

УДК 537.312.62

©1993

ОБРАТИМЫЙ ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИТТРИЕВОЙ И ВИСМУТОВОЙ ВТСП КЕРАМИКАХ

Б.И.Смирнов, Т.С.Орлова, С.В.Криштопов

Исследовано влияние электрического поля напряженностью до 120 МВ/м в системе металлический электрод-диэлектрик-сверхпроводник на вольт-амперные характеристики ВТСП керамик $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_y$. Опыты проводились как ниже, так и выше критической температуры T_c . Установлено отсутствие эффекта поля при $T > T_c$ и его качественное подобие в различных керамиках при $T < T_c$. При отрицательном потенциале на электроде электрическое сопротивление образца с увеличением поля сначала возрастало, а затем уменьшалось по сравнению с исходным. В некоторых образцах электрическое поле может приводить к увеличению критического тока.

Первые исследования обратимого эффекта внешнего электрического поля на проводимость и критическую температуру T_c сверхпроводящих пленок индия и олова были проведены более 30 лет тому назад [1]. При этом оказалось, что на пленках толщиной $d \simeq 70 \text{ \AA}$ в полях $E \simeq 30 \text{ МВ/м}$ наблюдаются изменения проводимости и смещение T_c на $\Delta T_c \simeq 10^{-4} \text{ К}$, причем эффекты в индии и олове притивоположны по знаку. Позднее [2] влияние электрического поля на T_c было обнаружено и на монокристаллах твердых растворов $\text{Ba}(\text{PbBi})\text{O}_3$, O_3 , в которых максимальное значение ΔT_c достигало 0.6 К в поле $E = 1 \text{ МВ/м}$ при $d = 0.3\text{--}0.6 \text{ мм}$.

Интерес к «эффекту поля» значительно усилился после открытия высокотемпературных сверхпроводников, в которых из-за меньшей концентрации носителей следовало ожидать гораздо большего эффекта [3-9]. В результате было установлено, что в системе электрод-изолятор-сверхпроводящая пленка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 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 [5-7] он был существенным лишь при малых толщинах пленки. Так, в [7] эффект поля на проводимость выше T_c практически исчезал при изменении d от 1с до 8с, где с — постоянная решетки.

В то же время в целом ряде работ [2-4,8,9] было установлено, что в менее совершенных образцах эффект поля проявляется и при больших значениях d . Так, в [9] при нанесении ВТСП пленки на сегнетоэлектрическую подложку поле существенно влияло на T_c и для $d \simeq 1000 \text{ \AA}$. В [4] охлаждение ВТСП керамики в электрическом поле приводило к увеличе-

нию критического тока I_c . Нами же значительные обратимые изменения I_c и ВАХ при $T < T_c$ были обнаружены в толстых керамических образцах системы $YBaCuO$ [8].

Поскольку большинство авторов влияние поля на проводимость ВТСП материалов связывают с изменением концентрации (перераспределением) носителей (дырок), которое должно проявляться лишь в приповерхностном слое на расстояниях порядка проникновения поля d_E (а в ВТСП $d_E \approx 4.5 \text{ \AA}$ [7]), то проявление эффекта поля в толстых образцах представляется необычным. Можно полагать, что в этих объектах указанный эффект связан с наличием в них слабых связей на границах зерен (блоков) и изменением силы пиннинга при воздействии электрического поля, однако для понимания природы эффекта, конечно, необходимо проведение дальнейших экспериментов. В настоящей работе обратимый эффект поля исследовался на только в иттриевой, но и в висмутовой ВТСП керамике, причем опыты проводились при температурах не только ниже, но и выше T_c . В результате было установлено отсутствие эффекта при $T > T_c$ и его качественное подобие в различных керамиках при $T < T_c$.

1. Экспериментальная методика

Исследовались ВТСП керамики двух составов, а именно $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_y$. Технологии их приготовления описаны соответственно в [10,11]. Для измерения ВАХ использовались образцы с размерами примерно $1.5 \times 2 \times 3$ мкм, на боковую поверхность которых наносились четыре индиевых контакта. Экспериментально определялись температурные зависимости электрического сопротивления образцов в интервале 77–300 К, а также влияние электрического поля на ВАХ. Критическая температура T_c , определенная по температурной зависимости электросопротивления, у иттриевой керамики составляла около 91 К при переходной области $\Delta T \approx 2$ К, а у висмутовой — 95 К при $\Delta T \approx 25$ К.

Эксперимент по влиянию внешнего электрического поля на ВАХ образцов проводился в системе электрод–диэлектрик–сверхпроводник аналогично [8]. Высокое напряжение U прикладывалось к полевому электроду из латуни, который был изолирован от керамического образца фторопластовой пленкой толщиной $t = 50$ мкм. Через токовые контакты, один из которых был заземлен, пропускался постоянный ток $I > I_c$ и измерялось напряжение на потенциальных контактах V . Затем включалось электрическое поле и определялось изменение этого напряжения в зависимости от напряжения поля $E = U/t$ до значений $E \approx 120$ МВ/м. Зависимости $V(E)$ получались для разных исходных значений V_0 , т.е. для разных токов I_0 . Следует отметить, что ток утечки в системе электрод–диэлектрик–сверхпроводник при напряжениях $U \approx 6$ кВ не превышал 3 нА, в то время как транспортный ток мог достигать сотен миллиампер. Для проверки возможного влияния побочных факторов было проведено также сравнение ВАХ и эффекта электрического поля в условиях заземления токового или потенциального контактов и при изменении направления транспортного тока. Экспериментальные данные показали, что указанные изменения условий опыта не влияют на конечные результаты.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе прежде всего было проведено сопоставление данных по эффекту поля для иттриевой керамики при разных температурах, а именно выше (100 К) и ниже (77 К) критической температуры. ВАХ образцов при этих температурах представлены на рис. 1. Они являются типичными для сверхпроводящего и несверхпроводящего состояния керамики.

На рис. 2 показаны зависимости напряжений на потенциальных контактах от напряженности электрического поля для разных значений транспортного тока и соответственно равных V_0 . Видно, что при $T > T_c$ величина V не зависит от значения E , т.е. эффект поля в этом случае отсутствует. При $T < T_c$ характер влияния поля на V зависит от величины V_0 . При малых V_0 , т.е. при токах, лишь немного превышающих I_c , напряжение убывает по мере увеличения E и при $E \approx 120$ МВ/м становится равным нулю. Иначе говоря, величина критического тока образца в поле возрастает, и он вновь переходит в сверхпроводящее состояние. Для несколько больших значений V_0 эффект поля также наблюдается, однако его относительная величина меньше и напряжение в поле не достигает нулевых значений. И наконец, при $V_0 \approx 500$ мкВ эффект поля вообще пропадает. Таким образом, оказывается, что при отрицательном потенциале на электроде вольт-амперная кривая при малых V_0 и наличии достаточно большого поля E для данного образца лежит ниже аналогичной кривой при $E = 0$ и имеет большее значение критического тока (кривая 2' на рис. 1).

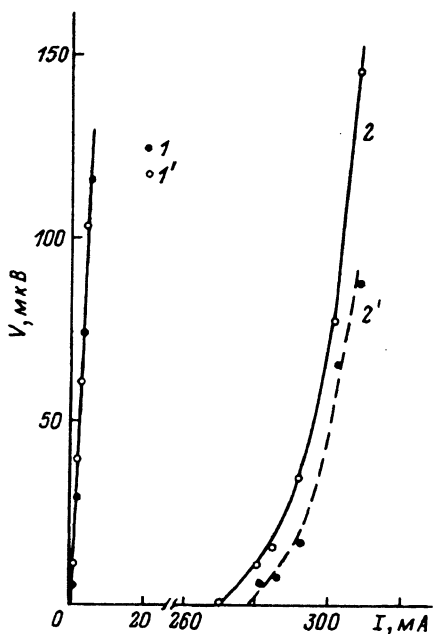


Рис. 1. ВАХ для иттриевой керамики при $E = 0$ (1, 2) и 80 МВ/м (1', 2') в случае $T = 100$ К $> T_c$ (1, 1') и $T = 77$ К $< T_c$ (2, 2').

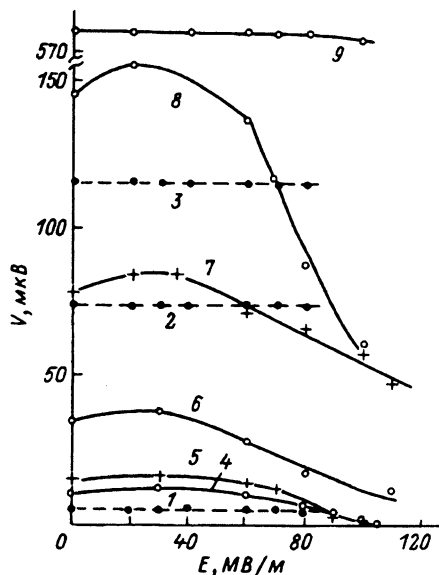


Рис. 2. Зависимости $V(E)$ при постоянном токе для иттриевой керамики в случае $T > T_c$ (1-3) и $T < T_c$ (4-9).

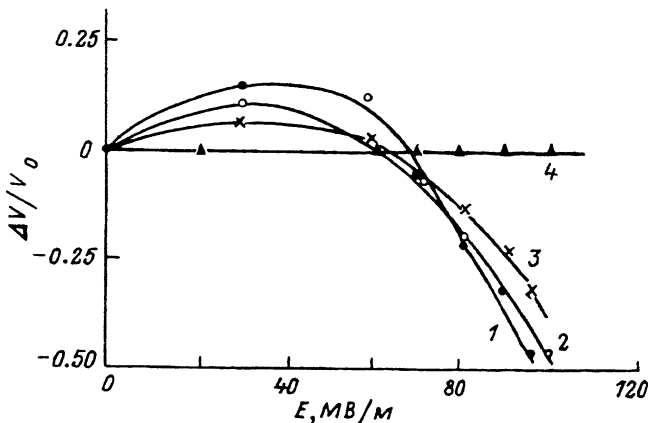


Рис. 3. Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для иттриевой керамики при $T = 77$ К и $V_0 = 7$ (1), 20 (2), 70 (3), 570 мкВ (4).

На рис. 3 представлены типичные зависимости относительного изменения напряжений $\Delta V/V_0$ от напряженности электрического поля для одного из иттриевых образцов. Видно, что, как и в [8], для небольших значений V_0 величина $\Delta V/V_0$ вначале с увеличением E возрастает, а затем, проходя через максимум, уменьшается и становится отрицательной. При больших $V \gtrsim 500$ мкВ эффект поля на ВАХ отсутствует. Максимальный эффект поля для исходных образцов и $E \approx 120$ МВ/м обычно составляет около 50%, но может быть увеличен за счет некоторой обработки образца, например путем выдержки в электрическом поле при 300 К с последующим охлаждением в поле [8].

Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для висмутовой керамики показаны на рис. 4. Видно, что они качественно и количественно подобны аналогичным зависимостям для иттриевой керамики.

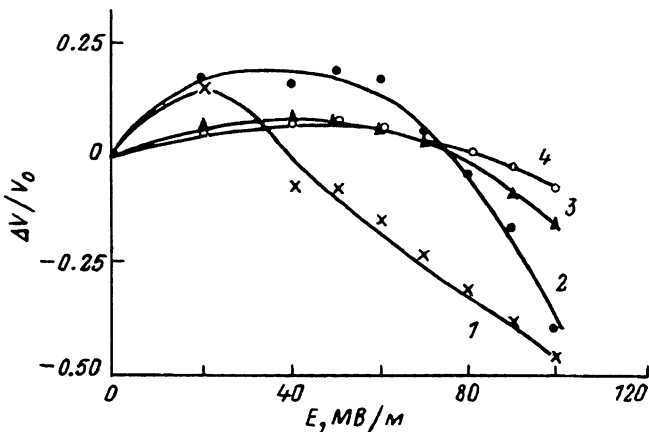


Рис. 4. Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для висмутовой керамики при $T = 77$ К и $V_0 = 15$ (1), 40 (2), 115 (3), 210 мкВ (4).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии внешнего электрического поля на ВАХ различных ВТСП керамик при $T < T_c$ и о его отсутствии в случае $T > T_c$. При этом положительный потенциал на полевом электроде приводит к понижению сопротивления образца, находящегося в резистивном смешанном состоянии при 77 К [8], в то время как при отрицательном потенциале сопротивление с увеличением поля сначала возрастает, а затем уменьшается. Существенно, что эффект поля наблюдается лишь при транспортных токах, не слишком превышающих критический. Что же касается влияния поля на критическую температуру, то, судя по данным [3], величина T_c и сопротивление образца в электрическом поле, прикладываемом при низких температурах, для керамики практически не изменяются.

Сопоставим теперь перечисленные выше результаты для керамики и данные для тонких ВТСП пленок, в которых эффект поля связывается с изменением концентрации носителей в приповерхностном слое, примыкающем к электроду [5-7]. Прежде всего бросается в глаза качественное отличие в воздействии электрического поля на ВАХ.

Так, при $T < T_c$ положительный потенциал на электроде приводит к понижению I_c и увеличению сопротивления пленок [6], тогда как у керамики, напротив, при этом критический ток возрастает и сопротивление понижается [8]. При отрицательном потенциале и больших напряженностях поля E эффекты в пленках и керамиках качественно совпадают — I_c возрастает и сопротивление падает. Однако в случае малых E в керамиках сопротивление при $I > I_c$ не уменьшается, а растет. Имеется качественная разница и при $T > T_c$. Так, в ВТСП пленках в электрическом поле наблюдалось изменение сопротивления на 15-25% [6,7], в то время как в керамиках обратный эффект поля отсутствует с точностью до 1-2% (рис. 1, 2).

Как уже отмечалось выше, наличие обратимого эффекта электрического поля в тонких пленках обычно связывают с изменением в них концентрации подвижных носителей и, как следствие, силы пиннинга [6]. Авторы [9] полагают, что и в относительно толстых пленках электрическое поле, изменяя силу пиннинга на поверхности пленки, оказывает влияние на решетку пронизывающих ее вихрей. В случае керамических образцов ситуация представляется еще более сложной, однако похоже, что и здесь наблюдаемый обратный эффект поля на ВАХ связан с изменением силы пиннинга на межзеренных границах, которые могут содержать не сверхпроводящие включения и диэлектрические прослойки. Об этом, в частности, свидетельствуют данные [8], демонстрирующие значительное уменьшение эффекта поля в керамике, лигированной серебром, которое может существенно влиять на структуру и проводимость указанных границ. К тому же, как нам кажется, есть основания полагать, что электрическое поле в керамике оказывает влияние на материал не только вблизи поверхности, непосредственно примыкающей к электроду.

Таким образом, в настоящей работе установлено качественное подобие эффекта электрического поля на ВАХ иттриевой и висмутовой ВТСП керамики и показано, что этот эффект имеет место лишь при $T < T_c$. Наблюдаемый эффект, скорее всего, связан с наличием в керамиках межзеренных границ.

Список литературы

- [1] Glover R.E., Sherril M.D. // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 5. N 6. P. 248-250.
- [2] Богатко В.В., Веневцев Ю.Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2872-2874.
- [3] Гоменюк Ю.В., Лозовский В.З., Лысенко В.С., Походня К.Н., Снитко О.В., Сытенко Т.Н., Тягульский И.П. // ДАН УССР. Сер. А. 1989. № 11. С. 49-51.
- [4] Гоменюк Ю.В., Ключий Н.И., Лозовский В.З., Лысенко В.С., Покофьев А.Ю., Романюк Б.Н., Сытенко Т.Н., Тягульский И.П. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 4. С. 762-764.
- [5] Mannhart J., Bednorz J.G., Müller K.A., Schlom D.G. // Z. Phys. B — Condensed Matter. 1991. V. 83. N 3. P. 307-311.
- [6] Mannhart J., Schlom D.G., Bednorz J.G., Müller K.A. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. N 15. P. 2099-2101.
- [7] Xi X.X., Doughty C., Walkenhorst A., Kwon C., Li Q., Venkatesan T. // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. N 8. P. 1240-1243.
- [8] Смирнов Б.И., Криштопов С.В., Орлова Т.С. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 8. С. 2482-2486.
- [9] Леманов В.В., Холкин А.Л., Шерман А.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56. № 11. С. 580-583.
- [10] Орлова Т.С., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П., Чернова С.П. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 4. С. 1031-1037.
- [11] Орлова Т.С., Марков Л.К., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Степанов Ю.П. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 12. С. 3595-3597.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
21 апреля 1993 г.