небольшой, образец был разрезан на три части вдоль направления ленты с использованием низкооборотной алмазной резки. Толщина алмазного диска была 160 мкм. В итоге мы исследовали образцы размерами  $30 \times 4 \times 0.1$  мм<sup>3</sup>. Длина образца определялась областью однородности магнитного поля, используемого для измерений [4]. Величину  $J_c(B)$  измеряли при  $T = 77$  К в геометрии  $B \perp J$  и  $B \parallel J$ . Магнитное поле до 8 Тл создавали безжидкостной магнитной системой на основе сверхпроводника NbTi с криорефрижератором и рабочей камерой с жидким азотом [5]. Результаты измерений приведены на рис. 2, 3.

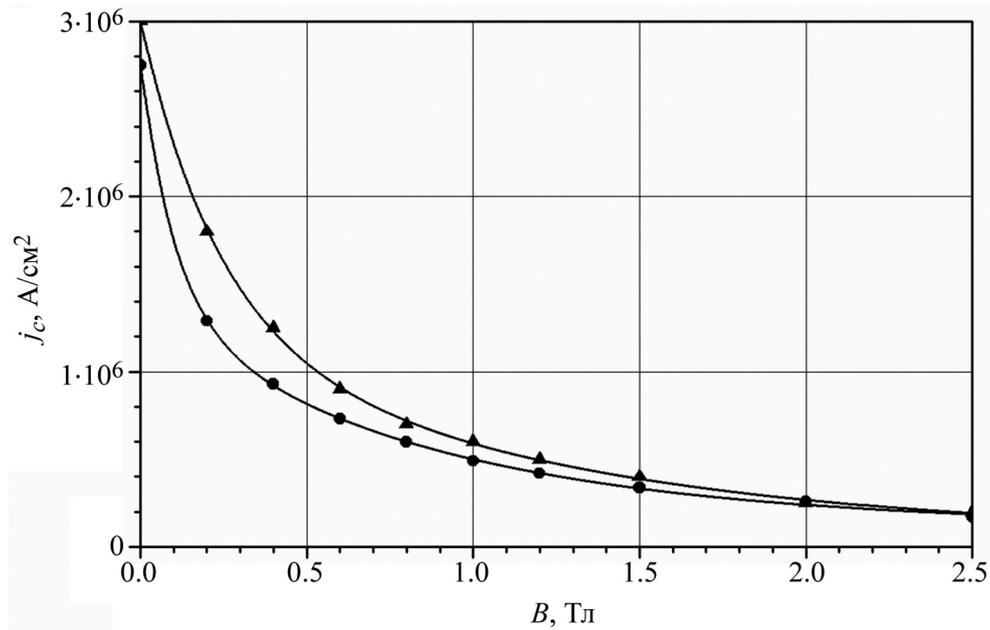


Рис. 2: Критическая плотность тока  $j_c(B)$  ВТСП лент при  $B \perp J$  и  $T = 77$  К. Точки соответствуют GdBCO образцам, треугольники соответствуют YBCO образцам SCS 4050 от SuperPower [10].

Для измерения зависимости критического тока от магнитного поля при температурах 2–100 К использовался СКВИД магнитометр. Измерения проводились на образцах GdBCO ленты размерами  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>, которые вырезались из исследуемой ленты. Вначале образец охлаждался до  $T = 2$  К, и при этой температуре вводилось поле с индукцией  $B = 5$  Тл, перпендикулярное плоскости образца. Затем это поле выключалось и вводи-

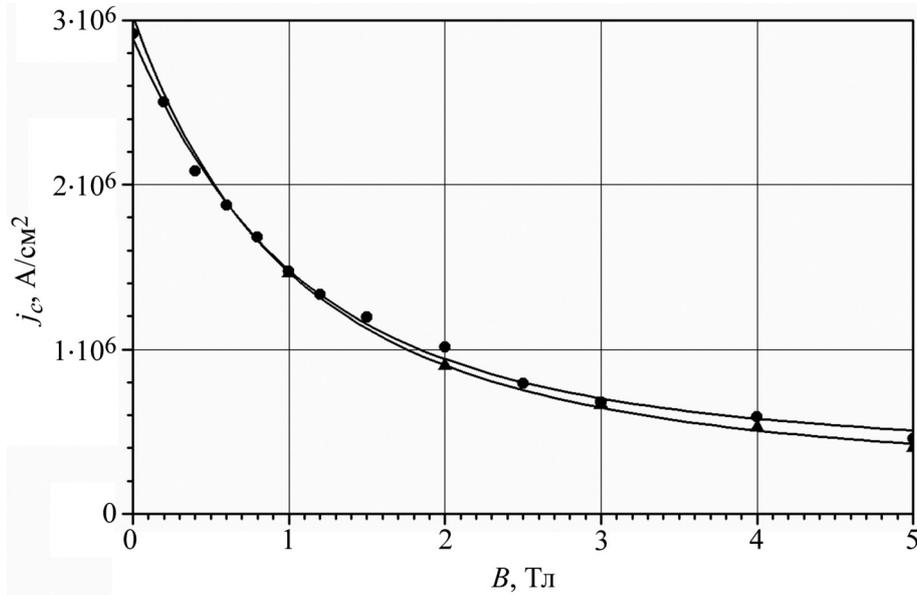


Рис. 3: Критическая плотность тока  $j_c(B)$  ВТСП лент при  $B \parallel J$  и  $T = 77$  К. Точки соответствуют GdBCO образцам, треугольники соответствуют YBCO образцам SCS 4050 от SuperPower.

лось такое же поле обратного знака. Эта процедура должна была стереть магнитную предысторию образца, чтобы при дальнейших измерениях магнитный момент образца был связан только с токами, индуцированными внешним магнитным полем. Прилагаемое поле было достаточным, чтобы магнитный момент образца  $m$ , измеряемый после выключения поля, не зависел от его величины и, следовательно, определялся плотностью критического тока в отсутствие поля.

Из классической теории электромагнетизма следует, что магнитный момент, вызванный токами, циркулирующими в плёнке с площадью  $S$ , определяется по формуле:

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \iint_S \mathbf{r} \times \mathbf{J}^S dS, \quad (1)$$

где  $J^S$  – плотность тока на единицу ширины плёнки. Для приложенного поля большего, чем поле полного проникновения  $B_T$ , плотность экранирующего тока на единицу ширины плёнки можно считать равной критическому значению везде в плёнке, и можно записать:  $J^S = J_c^S$  в уравнении (1). Тогда, учитывая, что линии тока сохраняют симметрию образца, как это следует из теории [6] и из магнитооптических экспериментов

[7], уравнение (1) может быть приведено к виду:

$$m = -J_c^S \frac{w^3}{12}, \quad (2)$$

где  $w$  – ширина образца.

Если считать, что линии незатухающего тока в квадратных образцах являются окружностями, то плотность тока  $J_c^S$  может быть определена следующим образом:

$$J_c^S = -\frac{24m}{\pi w^3 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{2} - 1)^3}{2} \right]}. \quad (3)$$

Сделав необходимые преобразования, получим формулу для определения критического тока ( $I_c$ ) образца квадратной формы:

$$I_c = -\frac{24m}{\pi w^2 \left[ 1 + \frac{(\sqrt{2} - 1)^3}{2} \right]} \quad (4)$$

Измерения в магнитных полях 3 Тл и 1 Тл проводились по той же процедуре за исключением того, что для измерений плотности критического тока в магнитном поле не проводилась процедура стирания магнитной предыстории образца, и в этом случае заданное магнитное поле не выключалось при измерении магнитного момента. Метод определения  $J_c(B)$  от  $m(T)$  подробно описан в [8, 9].

Результаты резистивных измерений плотности критического тока  $j_c$  GdBCO ленты в различной геометрии относительно магнитного поля представлены на рис. 2 и 3. Для сравнения приведены данные также для ленты ВТСП-2 на основе YBCO SuperPower марки SCS4050. Для  $B \perp J$  (рис. 2) лента YBCO демонстрирует несколько большее значение плотности тока в собственном поле и в слабом поле, выше 2 Тл почти нет отличий в значениях  $j_c(B)$  для обеих лент. При наложении поля  $B \parallel J$  (рис. 3), поведение обеих лент очень похоже. Рис. 2 и 3 показывают, что критическая плотность тока для  $B \perp J$  падает быстрее, чем для  $B \parallel J$ . Это должно быть связано с анизотропными свойствами ВТСП, в которых сверхпроводимость, как предполагают, двумерная [11].

Три образца ленты GdBCO измеряли СКВИД магнитометром. Два из них (образцы N1a и N1б) были вырезаны из одного отрезка 12-мм ленты, в то время как образец N2 был вырезан из другого отрезка этой ленты. На рис. 4 представлена зависимость от температуры критического тока на единицу ширины образцов N1a и N2. Есть некоторые

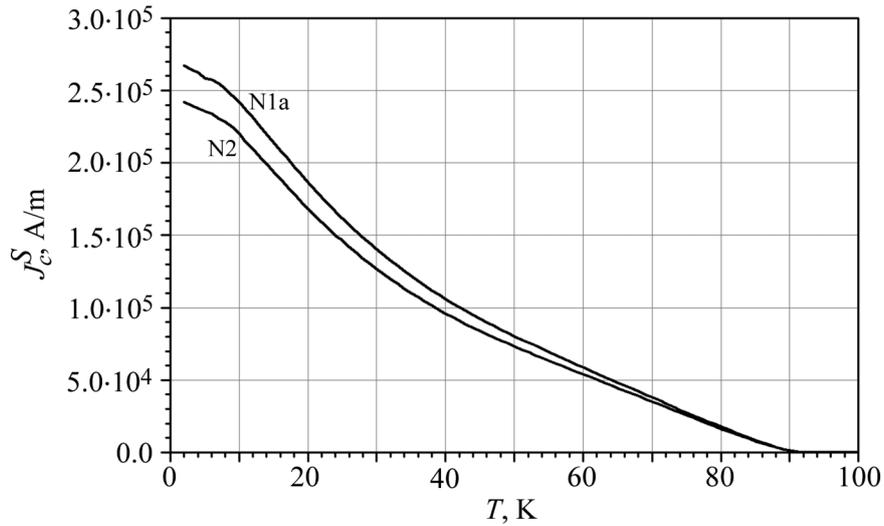


Рис. 4: Зависимость критического тока от температуры при  $B = 0$  для образцов ленты GdBCO N1a и N2.

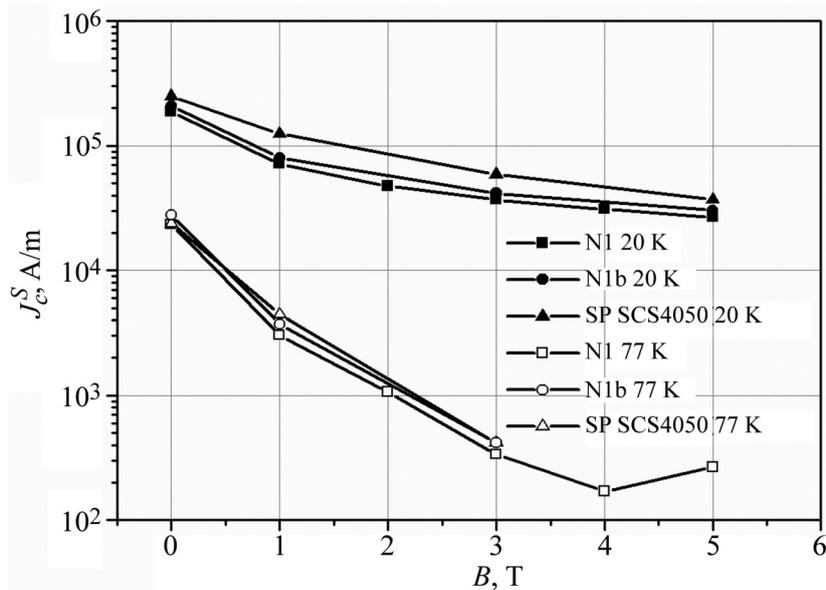


Рис. 5: Зависимость критического тока от магнитного поля при  $T = 20\text{ K}$  и  $77\text{ K}$  для образцов GdBCO (N1 и N1b) и YBCO (SP SCS4050).

различия между этими двумя образцами, которые могут быть обусловлены неоднородностью ленты или повреждениями в процессе резки.

На рис. 5 показана зависимость критического тока на единицу ширины от приложенного поля для образцов GdBCO и YBCO при 20 K и 77 K. Оценки показывают,

что ток на единицу ширины при 77 К в собственном поле для образцов, содержащих микронный слой пленки GdBCO, согласуется с критической плотностью тока, определяемой из четырехзондовых измерений. При 20 К значения  $J_c(B)$  больше для ленты YBCO, чем для лент GdBCO.

Результаты показывают, что лента, полученная методом импульсного лазерного осаждения (СуперОкс), практически не уступает по своим токонесущим характеристикам ВТСП ленте, полученной методом химического осаждения из паровой фазы (SuperPower, США). Анизотропия токонесущих свойств во внешнем магнитном поле при 77 К носит типичный характер, свойственный этим материалам. Уменьшение критического тока является более выраженным, когда  $B \perp J$ , чем при  $B \parallel J$ . В магнитных полях до 0.5 Тл резистивные и магнитные измерения критического тока дают близкие результаты. При дальнейшем увеличении поля магнитные измерения дают заниженные по сравнению с резистивными измерениями результаты [12].

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, *Z. Phys. Condens. Matter* **64**(2), 189 (1986).
- [2] S. Li, V. Petrykin, A. Molodyk, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **27**, 044022 (9pp) (2014).
- [3] Сайт компании SuperPower – [www.superpower-inc.com](http://www.superpower-inc.com).
- [4] G. Mikhailova, L. Antonova, A. Troitskii, et al., *Phys. Status Solidi C* **10**(4), 677 (2013).
- [5] E. Demikhov, T. Demikhov, E. Kostrov, et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **22**, 9501004 (2012).
- [6] Th. Schuster, H. Kuhn, E. H. Brandt and S. Klaumünzer, *Phys. Rev. B* **56**, 3413 (1997).
- [7] F. Laviano, D. Botta, A. Chiodoni, et al., *Phys. Rev. B* **68**, 014507 (2003).
- [8] C. McLoughlin, Y. Thimont, J. Noudem, et al., *Phys. Proc.* **36**, 1564 (2012).
- [9] C. McLoughlin, P. Bernstein, Y. Thimont, and J. Siejka, *arXiv: 1207.5682 [cond-mat.-supercon]* (2012).
- [10] V. Selvamanickam, J. Dackow, Y. Xie, et al., in *Proc. FY 2009 Superconductivity for Electric Systems* (Alexandria (VA), 2009); [http://superpower-inc.com/system/files/2009\\_0804+DOE+Peer+review+2G+final\\_a.pdf](http://superpower-inc.com/system/files/2009_0804+DOE+Peer+review+2G+final_a.pdf).
- [11] В. Л. Гинзбург, *УФН* **95**(1), 91 (1968).
- [12] И. А. Руднев, А. П. Комарова, П. В. Бобин, *Перспективные материалы, спецвыпуск, № 11*, 191 (2011).

Поступила в редакцию 20 января 2016 г.