

УДК 537.312.62

© 1992

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДИМОСТЬ ВТСП КЕРАМИКИ СИСТЕМЫ $YBaCuO$

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

Изучалось влияние сильного постоянного электрического поля напряженностью до 140 МВ/м в системе электрод—диэлектрик—сверхпроводник на проводимость ВТСП керамики системы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при 77 К. Обнаружено обратимое изменение проводимости в электрическом поле при токах, несколько превышающих критический. При этом положительный потенциал на электроде всегда приводит к увеличению проводимости. При отрицательном потенциале проводимость с увеличением поля сначала уменьшается, а затем возрастает по сравнению с исходной. В некоторых условиях электрическое поле приводит также к увеличению критического тока. Наблюдаемые эффекты объясняются перераспределением носителей (дырок) в образце под действием поля.

Вопрос о возможном влиянии электрического поля на сверхпроводящие характеристики материалов рассматривался еще в 60-е годы [1, 2]. В настоящее время уже имеются экспериментальные работы, в которых установлено, что в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) под действием электростатического поля или после обработки электрическим полем может происходить изменение значений как критической температуры T_c [3-5], так и критического тока I_c [6]. При этом для наблюдения влияния электростатического поля на T_c и I_c поле определенной полярности прикладывалось при комнатной температуре и образец охлаждался в поле до $T < T_c$, в противном случае эффект поля отсутствовал [4].

В настоящей работе изучалось изменение проводимости ВТСП керамики непосредственно под влиянием электростатического поля разной полярности, которое прикладывалось к образцу при $T < T_c$.

1. Экспериментальная методика

В экспериментах использовались образцы исходной иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, а также керамики с добавкой Ag (8%) [7]. Влияние электрического поля исследовалось в системе металл—диэлектрик—сверхпроводник (рис. 1). Резистивные измерения проводились четырехзондовым методом в режиме постоянного тока. Для этого на одну из поверхностей образца, имевшего размер $1.5 \times 2 \times 3$ мм, наносились контакты из индия. Образец заземлялся через один из токовых контактов. Высокое напряжение U прикладывалось к полевому электроду из латуни. В качестве изолятора использовалась фторопластовая пленка толщиной $t = 50$ мкм, которая зажималась между керамикой и полевым электродом. Величина критического тока при $T = 77$ К ($T_c \approx 92$ К) составляла 0.195 А для $YBaCuO$ (плотность тока $j_c = 6.5$ А/см²) и 2.9 А ($j_c = 100$ А/см²) для $YBaCuO + Ag$ 8%.

Эксперимент по влиянию внешнего электрического поля на проводимость ВТСП керамики проводился по следующей схеме. Через токовые контакты образца, находящегося при 77 К, пропускался постоянный ток $I > I_c$ и измерялась

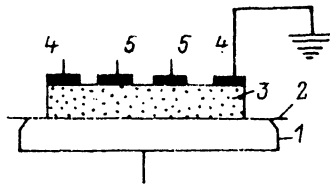


Рис. 1. Схема относительного расположения полевого электрода (1), диэлектрика (2) и образца (3) с токовыми (4) и потенциальными (5) контактами.

напряжение на потенциальных контактах V_0 . Затем включалось высокое электрическое поле того или иного знака и определялось изменение напряжения $\Delta V = V_c - V_0$, где V_c — напряжение на потенциальных контактах при приложении электрического поля напряженностью $E = U/t$. При этом напряженность электрического поля E изменялась от 0 до 140 МВ/м. Подобные измерения проводились при разных значениях V_0 , т. е. при разных токах I_0 .

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости $V(E)$ на исходном образце, отражающие общий характер зависимости эффекта изменения проводимости образца ВТСП керамики от величины напряженности электрического поля E . Основные особенности эффекта состоят в следующем. При приложении отрицательного потенциала к полевому электроду величина V_c (а значит, и электросопротивление образца) по мере увеличения E сначала возрастает, а затем снижается, имея максимум в области $E \approx 40$ МВ/м. При этом по достижении некоторой напряженности $E_c \approx 70$ МВ/м значение ΔV меняет знак. В случае подачи на полевой электрод положительного потенциала эффект с

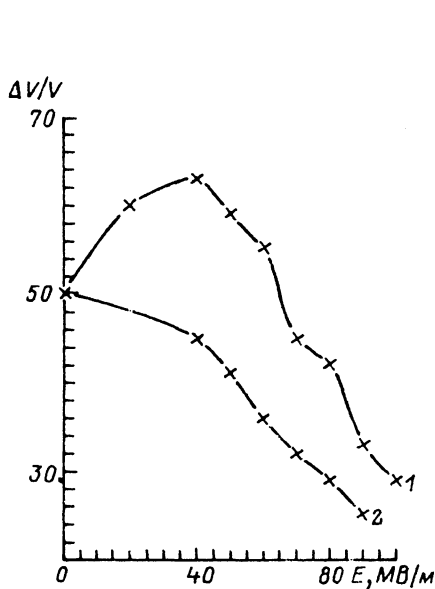


Рис. 2. Характерные зависимости $V(E)$ для исходной керамики при отрицательном (1) и положительном (2) потенциале на электроде.

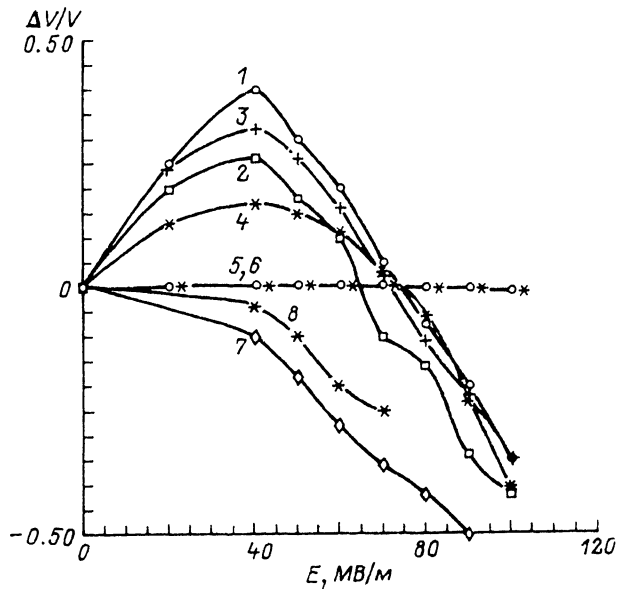


Рис. 3. Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для исходной керамики при $V_0 = 20$ (1), 50 (2, 7), 100 (3), 300 (4, 8), 600 (5), 1200 мкВ (6).

Потенциал на электроде отрицательный (1-6), положительный (7, 8). $T = 77$ К.

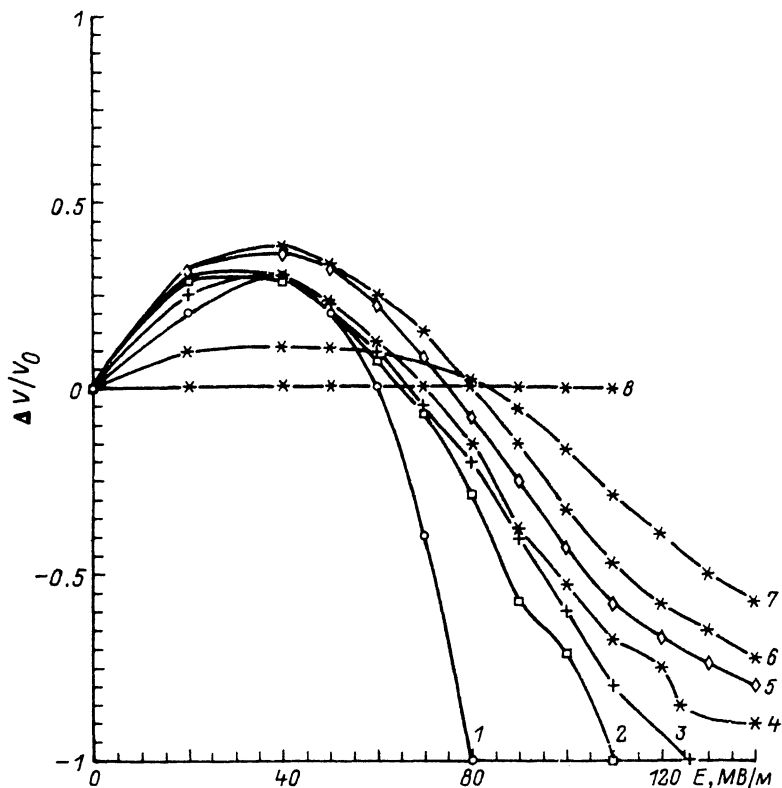


Рис. 4. Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для керамики, охлажденной в поле $E = 60$ МВ/м, при $V_0 = 5$ (1), 7 (2), 10 (3), 20 (4), 50 (5), 100 (6), 300 (7), 600 мкВ (8).

Потенциал на электроде отрицательный.

самого начала носит отрицательный характер, т. е. $V_e < V_0$ при всех E и величина V_e монотонно снижается с ростом E . И в том, и в другом случаях эффект имеет обратимый характер и значение V_0 восстанавливается после снятия поля.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости относительного изменения напряжений $\Delta V/V_0$ от величины поля E для исходной керамики, через которую пропусклся различный ток и соответственно менялось V_0 . Видно, что при подаче отрицательного потенциала на полевой электрод зависимости $\Delta V/V_0 = -f(E)$ до значений $V_0 \approx 300$ мкВ подобны кривой 1 на рис. 2, т. е. величина ΔV вначале с увеличением E возрастает, затем, проходя через максимум, уменьшается, а при $E \geq 70$ МВ/м становится отрицательной. При этом значение $\Delta V/V_0$ в максимуме, который всегда находится в области полей 40 МВ/м, с ростом V_0 снижается. Величина же E_c и значения $\Delta V/V_0$ при высоких полях $E \geq 100$ МВ/м для разных V_0 остаются примерно одинаковыми. При больших токах ($V_0 \geq 600$ мкВ) эффект влияния поля на проводимость керамики практически исчезает (V_e не зависит от E). Тенденция к относительному уменьшению эффекта при больших токах проявляется и при подаче на полевой электрод положительного потенциала (зависимости 7, 8 на рис. 3).

Обработка исходной керамики электрическим полем напряженностью 60 МВ/м в течение 2 ч при комнатной температуре и охлаждение образца до 77 К в поле привели к некоторым изменениям в зависимостях $\Delta V/V_0$ от E (рис. 4). Оказалось, что величина эффекта при малых напряженностях и его отсутствие

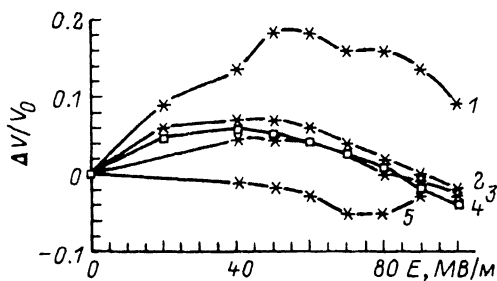


Рис. 5. Зависимости $\Delta V/V_0$ от E для легированной серебром (8%) керамики при $V_0 = 20$ (1), 50 (2), 90 (3, 5), 185 кВ (4).

Потенциал на электроде отрицательный (1—4), положительный (5).

для больших токов ($V_0 \geq 600$ кВ) соответствуют данным, полученным для исходной керамики (рис. 3). В то же время в области высоких полей $E \geq 60$ МВ/м и отрицательных значений ΔV величина эффекта изменяется. При этом для $V_0 < 50$ кВ эффект поля возрастает, а при $V_0 > 50$ кВ убывает. Более того, для $V_0 \leq 10$ кВ в электрическом поле удастся перевести образец в сверхпроводящее состояние (повысить величину I_c).

Экспериментальные результаты, полученные на керамике с добавкой 8% Ag, представлены на рис. 5. Видно, что легирование серебром приводит к снижению эффекта электростатического поля на проводимость керамики при $T < T_c$.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии внешнего электрического поля на проводимость ВТСП керамики при $T < T_c$.

Для обсуждения результатов представим их в несколько ином виде, а именно в виде вольт-амперных характеристик (ВАХ). Качественное изменение ВАХ в электростатическом поле схематически демонстрируется на рис. 6, где сплошные линии — зависимости $V-I$ без поля, штриховые линии — в поле. Видно, что при положительном потенциале на электроде (рис. 6, а) ВАХ для разных E всегда смещается вправо, т. е. в сторону больших токов. В случае же отрицательного потенциала эффект поля наблюдается только для нижней части ВАХ ($V_0 \leq 600$ кВ) и качественно зависит от его напряженности. При малых значениях $E < E_c$ нижняя часть ВАХ смещается влево (кривые 1 на рис. 6, б), а при $E > E_c$ — вправо (кривые 3). Для образца с довольно четким значением E_c эффект поля при $E = E_c$ отсутствует (кривая 2). Для образца, охлажденного в поле и не имеющего четкого значения E_c , в области $E_1^c < E < E_2^c$ эффект поля носит

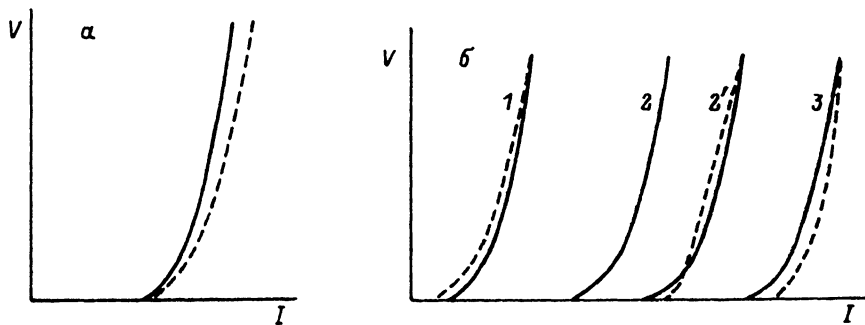


Рис. 6. Схематическое изображение изменений вольт-амперных кривых ВТСП керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при воздействии внешнего электрического поля (штриховые линии) при положительном (а) и отрицательном (б) потенциале на электроде.

$E < E_c$ (1), $E = E_c$ (2), $E_1^c < E < E_2^c$ (2'), $E > E_c$ (3).

сложный характер (вариант 2' на рис. 6, б), а именно по мере увеличения V_{AX} вначале смещается вправо от исходной кривой, а затем, пересекаясь с последней, уходит влево.

С чем же может быть связано описанное выше изменение V_{AX} во внешнем электрическом поле? Прежде всего под воздействием поля в образце должно происходить перераспределение носителей заряда, в данном случае — дырок. Тогда при положительном потенциале на электроде указанные дырки будут перемещаться в сторону поверхности с измерительными контактами, т. е. увеличивать концентрацию носителей в приповерхностном слое и тем самым улучшать его проводимость, что и наблюдается на опыте. При этом эффект поля, связанный с перераспределением носителей, должен быть обратимым, что также согласуется с экспериментом. В теоретической работе [8] показано, что внешнее поле может даже стимулировать поверхностную сверхпроводящую фазу с температурой перехода, большей объемного значения T_c .

При отрицательном потенциале носители, напротив, должны уходить к поверхности образца, примыкающей к электроду, ухудшая проводимость приконтактного поверхностного слоя. Именно этот эффект и наблюдается на опыте, однако он имеет место только до напряженностей $E \approx 40$ МВ/м. При больших же напряженностях эффект поля сначала начинает уменьшаться, а затем при $E \geq 70$ МВ/м меняет знак и проводимость в поле уже не падает, а возрастает, как это имеет место при положительном потенциале. Трудно указать однозначно причину такой смены знака эффекта, однако можно полагать, что он связан с тем обстоятельством, что при больших напряженностях, т. е. большой концентрации носителей в поверхностном слое у электрода, именно он начинает играть главную роль в проводимости всего образца, который может даже переходить в сверхпроводящее состояние. Указанный эффект более четко выражен в образце, выдержанном некоторое время в электрическом поле при 300 К и охлажденном в поле. Связано это, по-видимому, с тем, что в результате обработки полем сверхпроводящие свойства приконтактной области образца улучшаются за счет увеличения в ней содержания ионов кислорода, перераспределяющихся в электрическом поле. В образцах, легированных серебром, эффект поля выражен слабее, и это скорее всего обусловлено особенностью структуры слабых зернограничных прослоек $S-N-S$ типа в этих образцах.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что при температуре $T < T_c$ внешнее постоянное электростатическое поле оказывает влияние на проводимость ВТСП керамики при $I > I_c$ и может приводить как к уменьшению, так и к увеличению I_c . Наблюдаемые эффекты объясняются перераспределением носителей (дырок) в образце под действием поля.

Список литературы

- [1] Сандомирский В. Б. // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2. № 8. С. 396—398.
- [2] Meissner H. // Phys. Rev. 1967. V. 154. N 2. P. 422—424.
- [3] Богатко В. В., Веневцев Ю. Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2872—2874.
- [4] 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.
- [5] Парашук В. В. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 2. С. 36—39.
- [6] Гоменюк Ю. В., Ключ Н. И., Лозовский В. З., Лысенко В. С., Прокофьев А. Ю., Романюк Б. Н., Сытенко Т. Н., Тягульский И. П. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 4. С. 762—764.
- [7] Орлова Т. С., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В., Степанов Ю. П., Чернова С. П. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 4. С. 1031—1037.
- [8] Шапиро Б. Я. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. № 5. С. 1676—1685.