

# Влияние условий эксперимента на эффект электрического поля в $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -керамике

© Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, А.Н. Кудымов, М.Т. Ланаган\*, Н. Чен\*, К.Ч. Горетта\*

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

\* Аргонская национальная лаборатория, 60439-4838 Аргон, США

(Поступила в Редакцию 16 июля 1997 г.)

Экспериментально изучалось влияние температуры ( $T$ ), знака электрического поля ( $\pm E$ ), а также изменений в измерительной системе электрод/изолятор/сверхпроводник ( $E/I/S$ ) на эффект поля в  $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -керамике. Установлено, что при 77 К и значениях  $E \geq 60 \text{ MV/m}$  происходит увеличение критического тока  $I_c$  и проводимости образцов при  $I > I_c$  независимо от знака поля. При меньших полях и отрицательном потенциале на электроде может наблюдаться уменьшение проводимости в электрическом поле. С увеличением температуры эффект поля уменьшается и практически пропадает вблизи  $T_c$ , когда образец еще остается сверхпроводником. Проведены также опыты с более сложными системами  $E/I/M/I/S$  и  $E/I/M/S$  ( $M$  — металлическая фольга), которые подтверждают, что наблюдаемые эффекты связаны именно с внешними электрическим полем.

Ранее в [1] было обнаружено обратимое влияние электрического поля в системе металлический электрод/изолятор/сверхпроводник ( $E/I/S$ ) на вольт-амперные характеристики (ВАХ) сверхпроводящей керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Y-123). Далее было установлено [2–6], что указанный эффект поля может существенно зависеть от технологии приготовления и состава керамики, а также условий проведения опытов. В частности, особенно большой эффект электрического поля наблюдался в текстурированных сверхпроводящих керамиках  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (Bi-2212) и  $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223) [5,6].

В настоящей работе наличие большого эффекта поля при 77 К в керамике Bi-2223 было использовано для изучения его зависимости от условий проведения экспериментов, а именно от знака электрического поля, температуры опыта и конструкции системы  $E/I/S$ .

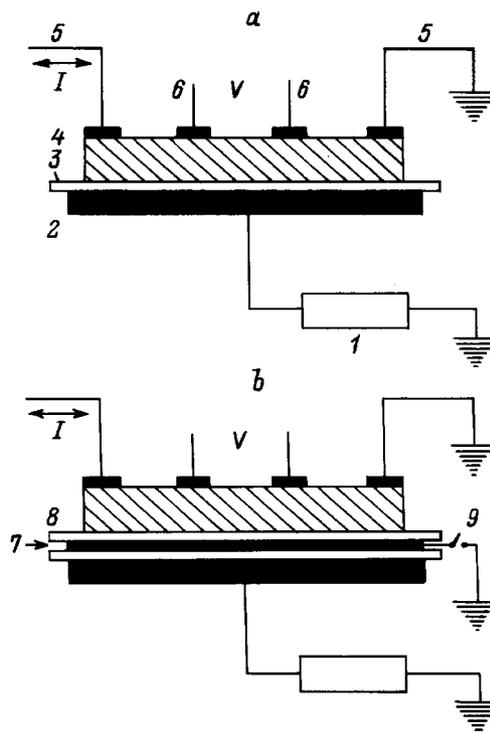
## 1. Экспериментальная методика

Большие пластины Bi-2223 получались путем комбинации холодного прессования, прогрева и горячего прессования [7,8]. В результате такой обработки возникала сильно текстурированная структура с осью  $c$ , ориентированной параллельно направлению прессования. Содержание фазы Bi-2223, по рентгеновским данным, составляло около 95%.

Критическая температура  $T_c$  для полученных пластин равнялась 106–107 К, плотность критического тока при импульсном источнике составляла  $10^3 \text{ A/cm}^2$ .

Для измерения ВАХ использовались образцы прямоугольной формы с размером  $1.5 \times 2 \times 4 \text{ mm}$ , на боковую поверхность которых ( $2 \times 4 \text{ mm}$ ) наносились четыре индиевых контакта. Перед нанесением контактов с поверхности удалялся слой около 0.2 mm.

Эксперимент по влиянию внешнего электрического поля на ВАХ образцов в большинстве случаев проводился аналогично [1] в системе  $E/I/S$  при 77 К (рис. 1, а). Высокое отрицательное или положительное напряжение  $U$  прикладывалось к электроду 2, который был изолирован от образца 4 тефлоновой пленкой 3 толщиной



**Рис. 1.** Схемы экспериментального исследования эффекта электрического поля: варианты  $E/I/S$  (а) и  $E/I/M/I/S$  (б). 1 — источник высокого напряжения, 2 — металлический электрод, 3, 8 — пленки диэлектрика, 4 — образец Bi-2223; 5 — токовые, 6 — потенциальные контакты, 7 — металлическая фольга, 9 — переключатель заземления.

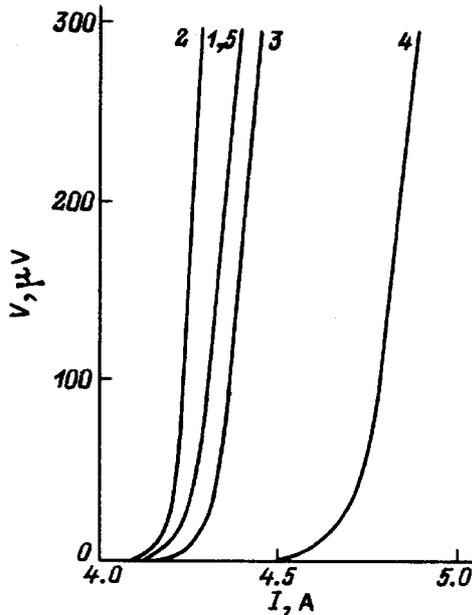
50  $\mu\text{m}$ . Через токовые контакты 5, один из которых был заземлен, пропускаться постоянный транспортный ток  $I$ , и на потенциальных контактах (6) измерялось напряжение  $V$ . Запись ВАХ осуществлялась двухкоординатным самописцем. Максимальные значения  $U$  равнялись 6 kV, что соответствовало напряженности электрического поля  $E = 120 \text{ MV/m}$ .

Дополнительно также были проведены опыты в системе электрод/изолятор/металл/изолятор/сверхпроводник ( $E/I/M/I/S$ ), которая включала металлическую фольгу 7 толщиной 15  $\mu\text{m}$  и тефлоновую пленку 8 (рис. 1, *b*), и в системе  $E/I/M/S$ , которая в отличие от схемы, показанной на рис. 1, *a*, содержала металлическую фольгу между изолятором и образцом.

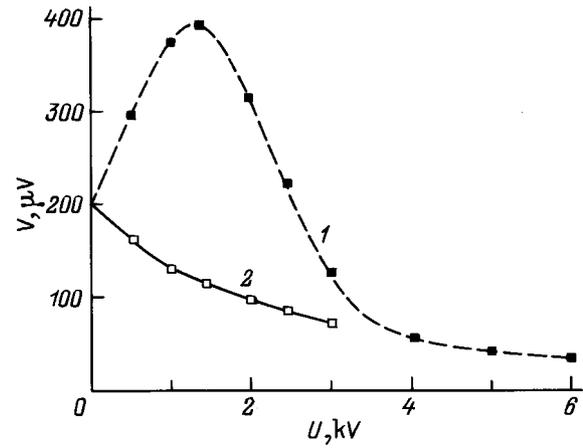
При исследовании эффекта поля последнее могло включаться как до начала эксперимента (при  $I = 0$ ), так и в процессе измерения ВАХ при некотором значении  $I$ . В последнем случае измерялось изменение напряжения  $V$  при включении и выключении электрического поля в условиях  $I = \text{const}$ .

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ранее проведенные исследования эффекта поля на керамиках Y-123 [1–3] и Bi-2212 [5] показали, что при отрицательных  $U$  в сильном электрическом поле ( $U = -6 \text{ kV}$ , напряженность поля  $E = 120 \text{ MV/m}$ ) происходит смещение ВАХ в сторону больших токов (понижение напряжений при  $I = \text{const}$ ), в то время как при малых значениях  $E$  возможен обратный эффект, т. е.



**Рис. 2.** Вольт-амперные кривые для образца Bi-2223 при разных отрицательных значениях  $U$ .  $U$  (kV): 1, 5 — 0, 2 — 1.5, 3 — 3; 4 — 6.  $T = 77 \text{ K}$ . Система  $E/I/S$ . Нумерация кривых соответствует порядку их измерения.



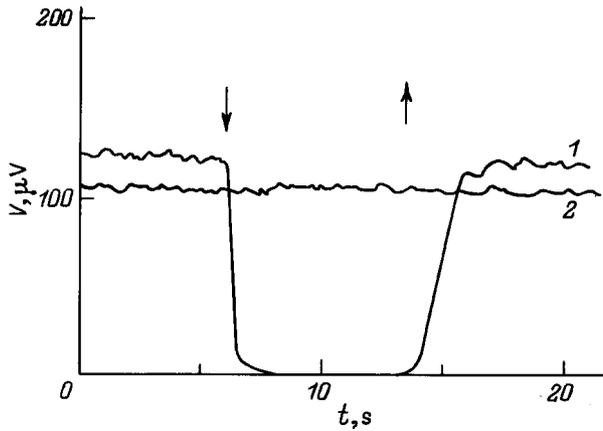
**Рис. 3.** Зависимость  $V$  от  $U$  для керамики Bi-2223 при отрицательном (1) и положительном (2) потенциалах на электроде.  $I = \text{const}$ .  $T = 77 \text{ K}$ . Система  $E/I/S$ .

смещение ВАХ в сторону меньших токов (увеличение  $V$  при  $I = \text{const}$ ).

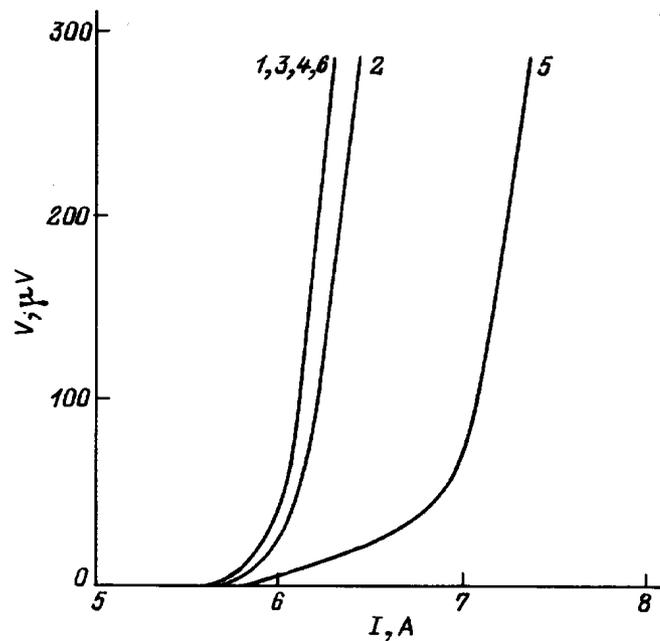
Влияние величины отрицательного потенциала  $U$  на положение ВАХ для образцов Bi-2223 демонстрируется на рис. 2 (нумерация кривых соответствует порядку их измерения). Видно, что наблюдаемый эффект аналогичен описанному выше для Y-123, а именно: сначала при увеличении  $U$  ВАХ смещается влево (кривая 2) относительно исходной (кривая 1), затем эффект поля как бы пропадает (кривая 3), а при дальнейшем возрастании  $U$  ВАХ смещается вправо (кривая 4).

На рис. 3 показаны типичные зависимости  $V$  от величины потенциала  $U$  при заданном  $I = \text{const}$ . Как видно, в случае отрицательного потенциала (кривая 1) значение  $V$  сначала возрастает по сравнению с исходным  $V_0$  при  $U = 0$ , а затем снижается, имея максимум в области  $U \cong -1.5 \text{ kV}$ . При этом по достижении  $U \cong -2.5 \text{ kV}$  значение  $\Delta V = V - V_0$  меняет знак. При подаче на электрод положительного потенциала (кривая 2) величина  $V$ , как правило, монотонно уменьшается с ростом  $U$ , т. е.  $\Delta V < 0$  при всех  $U$ . И в том, и в другом случае эффект электрического поля имеет обратимый характер, и значение  $V_0$  восстанавливается после снятия поля. Следует отметить, что поскольку в процессе опыта  $I = \text{const}$ , величина  $\Delta V$  характеризует изменение сопротивления  $R$  ( $\Delta R/R = \Delta V/V$ ).

Изменение напряжений  $V$  на ВАХ при включении и выключении электрического поля для разных температур при  $U < 0$  в условиях  $I = \text{const}$  ( $I > I_c$ ) показано на рис. 4. Температура опыта постепенно повышалась от 77 K после испарения жидкого азота в дьюаре и измерялась термопарой, находящейся вблизи образца, реальная температура которого могла быть несколько выше показаний термопары  $T_r$ . Из рис. 4 видно, что эффект поля практически пропадает при  $T \leq T_c$ , когда образец еще остается сверхпроводником, хотя и с малыми значениями  $I_c$  (вариант 2).



**Рис. 4.** Изменение величины  $V$  при  $I = \text{const}$  в результате включения ( $\downarrow$ ) и выключения ( $\uparrow$ ) электрического поля  $E = -80 \text{ MV/m}$  при температурах  $T_i = 77 \text{ K}$  (1) и  $101 \text{ K}$  (2) и соответствующих критических токах  $I_c = 2 \text{ A}$  (1) и  $0.15 \text{ A}$  (2). Система  $E/I/S$ .



**Рис. 5.** Вольт-амперные кривые для образца Bi-2223 в системах  $E/I/M/S$  (1-3) и  $E/I/S$  (4-6) при отрицательных значениях  $U$ .  $U$  (kV): 1, 3, 4, 6 — 0, 2, 5 — 6.  $T = 77 \text{ K}$ . Нумерация кривых соответствует порядку их измерения.

Таким образом, влияние знака электрического поля и температуры опыта на эффект поля в керамике Bi-2223 качественно согласуется с данными, полученными ранее для керамик Y-123 [1-3] и Bi-2212 [5]. В то же время природа наблюдаемого эффекта в керамиках остается неясной в отличие от такового для очень тонких пленок [9-11].

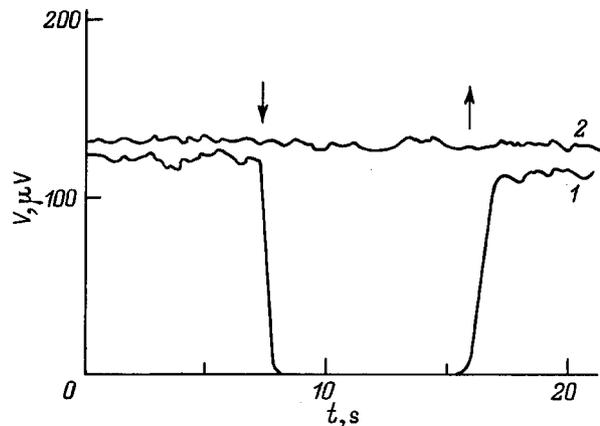
В связи с этим ранее [12] и в настоящей работе были проведены специальные эксперименты с целью

выявления возможных побочных факторов, приводящих к эффекту поля (см. например, [13]). Для этого прежде всего на образцах Bi-2223 были проведены опыты (аналогичные [12] для Y-123) в системе  $E/I/M/S$ , которая отличается от системы  $E/I/S$  (рис. 1, а) наличием металлической фольги между диэлектриком и образцом. Вольт-амперные кривые, полученные в том и другом случаях, представлены на рис. 5. Видно, что влияние электрического поля на ВАХ в системе  $E/I/M/S$  существенно меньше, чем в случае  $E/I/S$ , однако оно все же остается значительным. Для керамики Y-123 эффект поля был гораздо меньше, чем в Bi-2223, и в обеих системах был почти одинаковым [12]. Такое отличие в результатах опытов на Y-123 и Bi-2223, по-видимому, связано с наличием в Y-123 на поверхности слоя с пониженным содержанием кислорода.

Дополнительно также были проведены эксперименты в системе  $E/I/M/I/S$ , содержащей между двумя диэлектрическими пленками металлическую фольгу, которая могла быть заземлена или изолирована (рис. 1, б). Полученные результаты представлены на рис. 6. Видно, что эффект поля наблюдается только в случае изолированной металлической фольги. При заземлении же последней, когда электрическое поле экранируется и исключается его влияние на образец, эффект поля пропадает. Этот результат еще раз указывает, что именно электрическое поле является причиной наблюдаемого изменения параметров вольт-амперных кривых.

Таким образом, в настоящей работе получены дополнительные экспериментальные результаты, которые наряду с известными данными для керамик [1-6, 12] и относительно толстых пленок [11] позволяет еще раз утверждать, что в объемных высокотемпературных сверхпроводниках имеет место реальный эффект поля.

К сожалению, физическая природа этого эффекта до сих пор не ясна, хотя и прослеживается некоторая его корреляция с наличием в образцах слабых связей



**Рис. 6.** Изменение  $V$  для образца Bi-2223 при включении ( $\downarrow$ ) и выключении ( $\uparrow$ ) электрического поля ( $U = 6 \text{ kV}$ ) в системе  $E/I/M/I/S$  при незаземленной (1) и заземленной (2) металлической фольге.  $I = \text{const}$ .  $T = 77 \text{ K}$ .

$S-I-S$ -типа [3]. Не исключено также, что электрическое поле, воздействуя на джозефсоновские контакты у поверхности образца, приводит к джозефсоновскому излучению, проникающему в глубь керамики [14,15], и нарушению фазовой когерентности носителей сверхпроводящего тока.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российской академии наук (Физико-технический институт) и департамент энергии США (Аргонская национальная лаборатория, контракт W-31-109-Eng-38).

## Список литературы

- [1] Б.И. Смирнов, С.В. Криштопов, Т.С. Орлова. ФТТ **34**, 8, 2482 (1992).
- [2] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, С.В. Криштопов. ФТТ **35**, 8, 2250 (1993).
- [3] T.S. Orlova, V.I. Smirnov. Supercond. Sci. Technol. **7**, 12, 899 (1994).
- [4] Б.И. Смирнов, Ю.М. Байков, А.Н. Кудымов, Т.С. Орлова, Ю.П. Степанов. ФТТ **37**, 6, 1794 (1995).
- [5] T.S. Orlova, A.N. Kudymov, V.I. Smirnov, D.J. Miller, M.T. Lanagan, K.C. Goretta. Physica **C235**, 194 (1995).
- [6] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, А.Н. Кудымов, М.Т. Ланаган, Н. Чен, К.Ч. Горетта. ФТТ **38**, 10, 2931 (1996).
- [7] K.C. Goretta, M.T. Lanagan, T.J. Brent, S.E. Dorris, J. Joo, J.J. Picciolo, R.A. Shearer, J.P. Singh, S. Wasylenko, P.M. Winandy, X.W. Wang, C.A. Youngdahl, R.B. Poeppel, D.J. Miller, T.C. Holesenger, P. Kostic, N. Chen. Appl. Supercond. **2**, 6, 411 (1994).
- [8] N. Chen, A.C. Biondo, S.E. Dorris, K.C. Goretta, M.T. Lanagan, C.A. Youngdahl, R.B. Poeppel. Supercond. Sci. Technol. **6**, 10, 674 (1993).
- [9] J. Mannahrt. Mod. Phys. Lett. **B6**, 10, 555 (1992).
- [10] X.X. Xi, T. Venkatesan. Physics News in 1992 / Ed. P.P. Schewe and B.P. Stein. Am. Inst. Phys., N.Y. (1993). P. 44.
- [11] В.В. Леманов, А.Л. Холкин. ФТТ **36**, 6, 1537 (1994).
- [12] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, Х.-Й. Кауфманн. ФТТ **36**, 2, 460 (1994).
- [13] K. Peterson, I. Takeuchi, V. Talynasky, S. Doughty, X.X. Xi, T. Venkatesan. Appl. Phys. Lett. **67**, 10, 1477 (1995).
- [14] В.Ф. Мастеров. В кн.: Высокотемпературная сверхпроводимость / Под ред. А.А. Киселева. Машиностроение, Л. (1990). С. 405.
- [15] G.A. Ovsyannikov, K.Y. Constantinian, L.E. Amatuni. Nonlinear Superconductive Electronics and Josephson Devices / Ed. G. Costabile, S. Pagano, N.F. Pedersen and M. Russo. Plenum Press, N.Y. (1991). P. 415.