

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 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

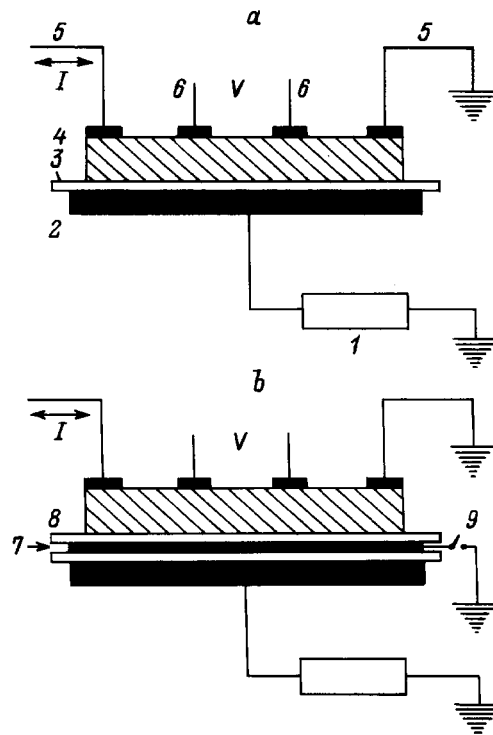


Рис. 1. Схемы экспериментального исследования эффекта электрического поля: варианты $E/I/S$ (а) и $E/I/M/I/S$ (b). 1 — источник высокого напряжения, 2 — металлический электрод, 3, 8 — пленки диэлектрика, 4 — образец Bi-2223; 5 — токовые, 6 — потенциальные контакты, 7 — металлическая фольга, 9 — переключатель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

50 μm . 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 μm 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.

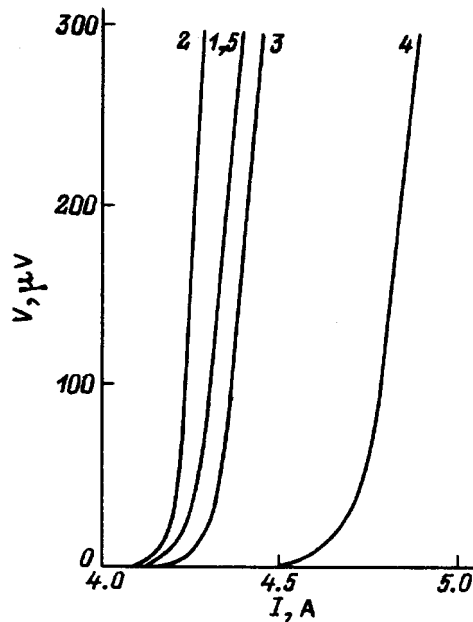


Рис. 2. Вольт-амперные кривые для образца Bi-2223 при разных отрицательных значениях U . U (kV): 1, 5 — 0, 2 — 1.5, 3 — 3; 4 — 6. $T = 77 \text{ K}$. Система $E/I/S$. Нумерация кривых соответствует порядку их измерения.

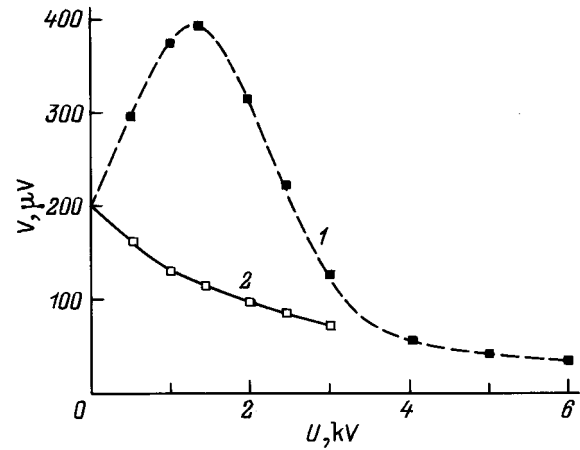


Рис. 3. Зависимость V от U для керамики Bi-2223 при отрицательном (1) и положительном (2) потенциалах на электроде. $I = \text{const}$. $T = 77 \text{ K}$. Система $E/I/S$.

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 ΔV 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).

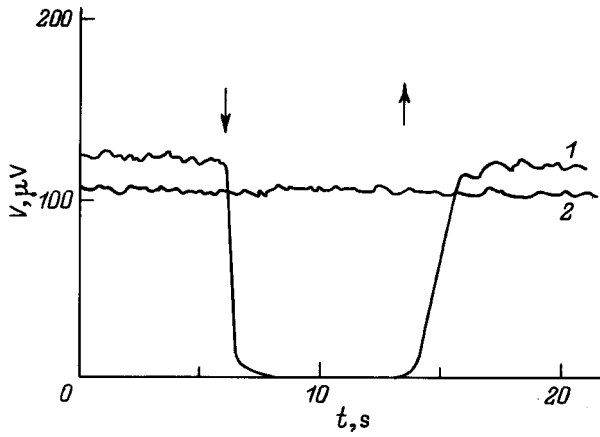


Рис. 4. Изменение величины V при $I = \text{const}$ в результате включения (\downarrow) и выключения (\uparrow) электрического поля $E = -80 \text{ MV/m}$ при температурах $T_i = 77$ (1) и 101 К (2) и соответствующих критических токах $I_c = 2$ (1) и 0.15 А (2). Система $E/I/S$.

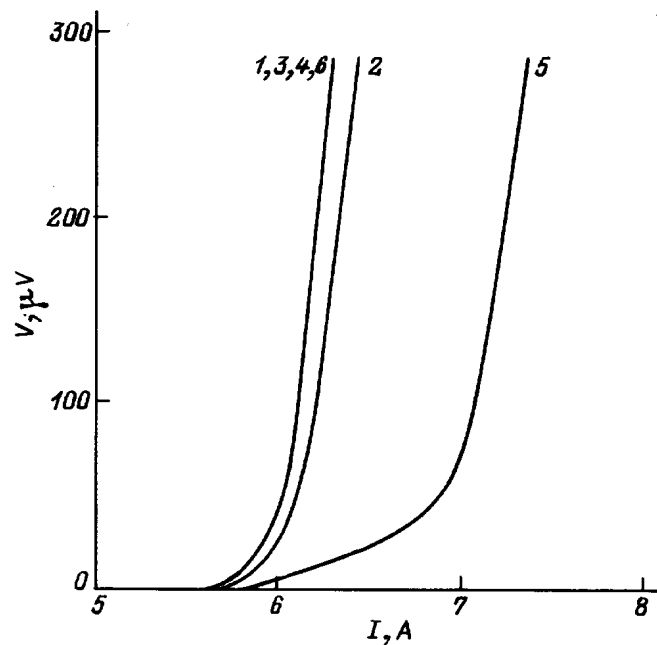


Рис. 5. Вольт-амперные кривые для образца Bi-2223 в системах $E/I/M/S$ (1-3) и $E/I/S$ (4-6) при отрицательных значениях U . U (кВ): 1, 3, 4, 6 — 0, 2, 5 — 6. $T = 77 \text{ K}$. Нумерация кривых соответствует порядку их измерения.

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

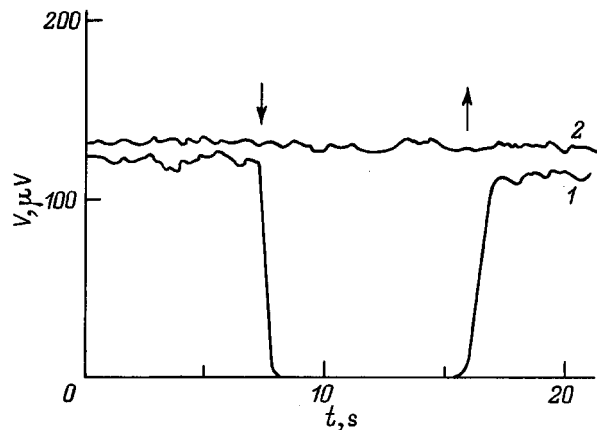


Рис. 6. Изменение V для образца Bi-2223 при включении (\downarrow) и выключении (\uparrow) электрического поля ($U = 6 \text{ kV}$) в системе $E/I/M/I/S$ при незаземленной (1) и заземленной (2) металлической фольге. $I = \text{const}$. $T = 77 \text{ K}$.

$S-I-S$ -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, B.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, B.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.