

# Вольт-амперные характеристики и эффект электрического поля в выращенных из расплава ВТСП кристаллах $YBa_2Cu_3O_x/Y_2BaCuO_5$

© Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, S. Sengupta\*, K.C. Goretta\*\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\*Superconductive Components, Inc., Columbus,  
Ohio 43212, USA

\*\*Argonne National Laboratory, Argonne,  
Illinois 60439, USA

E-mail: smir.bi@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 9 декабря 1999 г.)

Исследовалось влияние электрического поля  $E = 120$  MV/m в системе электрод–изолятор–сверхпроводник на вольт-амперные кривые при 77 К двух типов монокристаллических образцов, вырезанных из сверхпроводящего монолита  $YBa_2Cu_3O_x/Y_2BaCuO_5$ . При этом непроводящая фаза Y211 находилась в монолите в виде выделений размером  $\approx 1$   $\mu$ m. Оказалось, что в образцах с относительно небольшим содержанием Y211 (объемная доля — 8%) электрическое поле не влияет на критический ток  $I_c$ , но уменьшает сопротивление  $R$  при токах несколько более  $I_c$ . В образцах, содержащих больше 35% фазы Y211, электрическое поле приводит к увеличению  $I_c$  и уменьшению  $R$  при  $I > I_c$ . Получены также данные о величине критической температуры  $T_c$  и температурной зависимости  $I_c$ .

В России (Физико-технический институт) работа выполнена при поддержке Российской академии наук. В США работа поддержана Департаментом энергии США (контракт № W-31-109-Eng-38).

Вопрос о возможном влиянии электрического поля на сверхпроводящие характеристики материалов в системе электрод–изолятор–сверхпроводник рассматривался еще в 60-е годы [1–3]. В первой экспериментальной работе [1] на пленках толщиной  $d = 70$  Å в поле  $E = 30$  MV/m наблюдалось изменение проводимости и смещение критической температуры  $T_c$  на  $\Delta T_c \approx 10^{-4}$  К, причем эффекты в индии и олове были противоположны по знаку. Позднее [4] влияние электрического поля на  $T_c$  было обнаружено и на монокристаллах твердых растворов  $Ba(PbBi)O_3$ , в которых максимальное значение  $\Delta T_c$  достигало 0.6 К в поле  $E = 1$  MV/m при  $d = 0.3$ –0.6 mm.

Интерес к эффекту поля значительно усилился после открытия ВТСП [5–14], в которых из-за меньшей концентрации носителей следовало ожидать гораздо большего эффекта. В результате было установлено, что в системе электрод–изолятор–сверхпроводящая пленка  $YBa_2Cu_3O_x$  (Y123) электрическое поле может влиять на  $T_c$  и вольт-амперные характеристики (ВАХ) выше и ниже  $T_c$ , причем знак эффекта зависит от знака поля. Что касается величины эффекта, то в большинстве работ на пленках [7–9] он был существенным лишь при малых толщинах пленки. Так, в [9] влияние поля на проводимость выше  $T_c$  практически исчезало при изменении  $d$  от  $1c$  до  $8c$ , где  $c$  — постоянная решетки.

В то же время в целом ряде работ [4–6, 10–14] установлено, что в менее совершенных образцах эффект поля проявляется и при больших значениях  $d$ . Так, в [10, 12–14] было обнаружено обратимое изменение критического тока  $I_c$  и сопротивления  $R$  при  $I > I_c$  у

ВТСП-керамик Y123 во внешнем электрическом поле. При этом, как оказалось, наличие эффекта поля и его величина существенно зависят от состава и технологии приготовления керамики. В частности, эффект поля в Y123 керамиках пропадал после водородной обработки [15] или легирования их серебром [13,16].

Физическая природа эффекта поля в ВТСП-керамиках до сих пор не ясна, хотя имеющиеся экспериментальные данные позволяют полагать [12–14,16], что он прежде всего связан с возможным воздействием поля на слабые связи в границах зерен. В тонких пленках, содержащих специально введенные слабые связи, эффект электрического поля также резко возрастает [17,18]. Исходя из сказанного, несомненный интерес представляет постановка экспериментов по возможному эффекту поля в кристаллах ВТСП, не содержащих указанные слабые связи.

В настоящей работе было проведено изучение вольт-амперных характеристик кристаллов  $YBa_2Cu_3O_x/Y_2BaCuO_5$ , представляющих большой интерес для исследования и применения эффекта левитации [19], и установлено влияние внешнего электрического поля на ВАХ при 77 К.

## 1. Экспериментальная методика

Исследуемые образцы вырезались из большого монокристалла  $YBa_2Cu_3O_x$  (Y123)/ $Y_2BaCuO_5$  (Y211), полученного методом направленной кристаллизации из расплава [19,20], который вкратце заключается в следующем. Сначала исходная смесь порошков Y123 (74 wt%), Y211 (24 wt%)

и PtO<sub>2</sub> (1 wt%) была обработана в шаровой мельнице и спрессована в гексагональные таблетки шириной 29 mm. Затем на поверхность таблетки в центре помещалась затравка, в качестве которой использовался пластинчатый монокристалл Nd<sub>1+x</sub>Ba<sub>2-x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> с поперечными размерами до 1 mm, после чего она погружалась в печь с температурным градиентом (до 15° C/cm). После гомогенизации при соответствующей температуре, когда таблетка уже плавится, а затравка остается кристаллом, производилось медленное охлаждение, в процессе которого и происходил рост кристалла Y123 на затравке в направлении градиента температур. В результате получался монодоменный кристаллический монокристалл высотой до 15 mm с кристаллографической ориентацией, соответствующей ориентации затравки, а именно: плоскость *a*-*b* параллельна, а ось *c* перпендикулярна верхней поверхности монокристалла.

Что касается фазы Y211, то, по данным [21], она представлена главным образом в виде частиц размером около 1 μm, причем их объемная доля существенно больше в нижней части и на периферии кристаллического монокристалла. Так, объемная доля выделений Y211 вдоль *c*-направления роста изменяется от 8 у верхней поверхности до 35% на расстоянии 5 mm [21]. Вокруг возможных включений на основе Pt, напротив, наблюдаются свободные от Y211 зоны.

В данной работе для измерения сверхпроводящих характеристик (ВАХ и зависимости сопротивления *R* от температуры) вырезались образцы с размерами примерно 2 × 4 × 1.5 mm соответственно вдоль направлений *a*, *b* и *c*, на боковую поверхность которых (2 × 4 mm) наносились четыре индиевых контакта. Рентгенографические исследования методом ω-сканирования показали, что образцы являются монокристаллами с блочной разориентацией в пределах 2–3°. Согласно оптическим наблюдениям [20], в подобных монокристаллах имеется блочная структура с малоугловой разориентацией (не более 5°), причем указанные малоугловые границы являются чистыми и не содержат микротрещин.

Эксперименты по влиянию внешнего электрического поля проводились в системе электрод–изолятор–сверхпроводник аналогично [10] при 77 K, т.е. при *T* < *T<sub>c</sub>*. Высокое отрицательное напряжение *U* (*U*<sub>max</sub> = 6 kV) прикладывалось к металлическому электроду, который был изолирован от образца фторопластовой пленкой толщиной *t* = 50 μm. Через токовые контакты пропускался транспортный ток *I* и измерялось напряжение *V* на потенциальных контактах. Значение критического тока определялось по уровню 1 μV/mm.

При исследовании эффекта электрического поля последнее могло включаться как до начала эксперимента, так и в процессе измерения ВАХ при некотором значении *I*. Измерение ВАХ проводилось также и в магнитном поле *B* ≤ 200 G, которое было направлено вдоль оси *c* и создавалось катушкой с током.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости сопротивления (*R*-*T*) для различных образцов (из верхнего (*U*) и близкого к нижнему (*L*) слоев монокристалла). Указанные слои находились по высоте монокристалла на расстоянии ≈ 12 mm. Видно, что для образцов *U* и *L* критические температуры *T<sub>c</sub>* практически одинаковы и равны ≈ 92.5 K (*R* = 0) с довольно узким интервалом сверхпроводящего перехода Δ*T* ≤ 1.5 K. Подобные значения *T<sub>c</sub>* были получены авторами ранее и при использовании стандартного SQUID магнетометра.

Плотности критического тока *J<sub>c</sub>* для образцов *U* и *L* также были близки и равнялись примерно 200 A/cm<sup>2</sup> при 77 K. При этом величина *J<sub>c</sub>* не зависела от магнитного поля (измерения проводились до *B* = 200 G).

На рис. 2 представлены зависимости *I<sub>c</sub>* от *T* (рис. 2, *a*) и от величины (1 - *T*/*T<sub>c</sub>*) (кривые 1 и 2 на рис. 2, *b*) для различных типов образцов. Дело в том, что, согласно [22,23], для описания изменений *I<sub>c</sub>* с температурой в ВТСП-монокристаллах в основном используются два типа зависимостей, а именно

$$I_c \sim \exp(-T/T_0) \tag{1}$$

для низких температур и

$$I_c \sim (1 - T/T_c)^n \tag{2}$$

для температурной области вблизи *T<sub>c</sub>*. При этом в экспериментах обычно *T<sub>0</sub>* = 20–30 K, а *n* = 0.5–1.5.

В нашем случае из рис. 2, *a* видно, что для транспортного тока зависимость *I<sub>c</sub>*(*T*) может быть описана выражением (1) лишь на участке примерно 30–70 K, причем *T<sub>0</sub>* = 67 K. Что касается выражения (2), то оно в большей степени согласуется с полученными экспериментальными данными (точки 1 и 2 на рис. 2, *b*), которые

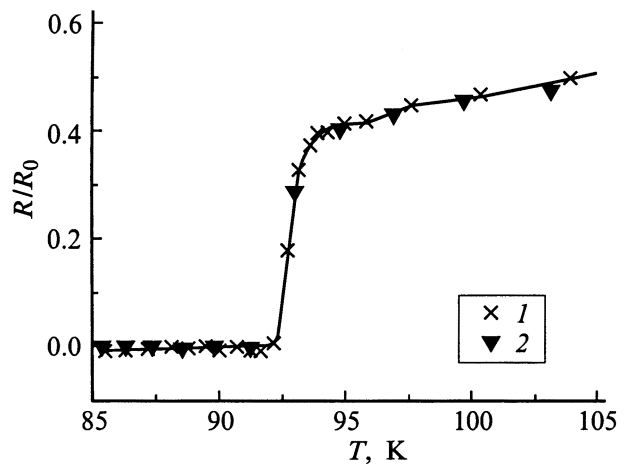
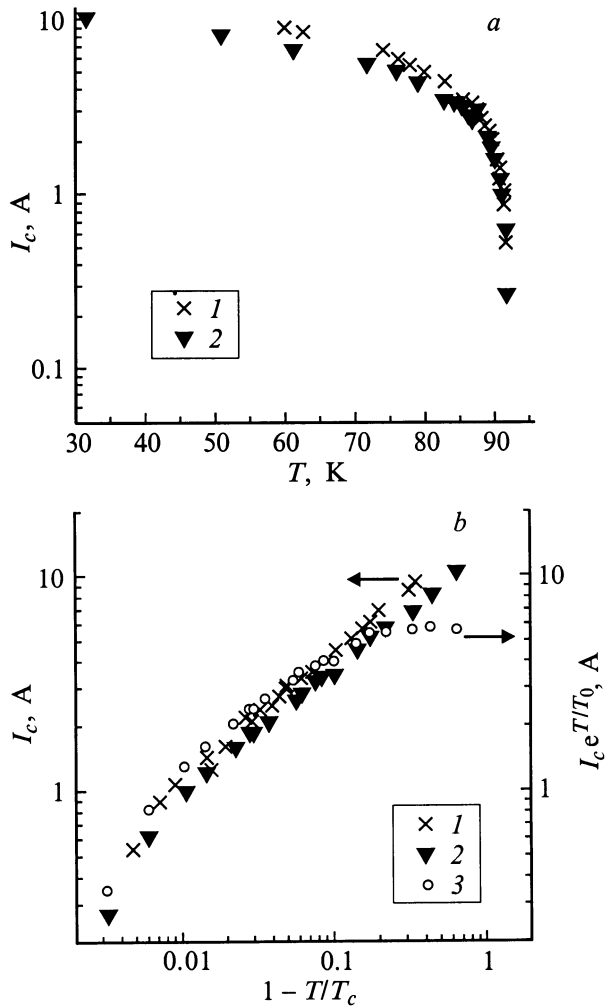


Рис. 1. Температурные зависимости относительного сопротивления *R*/*R<sub>0</sub>* для образцов верхнего (1) и нижнего (2) слоев монокристалла, *R<sub>0</sub>* — величина *R* при 300 K.



**Рис. 2.** Зависимости критического тока от температуры (а) и от величины  $(1 - T/T_c)$  (b) для образцов  $U$  (1) и  $L$  (2). 3 — зависимость величины  $I_c e^{T/T_0}$  от  $(1 - T/T_c)$  для  $L$ -образца (b).

соответствуют ему при значении  $n = 0.6$  в интервале 30–91 К с изменением  $n$  на 1.1 в очень малой области 91.0–91.7 К.

Поскольку в ряде случаев авторами используется и комбинация выражений (1) и (2) в виде [23]

$$I_c = I_{c0}(1 - T/T_c)^n \exp(-T/T_0), \quad (3)$$

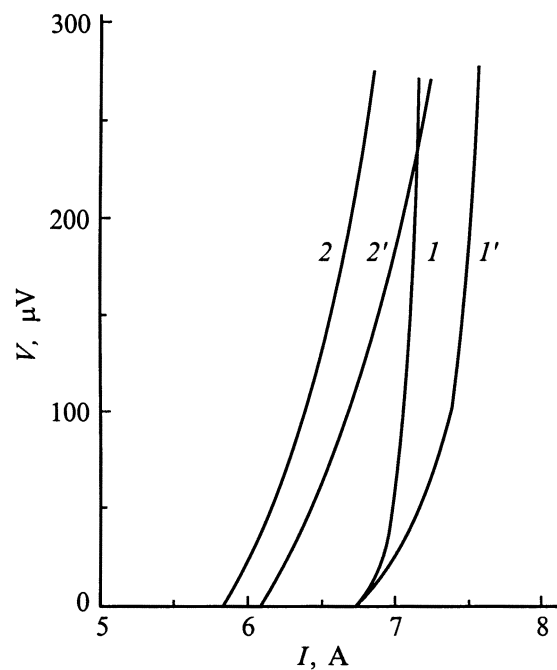
на рис. 2, b (точки 3) представлена также экспериментальная зависимость величины  $I_c \exp(T/T_0)$  от  $(1 - T/T_c)$  для  $L$ -образцов при  $T_0 = 67$  К. Видно, что выражение (3) приводит к переменному значению  $n$ , которое при понижении температуры плавно меняется от 1.1 до нуля.

Таким образом, полученные нами экспериментальные результаты по температурной зависимости  $I_c$  в изученной области лучше всего описываются выражением (2).

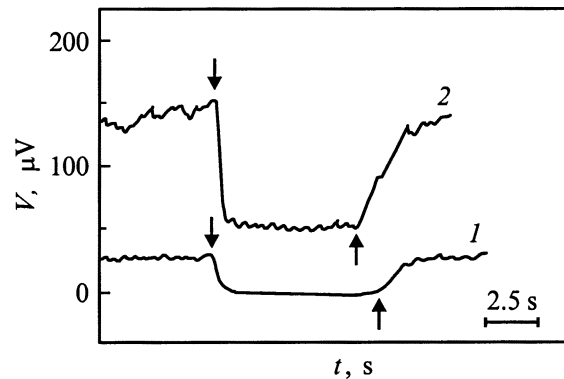
Влияние электрического поля на ВАХ для различных образцов демонстрируется на рис. 3. Видно, что в образцах  $U$  величина  $I_c$  в поле практически не изменяется,

тогда как при  $I > I_c$  под действием поля происходит существенное понижение сопротивления  $R$  (кривые 1 и 1'). В то же время для образцов  $L$  в поле происходит не только понижение  $R$  при  $I > I_c$ , но и заметное увеличение  $I_c$  (кривые 2 и 2').

На рис. 4 показано изменение напряжения  $V$  на ВАХ для образца  $L$  при включении и выключении электрического поля при двух значениях  $I = \text{const}$ . Видно, что в обоих случаях включение поля  $E = 120$  MV/m при  $I \geq I_c$  приводит к существенному уменьшению  $V$ , вплоть до перехода образца из резистивного состояния в сверхпроводящее (кривая 1). При этом эффект поля является обратимым. Аналогичный результат наблюдается и в образце  $U$  за исключением области вблизи  $I_c$ , где эффект поля отсутствует.



**Рис. 3.** Вольт-амперные кривые для образцов  $U$  (1) и  $L$  (2) при значениях  $E$ , MV/m: 1, 2 — 0; 1', 2' — 120.



**Рис. 4.** Изменение напряжения  $V$  в результате включения ( $\downarrow$ ) и выключения ( $\uparrow$ ) электрического поля  $E = 120$  MV/m для  $L$ -образца при разных значениях  $I$ , А: 1 — 6.1, 2 — 6.5.

Иначе говоря, в монокристаллических образцах Y123/211 с относительно небольшим содержанием выделений Y211 (объемная доля — 8%) электрическое поле  $E = 120 \text{ MV/m}$  не влияет на величину критического тока  $I_c$ . В то же время при токах несколько более  $I_c$  сопротивление образца в поле уменьшается. Если же в кристалле содержится большая доля выделений Y211 (в нашем случае больше 35%), то электрическое поле приводит к увеличению  $I_c$  и соответствующему уменьшению  $R$  при  $I > I_c$ . При этом определяющим фактором появления эффекта поля в кристаллах Y123 с выделениями Y211, с нашей точки зрения, является то, что эти выделения являются непроводящими электрический ток.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что эффект электрического поля может наблюдаться и в монокристаллах при наличии в них достаточно большого числа непроводящих включений, причем эффект выражен тем сильнее, чем больше концентрация этих включений.

## Список литературы

- [1] R.E. Glover, M.D. Sherill. Phys. Rev. Lett. **5**, 248 (1960).
- [2] В.Б. Сандомирский. Письма ЖЭТФ **2**, 396 (1965).
- [3] H. Meissner. Phys. Rev. **154**, 422 (1967).
- [4] В.В. Богатко, Ю.Н. Веневцев. ФТТ **29**, 2872 (1987).
- [5] Ю.В. Гоменюк, В.З. Лозовский, В.С. Лысенко, К.Н. Походня, О.В. Сытенко, И.П. Тягульский. ДАН УССР. Сер. А, **11**, 49 (1989).
- [6] Ю.В. Гоменюк, Н.И. Клой, В.З. Лозовский, В.С. Лысенко, А.Ю. Прокофьев, Б.Н. Романюк, Т.Н. Сытенко, И.П. Тягульский. СФХТ **4**, 762 (1991).
- [7] J. Mannhart, J.G. Bednorz, K.A. Müller, D.G. Schlom. Z. Phys. **B83**, 307 (1991).
- [8] J. Mannhart, D.G. Schlom, J.G. Bednorz, K.A. Müller. Phys. Rev. Lett. **67**, 2099 (1991).
- [9] X.X. Xi, C. Doughty, A. Walkenhorst, C. Kwon, Q. Li, T. Venkatesan. Phys. Rev. Lett. **69**, 1240 (1992).
- [10] Б.И. Смирнов, С.В. Криштопов, Т.С. Орлова. ФТТ **34**, 2482 (1992).
- [11] В.В. Леманов, А.Л. Холкин, А.Б. Шерман. Письма ЖЭТФ **56**, 580 (1992).
- [12] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, С.В. Криштопов. ФТТ **35**, 2250 (1993).
- [13] T.S. Orlova, B.I. Smirnov. Supercond. Sci. Technol. **6**, 899 (1994).
- [14] B.I. Smirnov, T.S. Orlova, H.-J. Kaufmann. Proc. Fourth Int. Conf. and Exhibition: World Congress on Superconductivity / Ed. by K. Krishen, C. Burnham. Lindon B. Johnson Space Center, Houston, Texas (1994). V. 1.P. 232.
- [15] Б.И. Смирнов, Ю.М. Байков, А.Н. Кудымов, Т.С. Орлова, Ю.П. Степанов. ФТТ **37**, 1794 (1995).
- [16] Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, Ж.-И. Лаваль. ФТТ **40**, 1195 (1998).
- [17] J. Mannhart, J. Strobel, J.G. Bednorz, Ch. Gerber. Appl. Phys. Lett. **62**, 630 (1993).
- [18] Z.G. Ivanov, E.A. Stepansov, A.Y. Tzalenchuk, R.I. Shekhter, T. Claeson. IEE Trans. Appl. Superc. **3**, 2925 (1993).
- [19] V.R. Todt, S. Sengupta, D.J. Miller. Appl. Supercond. **3**, 175 (1995).
- [20] S. Sengupta, J. Corpus, M. Agarwal, J.R. Gainer, Jr. Mater. Sci. Eng. **B53**, 62 (1998).
- [21] P. Diko, V.R. Todt, D.J. Miller, K.C. Goretta. Physica **C278**, 192 (1997).
- [22] А.А. Жуков, В.В. Мошалков. СФХТ **4**, 850 (1991).
- [23] S. Senoussi. J. Phys. III France **2**, 1041 (1992).