

## ОБ АНИЗОТРОПИИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

*Л.И.Буравов*<sup>1)</sup>, *Л.Я.Винников, Г.А.Емельченко, П.А.Кононович,*  
*В.Н.Лаухин*<sup>1)</sup>, *Ю.А.Осипьян, И.Ф.Щеголев*

Проведены измерения удельного сопротивления нескольких кристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в плоскости  $ab$  и в направлении оси  $c$ . Большая величина анизотропии и малая величина поперечного критического тока указывают, скорее всего, на значительную неоднородность кристаллов в направлении оси  $c$ , приводящую к образованию множественных джозефсоновских переходов.

Прогресс в изучении природы высокотемпературного сверхпроводящего состояния сложных оксидов меди<sup>1,2</sup> невозможен без детального исследования монокристаллических образцов. Между тем, ввиду трудности получения монокристаллов этих соединений к настоящему времени имеется лишь ограниченное число работ, посвященных их изучению, и многие вопросы еще ждут своего выяснения. В настоящем письме мы сообщаем об измерениях температурной зависимости удельных сопротивлений  $\rho_{||}$  и  $\rho_{\perp}$  монокристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , соответственно, в плоскости  $ab$  и вдоль оси  $c$ , а также об измерении критического тока  $I_{\perp}$  вдоль оси  $c$ .

Монокристаллы были выращены из раствора в расплаве методом, описанным в<sup>3</sup>. Измерение  $\rho_{||}(T)$  и  $\rho_{\perp}(T)$  проводилось на постоянном токе методом Монтгомери<sup>4</sup> с модификациями, описанными в<sup>5</sup>. Модификации заключались в использовании неточечных контактов и учете конечного расстояния между контактами и краями кристалла. Использовались платиновые контакты  $\varnothing$  10 мкм, подклеиваемые графитовой пастой, с типичными сопротивлениями  $\sim 10^2$  Ом.

Зависимости  $\rho_{||}(T)$  четырех монокристаллов приведены на рис. 1, на вставке к которому показан способ размещения контактов<sup>2</sup>). Обращает на себя внимание заметный разброс свойств кристаллов. При переходе от кристалла № 1 к кристаллу № 4  $\rho_{||}(293)$  уменьшается от 520 до 260 мкОм·см, а  $T_c$  растет от 80 до 92 К. При этом отношение  $\rho_{||}(293)/\rho_{||}(95)$  увеличивается от 2,6 до 4,3. Заметим, что у кристалла № 4 зависимость  $\rho_{||}(T)$  линейна в интервале от 300 до 120 К. В менее совершенных кристаллах 1–3 отклонения от линейности при понижении температуры начинаются раньше.

Зависимости  $\rho_{\perp}(T)$  для тех же кристаллов показаны на рис. 2 (для кристаллов №№ 2 и 3 величины  $\rho_{\perp}$  практически одинаковы). При величине измерительного тока 0,5 мА сверхпроводящий переход, регистрируемый по  $\rho_{\perp}(T)$  слегка сдвинут в сторону более низких температур по сравнению с переходом, регистрируемым по  $\rho_{||}(T)$ . Вычисление  $\rho_{\perp}$  в той области температур, где продольное сопротивление уже отсутствует и формулы Монтгомери не применимы, проводилось в предположении, что  $\rho_{\perp}$  пропорционально напряжению  $V_{12}$  (при токе через контакты 34), поскольку пары контактов 13 и 24 (см. рис. 1) расположены в этом случае на эквипотенциальных плоскостях. Заметим, что  $\rho_{\perp}$  кристалла № 4 падает при охлаждении от 293 до 170 К.

Отношение  $\rho_{\perp}/\rho_{||}$  при 293 К меняется от 120 для кристалла № 1 до 48 для кристалла № 4. При понижении температуры  $\rho_{\perp}$  растет, а  $\rho_{||}$  падает, и при 95 К величина  $\rho_{\perp}/\rho_{||}$  достигает значений 600–700 для кристаллов 1–3 и равно 230 для кристалла № 4. Даже последняя величина почти на порядок превышает значение  $\sim 25$ , которое можно ожидать из соотношения  $\rho_{\perp}/\rho_{||} \approx (H_{c2||}/H_{c2\perp})^2$ , используя величины  $H_{c2}$ , измеренные в<sup>6</sup>.

<sup>1)</sup> Отделение института химической физики АН СССР.

<sup>2)</sup> В методе Монтгомери удельные сопротивления  $\rho_{||}$  и  $\rho_{\perp}$  вычисляются, исходя из геометрических размеров кристалла, по напряжениям  $V_{\perp}$  и  $V_{||}$  на контактах 12 и 13, возникающим при пропускании тока, соответственно, через контакты 34 и 24.

Скорее всего, причиной такого расхождения является неоднородность имевшихся в нашем распоряжении кристаллов в направлении оси  $c$  и, как следствие — несобственный характер возрастания  $\rho_{\perp}$  при понижении температуры. Однако тщательное исследование локальной кристаллической структуры образцов на сканирующем электронном микроскопе по картинкам каналирования электронов не выявило наличия в них каких-либо диэлектрических прослоек с размерами  $\geq 2-3$  мкм. Ориентация разных участков кристаллов, как в торцевых плоскостях  $ac$  и  $bc$ , так и в плоскости  $ab$ , также, как и параметры кристаллической решетки с точностью измерений остаются неизменными.

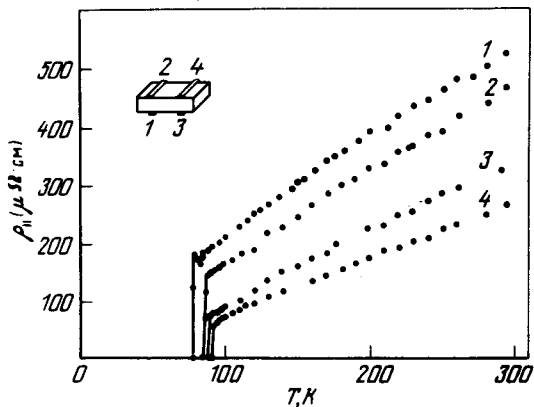


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления в плоскости  $ab$  четырех монокристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . На вставке показан способ размещения контактов.

Было выяснено, что понижение температуры перехода, регистрируемого по исчезновению  $\rho_{\perp}$ , связано с конечной величиной измерительного тока. Если при 80 К увеличивать ток  $I_{\perp}$  через контакты 34, напряжение на контактах 12 появляется в кристалле № 2 начиная с  $I_{\perp} \approx 1$  мА, а в кристалле № 4 — с  $I_{\perp} \approx 2$  мА. При этих (и гораздо больших) токах в продольном направлении кристаллы остаются еще сверхпроводящими. Для кристалла № 1 температурная зависимость поперечного критического тока представлена на рис. 3. Из него видно, что при  $I_{\perp} \rightarrow 0$  температура перехода стремится к той же величине 80 К, которая получается при измерении  $\rho_{||}$ .

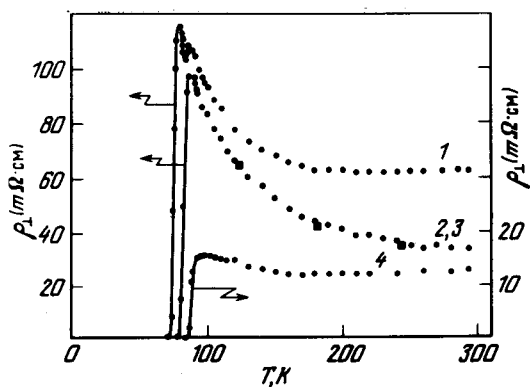


Рис. 2

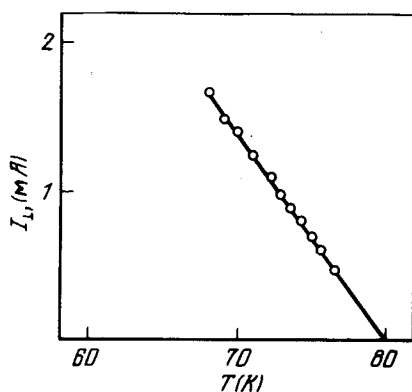


Рис. 3

Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления в направлении оси  $c$ . Черными квадратиками показано несколько точек, относящихся к кристаллу № 3

Рис. 3. Температурная зависимость критического тока в направлении оси  $c$  для кристалла № 1

Величина критической плотности тока в направлении оси  $c$ , соответствующая этим результатам, оказывается  $\leq 1$  А/см<sup>2</sup>, что снова много меньше тех значений, которые были получены в <sup>7</sup> по измеренным величинам максимального диамагнитного момента. По нашему мнению, это расхождение опять указывает на значительную неоднородность кристаллов в направлении оси  $c$ , приводящую к образованию множественных джозефсоновских переходов.

Выяснение природы этой неоднородности требует дальнейших исследований. Фактором, способствующим ее возникновению, может являться большая анизотропия скорости роста кристалла в различных кристаллографических направлениях. Это может приводить, например, к чередованию слоев с различным локальным содержанием кислорода.

Во время подготовки настоящей статьи к печати появилась работа <sup>8</sup>, в которой анизотропия удельного сопротивления была измерена на монокристалле  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  с  $\rho_{\parallel}(293) = 460$  мкОм · см. Величина  $\rho_{\perp}$  этого кристалла при 293 К близка к значению  $\rho_{\perp}$  нашего кристалла № 4 и возрастает к точке перехода ~на 35%. Авторы <sup>8</sup> полагают, что этот рост является собственным и считают, что отношение  $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$  при температурах вблизи  $T_c$ , равное 90, неплохо согласуется с оценкой этой величины по анизотропии  $H_{c2}$ , измеренной в <sup>6</sup>. Наши данные о малой величине критического тока в поперечном направлении делают этот вывод сомнительным.

#### Литература

1. Bednorz J.G., Müller K.A. Z. Phys. B. 1980, 64, 189.
2. Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.T. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 908.
3. Емельченко Г.А., Карцовник М.В., Кононович П.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 162.
4. Montgomery H.C. J. Appl. Phys., 1971, 42, 2971.
5. Бурагов Л.И. ЖТФ, 1987, в печати.
6. Worthington T.K., Gallagher W.J., Dinger T.R. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 1160.
7. Dinger T.R., Worthington T.K., Gallagher W.J., Sandstrom R.L. Phys. Rev. Lett, 1987, 58, 2687.
8. Tozer S.W., Kleinsasser A.W., Penney T. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 1768.