

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ КРИВЫЕ МОНОЛИТНЫХ (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x СВЕРХПРОВОДНИКОВ

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

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

* Аргонская национальная лаборатория, 604-39 Аргон, США

** Иллинойская корпорация по сверхпроводимости,
60201 Еванстон, США

(Поступила в Редакцию 24 апреля 1996 г.)

Экспериментально при 77 К изучалось влияние электрического поля напряженностью 120 MV/m на вольт-амперные характеристики монокристаллических сверхпроводников (BiPb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (2223). Большие текстурированные 2223-пластины получались путем холодного и горячего прессования порошков. Установлено, что в электрическом поле происходит значительное увеличение критического тока I_{c0} и проводимости образца при токах $I > I_{c0}$. Эффект электрического поля является обратимым, наблюдается для различных ориентаций поля относительно направления прессования и сохраняется в магнитном поле $H < 200$ Ое.

В последние годы большое внимание уделяется получению и исследованию монокристаллических высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые могут быть использованы в качестве проводников с высокой плотностью тока J_c (порядка 10^3 А/см²) [1-3]. Среди различных ВТСП особый интерес представляют материалы на висмутовой основе, поскольку они более стабильны по содержанию кислорода и устойчивы по отношению к влиянию внешней среды. Авторами [3] были отработаны различные способы получения соединений Bi₂Sr₂CaCu₂O_x (2212) и (BiPb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (2223) с большими значениями J_c и изучены их сверхпроводящие, структурные и механические свойства.

В то же время ранее [4] было установлено, что на сверхпроводящие свойства ВТСП-керамик может влиять электрическое поле, причем эффект поля зависит от состава и технологии приготовления материала [5-9]. В частности, особенно большой эффект электрического поля наблюдался в сильно текстурированных 2212-сверхпроводниках [10].

В настоящей работе круг исследуемых ВТСП-материалов с высокими значениями критического тока был расширен, и мы изучали влияние электрического поля на проводимость монокристаллических 2223-сверхпроводников, приготовленных двумя различными способами. В

результате было установлено, что при 77 К электрическое поле существенно влияет на вольт-амперные характеристики (ВАХ) указанных сверхпроводников, увеличивая критический ток I_{c0} и проводимость при $I > I_{c0}$. Эффект поля в значительной степени является обратимым, сохраняется в магнитном поле $H < 200$ Ое и наблюдается при температурах ниже критической T_c .

1. Материалы и экспериментальная методика

Исходные порошки 2223 приготавливались из промежуточных фаз $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ и CaCuCO_2 , которые синтезировались из смеси Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 и CuO [11]. Содержание фазы 2223 по рентгеновским данным составляло 95%.

Керамические пластины получались двумя способами [2]. В первом случае (метод CIP — cold isostatic pressing) порошок сначала подвергался холодному прессованию в тонкостенной трубке при 140 МПа, затем полученная пластина выдерживалась на воздухе при 865°C в течение 50 h. Далее подобная двухступенчатая операция могла производиться еще один или два раза. Окончательно пластины имели размер примерно $5 \times 10 \times 100$ mm.

Во втором случае (метод SF — sinter forging) первоначально в стальной матрице при 70 МПа прессовалась пластина размером около $7 \times 8 \times 38$ mm. Далее эта пластина подвергалась сжатию с некоторой скоростью (0.001–0.005 mm/min) на воздухе при 840–850°C. При этом окончательные напряжения составляли 2–3 МПа, а толщина пластины уменьшалась на 65–75 %. В результате такой обработки получалась сильно текстурированная структура с осью *c*, ориентированной параллельно направлению прессования.

Критическая температура сверхпроводящего перехода T_c для полученных пластин, определенная с помощью SQUID-магнетометра, равнялась 106–107 К. Максимальные значения плотности критического тока, определенные четырехконтактным методом при импульсном источнике тока, для CIP- и SF-пластин равнялись соответственно 10^3 и $8 \cdot 10^3$ А/см² [2].

В настоящей работе для измерения ВАХ использовались образцы прямоугольной формы с начальным размером $1.5 \times 2 \times 4$ mm, на боковую поверхность которых (2×4 mm) наносились четыре индиевых контакта. Перед нанесением контактов с поверхности удалялся слой толщиной около 0.2 mm.

Эксперимент по влиянию внешнего электрического поля на ВАХ образцов в большинстве случаев проводился аналогично [4] в системе металлический электрод–диэлектрик–сверхпроводник при 77 К, т.е. при $T < T_c$ (рис. 1). Высокое отрицательное напряжение U прикладывалось к электроду (2), который был изолирован от образца (4) пленкой (3) из фторопласта или слюды толщиной соответственно 50 и 40 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. Значение критического тока определялось при резком увеличении напряжений по уровню $1 \mu\text{V/mm}$. Максимальное значение U равнялось 6 kV, что соответствовало для разных пленок

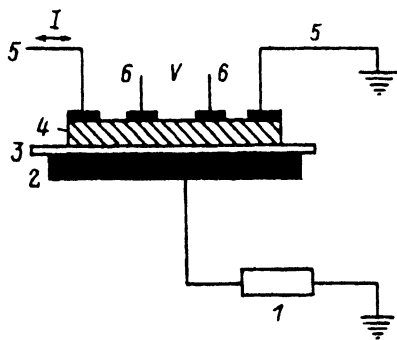


Рис. 1. Схема исследования эффекта электрического поля.

1 — источник высокого напряжения, 2 — металлический электрод, 3 — диэлектрическая пленка, 4 — ВТСП-образец, 5 — токвые, 6 — потенциальные контакты.

напряженностям электрического поля $E = 120$ и 140 MV/m. В отдельных опытах оценивалось также влияние температуры на эффект электрического поля, включая область $T > T_c$.

При исследовании эффекта электрического поля последнее могло включаться как до начала эксперимента (при $I = 0$), так и в процессе измерения ВАХ при некотором значении I . Изучение ВАХ и указанного эффекта проводилось также в магнитном поле $H \leq 220$ Oe, которое было направлено параллельно электрическому полю и создавалось катушкой с током.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для пластин, полученных методом СІР, изучались образцы с различной ориентацией транспортного тока и электрического поля относительно направления прессования z . При этом максимальные значения плотности критического тока J_{c0}^{max} при 77 К достигали 350 A/cm², хотя в большинстве случаев $J_{c0} = 150-280$ A/cm². Для SF-образцов электрическое поле всегда было ориентировано вдоль z и $J_{c0}^{max} = 400$ A/cm². При исследовании влияния магнитного и электрического полей на ВАХ оказалось, что для различных образцов оно является качественно одинаковым.

На рис. 2 демонстрируется эффект электрического поля на примере образца СІР-2223 для $E \perp z$. Видно, что в сильном электрическом поле $E = 120$ MV/m, как это наблюдалось и ранее для Y-123 и Bi-2212 [6,10], происходит существенное смещение ВАХ в сторону больших токов, т.е. I_c возрастает, а сопротивление образца при $I > I_{c0}$ уменьшается. Для $V > 50$ μ V относительное смещение ВАХ по току для СІР-2223 может достигать 20%. В случае образцов SF-2223 эффект поля в большинстве случаев меньше ($\approx 10\%$).

Изменение напряжений V на ВАХ со временем t в случае включения и выключения электрического поля в условиях $I = const$ ($I > I_{c0}$) показано на рис. 3. Видно, что включение электрического поля приводит к понижению напряжений (при малых V практически до нуля), которые вновь восстанавливаются при выключении поля (рис. 3,а). Если же поле E было включено до начала эксперимента (рис. 3,б), то при его выключении происходит резкий скачок напряжений V , которые восстанавливаются при включении поля.

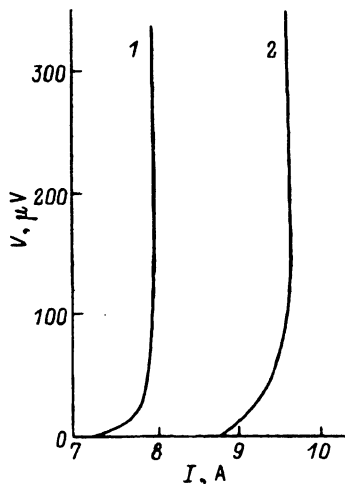


Рис. 2. Вольт-амперные кривые для образца CIP-2223 при значениях $E = 0$ (1) и 120 MV/m (2).

$E \perp z$, $J_{c0} = 320 \text{ A/cm}^2$, $T = 77 \text{ K}$.

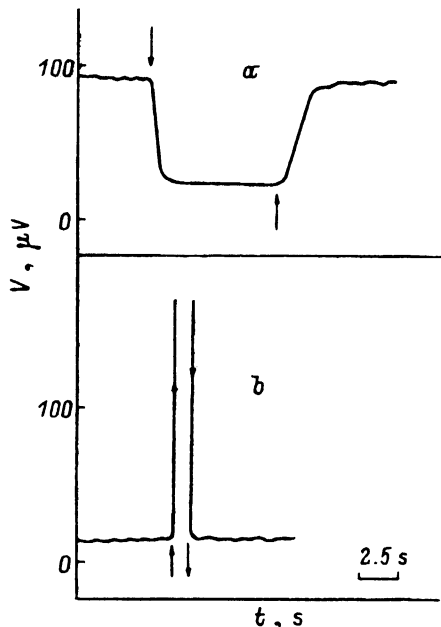


Рис. 3. Изменение величины V в результате включения (↓) и выключения (↑) электрического поля 120 MV/m для образца CIP-2223 при $I = \text{const}$.

$E \parallel z$, $J_{c0} = 210 \text{ A/cm}^2$, $T = 77 \text{ K}$. В случае b первоначально поле включалось при $I = 0$.

Типичные результаты (как для CIP, так и для SF-2223) по влиянию приложенного при 77 K магнитного поля $H < 200 \text{ Oe}$ на ВАХ представлены на рис. 4. Кривые пронумерованы в порядке их измерения. Видно, что в магнитном поле ВАХ смещаются в сторону меньших токов, причем для напряжений $V > 200 \mu\text{V}$ этот эффект очень мал ($\approx 3\%$), тогда как в области $V < 50 \mu\text{V}$ и, особенно, при $V < 10 \mu\text{V}$ наблюдается достаточно заметное влияние магнитного поля. Примечательно, что эффект магнитного поля является обратимым, т.е. при снятии поля ВАХ полностью восстанавливается (кривые 1 и 6 на рис. 4). Дополнительно была проведена проверка обратимости эффекта магнитного поля после охлаждения образца в поле $H = 187 \text{ Oe}$ от 300 до 77 K . Полученные данные представлены на рис. 5. При сопоставлении рис. 4 и 5 видно, что, во-первых, вольт-амперные кривые при 187 Oe практически совпадают и, во-вторых, остаточный эффект магнитного поля отсутствует и в случае охлаждения образца в поле.

Кроме того, на рис. 5 продемонстрировано влияние электрического поля как при наличии (кривые 1, 2), так и в отсутствие магнитного поля (кривые 3, 4). Видно, что для 2223-сверхпроводника эффект электрического поля сохраняется, по крайней мере до $H = 187 \text{ Oe}$, в то время как в Y-123 образцах он подавлялся уже при $H = 20 \text{ Oe}$ [6].

На рис. 5 обращает на себя внимание также наличие небольшого срыва (гистерезиса) на вольт-амперных кривых 2 и 4, причем значение тока срыва I_f практически не зависит от величины магнитного поля.

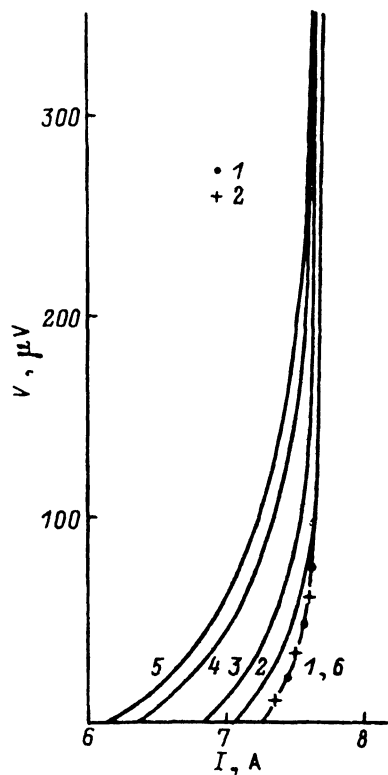


Рис. 4. Вольт-амперные кривые для образца SF-2223 при разных значениях внешнего магнитного поля. H (Oe): 1, 6 — 0, 2 — 22, 3 — 77, 4 — 132, 5 — 187. $E \parallel z$, $J_{c0} = 270 \text{ A/cm}^2$, $T = 77 \text{ K}$. Кривые пронумерованы в порядке их измерения.

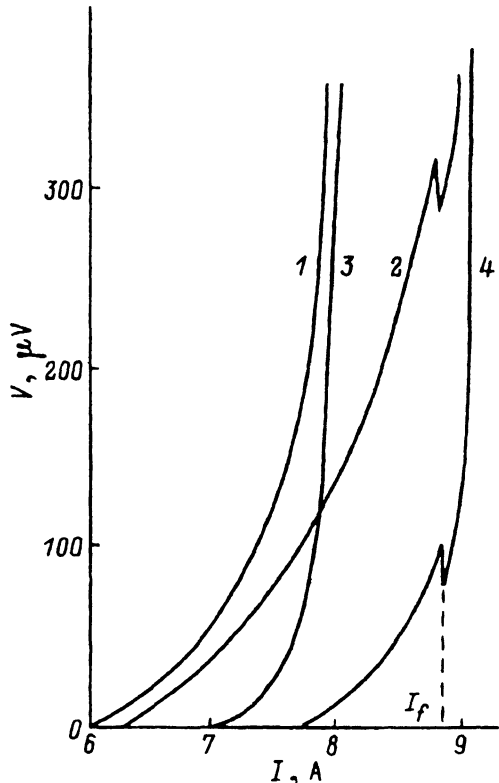


Рис. 5. Влияние электрического поля на ВАХ образца SF-2223 для разных значений H . H (Oe): 1, 2 — 187, 3, 4 — 0. E (MV/m): 1, 3 — 0, 2, 4 — 120. $E \parallel z$, $J_{c0} = 270 \text{ A/cm}^2$, $T = 77 \text{ K}$. Образец охлаждался от 300 K в магнитном поле $H = 187 \text{ Oe}$.

Подобное постоянство I_f для разных значений H наблюдалось и для ВТСП-керамик Y-123 [9].

Ранее для керамик Y-123 было показано [5], что влияние электрического поля на ВАХ наблюдается при 77 K, т.е. при $T < T_c$, а при $T > T_c$ эффект отсутствует. В настоящей работе были проведены опыты по эффекту поля и в интервале температур $77 \text{ K} < T < T_c$. В результате было установлено, что при повышении температуры от 77 K эффект поля пропадает несколько ниже T_c , когда образец еще остается сверхпроводником, хотя и с малыми значениями I_{c0} .

Таким образом, полученные результаты по влиянию электрического поля на ВАХ монокристаллических сверхпроводников Bi-2223 качественно согласуются с данными для ВТСП Y-123 [4-7] и Bi-2212 [10]. Следует лишь подчеркнуть большую величину эффекта поля для 2223- и 2212-образцов, которые выделяются высокими значениями J_{c0} . Ранее [5] проводились эксперименты на керамиках-2223 с малыми J_{c0} , но эффект поля был невелик (максимальное падение напряжений V в поле $E = 120 \text{ MV/m}$ достигало лишь 50%).

Само по себе наблюдение эффекта поля в монокристаллических сверхпроводниках представляется, конечно, необычным, поскольку глубина проникновения поля в ВТСП составляет примерно 5 \AA [12], и в тонких монокристаллических пленках эффект поля проявляется лишь в том случае, когда их толщина очень мала [13].

Анализируя результаты по эффекту электрического поля в композитах Y-123 и Y-123/Ag и сопоставляя их со структурными данными [14,15], авторы [6] пришли к выводу о том, что эффект поля возникает в результате воздействия последнего на слабые связи S/I/S-типа. Не исключено, что наличие изолирующего слоя на границах зерен может приводить к возникновению на них под воздействием поля электрических зарядов и тем самым способствовать увеличению критического тока и проводимости образцов [16]. Слабые связи S/I/S-типа, по-видимому, присутствуют и в исследованных нами 2223-образцах. В частности, они могут содержать несверхпроводящую фазу $(\text{Ca, Sr})_2\text{CuO}_3$ [17].

В заключение еще раз отметим, что в настоящей работе при 77 К удалось наблюдать большое влияние электрического поля на вольтамперные кривые монокристаллических сверхпроводников Bi-2223 с высокими значениями критического тока. Указанное влияние сохраняется в магнитном поле и пропадает при температурах несколько ниже T_c , когда образец еще остается сверхпроводником. В дальнейшем наличие большого эффекта поля в подобных ВТСП-материалах может быть использовано для его более детального исследования, что, безусловно, будет содействовать пониманию природы самого эффекта в монокристаллических сверхпроводниках.

Список литературы

- [1] K. Jagannadham, J. Narayan. Mater. Sci. Eng. **B26**, 1, 75 (1994).
- [2] K.C. Goretta, V.P. Brandel, M.T. Lanagan, J. Hu, D.J. Miller, S. Sengupta, J.C. Parker, M.N. Ali, N. Chen. IEEE Trans. Appl. Supercond. **5**, 5, 1309 (1995).
- [3] 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.G. Holesinger, P. Kostic, N. Chen. Appl. Supercond. **2**, 6, 411 (1994).
- [4] Б.И. Смирнов, С.В. Криштопов, Т.С. Орлова. ФТТ **34**, 8, 2482 (1992).
- [5] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, С.В. Криштопов. ФТТ **35**, 8, 2250 (1993).
- [6] T.S. Orlova, B.I. Smirnov. Supercond. Sci. Technol. **7**, 12, 899 (1994).
- [7] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова, Х.Й. Кауфманн. ФТТ **36**, 2, 460 (1994).
- [8] З. Дамм, Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **36**, 8, 2465 (1994).
- [9] Б.И. Смирнов, Ю.М. Байков, А.Н. Кудымов, Т.С. Орлова, Ю.П. Степанов. ФТТ **37**, 6, 1794 (1995).
- [10] T.S. Orlova, A.N. Kudymov, B.I. Smirnov, D.J. Miller, M.T. Lanagan, K.C. Goretta. Physica C **235**, 2, 194 (1995).
- [11] S.E. Dorris, B.C. Prorok, M.T. Lanagan, S. Sonha, B. Poeppel. Physica C **212**, 1, 66 (1993).
- [12] X.X. Xi, C. Doughty, A. Walkenhorst, C. Kwon, Q. Li, T. Venkatesan. Phys. Rev. Lett. **68**, 8, 1240 (1992).
- [13] J. Mannhart. Mod. Phys. Lett. **B 6**, 10, 555 (1992).
- [14] J. Jung, M.A.-K. Mohamed, S.C. Chend, J.P. Franck. Phys. Rev. **B 42**, 10, 6181 (1990).
- [15] J. Jung, I. Isaak, M.A.-K. Mohamed. Phys. Rev. **B 48**, 10, 7526 (1993).
- [16] B. Ya. Shapiro, I.B. Khalfin. Physica C **219**, 5, 465 (1994).
- [17] Nan 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).