

## ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

А.И. Головашкин, Е.М. Голямина, А.Н. Лыков, В.Б. Мухачев

*Измерены плотность критического тока и вольтамперные характеристики высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при азотных температурах в слабых магнитных полях. Результаты объясняются на основе джозефсоновского взаимодействия между отдельными сверхпроводящими микрокристаллами.*

Открытие высокотемпературных сверхпроводящих соединений, в частности Y-Ba-Cu-O [1,2], дало мощный толчок развитию исследований по сверхпроводимости. В настоящее время ведутся активные поиски новых сверхпроводников с еще более высокой критической температурой и с более высокой критической плотностью тока  $J_c$ , так как достигнутое к настоящему времени в массивных сверхпроводниках значение  $J_c \sim 10^3$  А/см<sup>2</sup> при 77,6 К [2] существенно ограничивает возможности их использования. Упомянутые два критических параметра исследованы в данной работе в соединениях Y-Ba-Cu-O.

Образцы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , на которых проведены основные исследования, приготавливались по технологии, близкой к описанной в [2]. Смесь  $BaCO_3$ ,  $Y_2O_3$  и  $CuO$  отжигали в платиновом тигле на воздухе при температуре 900 °С в течение 10 – 12 часов. Измельченный в агатовой ступке порошок прессовали в таблетки, которые выдерживали 18 часов при температуре 950 °С с продувкой кислородом и с последующим охлаждением до 200 °С в течение 3 часов. Полученные сверхпроводящие образцы ( $T_c = 91 - 94$  К) имели плотность  $\rho = 5,0 - 5,95$  г/см<sup>3</sup>. Во всех образцах наблюдался ярко выраженный диамагнитный эффект. Для электрических измерений из таблеток вырезались прямоугольники сечением 1 × 1 мм и длиной 4,8 или 12 мм, определяемой диаметром таблеток.

Измерялись температурные зависимости сопротивления образцов  $R(T)$  и вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов в магнитном поле.

На рис. 1 приведена наиболее примечательная зависимость  $R(T)$ , полученная для образцов другого процентного состава. (Образцы  $Y_{1,8}Ba_{0,2}Cu_3O_x$  приготавливались двухчасовым отжигом при температуре 1100 °С на воздухе.) При температуре 200 К наблюдалось резкое уменьшение сопротивления, в то время как эффект Мейснера в области температур 77 – 200 К отсутствовал.

На рис. 2а показаны типичные ВАХ образца  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при температуре 77,6 К. Главными их особенностями являются малая величина плотности критического тока (на несколько порядков меньше плотности критического тока монокристаллического образца [3]) и сильная зависимость  $J_c$  от магнитного поля. На рис. 2б показана зависимость плотности критического тока от напряженности магнитного поля, которая при  $H > 10$  Э хорошо описывается законом  $J_c \propto H^{-1}$  (сплошная линия на рис. 2б).

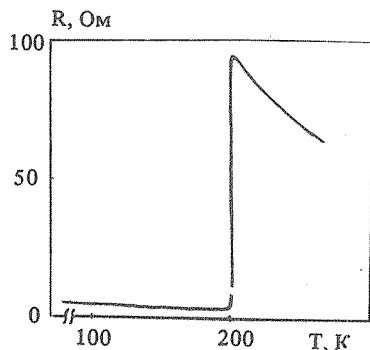


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления образца  $Y_{1,8}Ba_{0,2}Cu_3O_x$ .

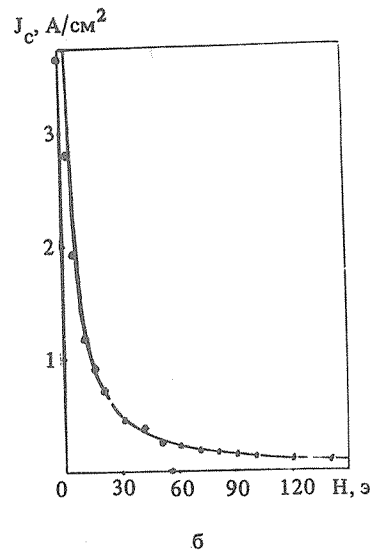
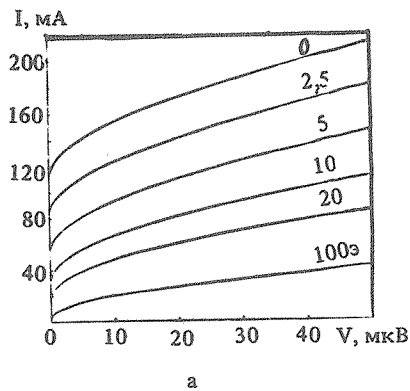


Рис. 2 а) ВАХ образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  при  $T = 77,6$  К в магнитных полях от 0 до 100 Э. б) Зависимость плотности критического тока от магнитного поля. Сплошная линия соответствует зависимости  $J_c \propto H^{-1}$ .

Малая величина плотности критического тока и характер ее зависимости от магнитного поля могут быть объяснены джозефсоновским взаимодействием между отдельными гранулами, из которых состоит образец.

Электронно-микроскопическое исследование образцов обнаруживает их неоднородность и гранулированную структуру. Критический ток после нескольких термоциклирований уменьшается и с течением времени обращается в нуль, в то время как диамагнетизм в них продолжает наблюдаться. По-видимому, в гранулированных образцах воздействие внешней среды меняет свойства поверхностных слоев гранул, приводя к подавлению джозефсоновского взаимодействия между ними.

Чтобы объяснить с этой точки зрения наблюдаемый характер зависимости критического тока образцов от магнитного поля, нужно учесть как зависит от магнитного поля критический ток одного джозефсоновского элемента /4/:

$$I_c = I_{c0} \left| \frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{\pi\Phi/\Phi_0} \right|, \quad (1)$$

где  $I_{c0}$  — максимальная величина критического тока в отсутствие магнитного поля;  $\Phi_0$  — квант магнитного потока;  $\Phi$  — магнитный поток, заключенный в переходе. Поскольку в данном случае имеется не один, а множество переходов с несколько различающимися площадями, спадание критического тока до нуля при  $\Phi = n\Phi_0$ , где  $n$  — целое число, не наблюдается. Как видно из формулы (1), при усреднении большого числа переходов с увеличением магнитного поля критический ток должен уменьшаться по закону  $I_c \propto H^{-1}$ . В малых полях при  $H \rightarrow 0$  зависимость  $I_c (H^{-1})$  отклоняется от линейной и значение тока  $J_c$  должно стремиться к конечной величине  $I_{c0}$ , что и наблюдается в эксперименте (рис. 2б).

Таким образом, полученные результаты хорошо объясняются на основе джозефсоновского взаимодействия между отдельными сверхпроводящими микрокристаллами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wu M. K. et al. Phys. Rev. Lett., 58, № 9, 908, 1987.
2. Cava R. J. et al. Bulk superconductivity at 91K in single phase oxygen-deficient perovskite  $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{9-\delta}$ . Preprint, Bell Lab., 1987.
3. Dinger T. R. et al. Direct observation of electronic anisotropy in single-crystal  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Preprint, IBM, 1987.
4. С о л и м а р Л. Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение. М., Мир., 1974, гл. 10.

Поступила в редакцию 20 августа 1987 г.