

**АНИЗОТРОПИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$**

*И.Н. Макаренко, Д.В. Никифоров, А.Б. Быков,
О.К. Мельников, С.М. Стишов*

Проведены измерения удельного электрического сопротивления ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ в направлениях \parallel и \perp базисной плоскости элементарной ячейки. Исследованы образцы двух серий кристаллов, имеющих орторомбическую ($T_k \sim 93$ К) и тетрагональную ($T_k \sim 80$ К) структуры. Показано, что поперечное сопротивление ρ_{\perp} и анизотропия $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ возрастают с приближением температуры к T_k .

В настоящей статье сообщается об исследовании анизотропии электропроводности монокристаллов номинального состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Исследовались две серии образцов (А и В),

выращенных в платиновых тиглях из нестехиометрического расплава при температуре $900 \div 1000^\circ\text{C}$ и отожженных в потоке кислорода при температуре 700°C . Исходные кристаллы представляли собой квадратные пластинки со средними размерами $5 \times 5 \times 0,03 \text{ мм}^3$. Некоторые характеристики кристаллов этих серий приведены в табл. 1.

Подчеркнем, что в отличие от кристаллов серии *A* кристаллы серии *B* после отжига в кислороде сохраняли тетрагональную структуру. Возможно, что это связано с дефицитом меди в их составе (см. табл. 1).

В качестве образцов для измерения электрического сопротивления отбирались фрагменты кристаллов правильной формы с зеркально гладкой поверхностью. Низкоомные электрические контакты ($R < 1 \text{ Ом}$) готовились вжиганием серебряной пасты в атмосфере кислорода. Измерения проводились четырехзондовым методом на постоянном токе с использованием цифрового вольтметра, обеспечивавшего надежное измерение сигналов на уровне $0,2 \text{ мкВ}$. Ток, пропускаемый через образец, имел величину $0,5\text{--}1 \text{ мА}$. Температура определялась с помощью медь-константановой термопары с точностью $\sim 0,01 \text{ К}$.

Таблица 1

Серия	Химический состав ¹⁾	Симметрия и параметры ²⁾ элементарной ячейки, <i>A</i>		T_k ⁴⁾	
		до отжига	после отжига	до отжига	после отжига
<i>A</i>	$\text{Y}_{0,92}(\text{TR})_{0,03}\text{Ba}_2\text{Cu}_2,95\text{O}_x$	тетраг. $a = 3,857$ $c = 11,828$	ромбич. ³⁾ $a = 3,823$ $b = 3,879$ $c = 11,735$	~ 60	~ 93
<i>B</i>	$\text{Y}_{0,94}(\text{TR})_{0,02}\text{Ba}_2\text{Cu}_2,98\text{O}_x$	тетраг. $a = 3,865$ $c = 11,704$	тетраг. $a = 3,868$ $c = 11,604$	—	60–80

На рис. 1 представлены результаты измерений электрического сопротивления двух образцов серии *A* при температурах, близких к сверхпроводящему переходу. Кривые *I* и *II* получены на одном и том же образце размером $515 \times 210 \times 18 \text{ мкм}^3$ с использованием конфигурации электродов, представленной на рис. 1а. Зависимость *I* характеризует поведение поперечного (в направлении оси *c* кристалла) электрического сопротивления R_{\perp} (1, 2 – токовые зонды, 3, 4 – потенциальные). Кривая *II* качественно отображает температурную зависимость продольного ($\parallel ab$) электросопротивления R_{\parallel} (1, 4 – токовые зонды, 2, 3 – потенциальные). Кривая *III* представляет корректную зависимость $R_{\parallel}(T)$ для образца размером $900 \times 130 \times 15 \text{ мкм}^3$, измеренную по схеме рис. 1б и приведенную к кривой *II* при $T \gtrsim 200 \text{ К}$. Как видно из рис. 1, участки резкого изменения электрического сопротивления на кривых *II* и *III* совпадают по температуре, что позволяет использовать для определения анизотропии электрических свойств кристалла кривые *I* и *III*.

Обращаясь к кривой *I*, отметим, что резкому падению сопротивления R_{\perp} предшествует острый пик, расположенный при температуре, соответствующей практически полному исчезновению сопротивления R_{\parallel} . Объяснение подобного поведения сопротивления R_{\perp} заключается, по-видимому, в резком увеличении анизотропии проводимости в области

1) Точность определения состава $\sim 1\%$; TR – La, Yb, Nd.

2) Точность определения параметров кристаллической решетки $0,001 \text{ \AA}$.

3) В кристаллах серии *A* наблюдается ярко выраженная двойниковая структура.

4) T_k – температура перехода в сверхпроводящее состояние.

сверхпроводящего перехода. Такое поведение анизотропии проводимости могло бы означать, что возникновение сверхпроводящего или частично сверхпроводящего состояния происходит в первую очередь в параллельном направлении. Из рис. 1 следует, что нечто подобное действительно происходит. Значения температуры, соответствующие наиболее быстрому изменению сопротивлений R_{\perp} и R_{\parallel} разделены между собой интервалом $\sim 0,5$ К. Этот интервал близок к сумме значений ΔT , характеризующих ширину сверхпроводящего перехода, найденного формальным образом по R_{\parallel} и R_{\perp} (0,1 и 0,4 К, соответственно) на уровне $(0,1 \div 0,9) R_N$, где R_N – сопротивление в нормальной фазе.

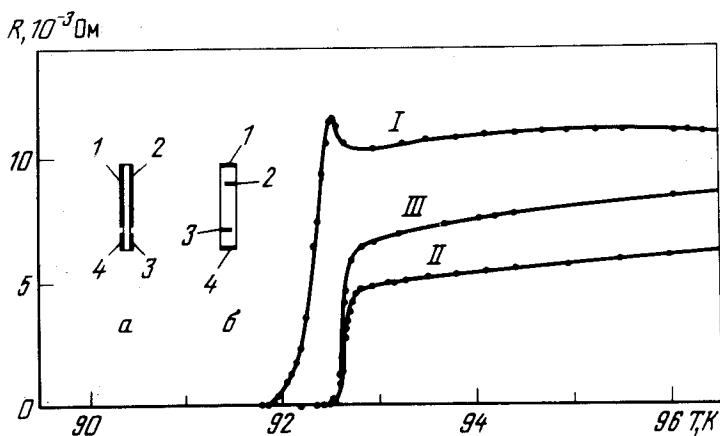


Рис. 1. Изменение электрического сопротивления монокристаллов серии А в окрестности сверхпроводящего перехода: а – схема расположения электродов для измерения сопротивления R_{\perp} (ось с кристалла находится в плоскости рисунка); б – то же для измерения R_{\parallel} в направлении $\parallel ab$; I и II – результаты измерения R_{\perp} и R_{\parallel} на одном и том же образце по схеме а; III – зависимость $R_{\parallel}(T)$ для другого образца, измеренная по схеме б и приведенная к кривой II при $T \gtrsim 200$ К

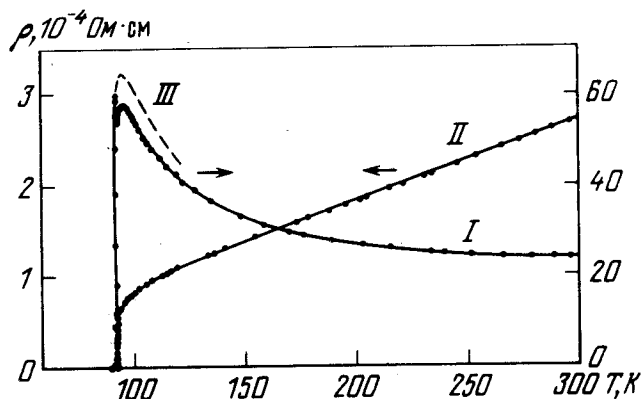


Рис. 2. Удельное сопротивление монокристаллов серии А: I – $\perp ab$; II – $\parallel ab$; III – зависимость $\rho_{\perp}(T)$ с поправкой на неидеальные условия измерений

На рис. 2 результаты измерений электрического сопротивления образцов серии А представлены в единицах удельного сопротивления (см. также табл. 2). Погрешность значений ρ_{\parallel} и ρ_{\perp} , связанная с ошибкой определения геометрического фактора образцов, составляет соответственно ± 18 и $\pm 12\%$.

Обратим внимание на недавно опубликованную работу¹, в которой проведены аналогичные измерения. Несмотря на заметные отличия в технике эксперимента и качестве исследованных монокристаллов, анизотропия электрического сопротивления, измеренная в этой работе при $T \sim T_k$, оказалась очень близка к значению, полученному нами для образцов серии А. Подчеркнем, что зависимость $\rho_{\parallel}(T)$ для образца серии А в пределах точности измерений совпадает с независимо полученными данными².

Серия	$T = T_k$			$T = 295 \text{ K}$			
	ρ_{\perp}	ρ_{\parallel}	$\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$	ρ_{\perp}	ρ_{\parallel}	$\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$	$\partial \rho_{\parallel}/\partial T$
A	$5,99 \cdot 10^3$	54	111	$2,45 \cdot 10^3$	268	9,14	0,909
B	$1,01 \cdot 10^5$	150	673	$1,63 \cdot 10^4$	698	23,4	1,293

На рис. 3 приведены результаты определения ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} монокристаллов серии B. Измерения проводились на образцах размером $360 \times 300 \times 45$ (ρ_{\perp}) и $780 \times 280 \times 39$ мкм³ (ρ_{\parallel}). Соответствующие погрешности значений ρ составляют ± 17 и $\pm 24\%$. Представленные данные показывают (см. рис. 3 и табл. 1, 2), что по своему качеству кристаллы серии B существенно уступают образцам предыдущей серии. Об этом свидетельствует также большая ширина ΔT резистивных переходов как в продольном (0,9 K), так и в поперечном (7,4 K) направлениях. Отметим, что на образцах серии B упомянутые выше особенности поведения ρ_{\perp} вблизи T_k не наблюдались. По всей видимости, это является следствием их чрезвычайно высокой анизотропии (см. табл. 2).

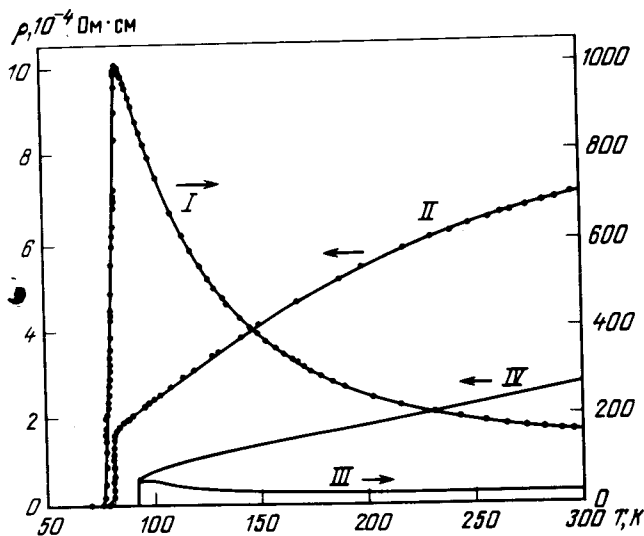


Рис. 3. Удельное электрическое сопротивление монокристаллов серии B: I — $\perp ab$; II — $\parallel ab$; III, IV — то же, что и на рис. 2

Из сравнения данных, полученных на монокристаллах A и B (см. рис. 1 и 2, а также табл. 2), можно заключить, что анизотропия электрического сопротивления $\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$ и ее температурная зависимость, по-видимому, существенным образом связана с совершенством образцов. Не исключено, что в случае идеального кристалла анизотропия будет иметь несколько иной характер.

В заключение отметим, что обнаруженная зависимость температуры (см. рис. 1) резистивного перехода от направления⁶⁾, пока не может быть объяснена тривиальным образом. Возможно, что объяснение этому факту может быть дано в терминах сверхпроводящих флуктуаций. Однако в этом случае необходимо допустить, что наблюдаемый резистивный переход в соединениях типа $YBa_2Cu_3O_x$ является всего лишь флуктуационным предвестником полного исчезновения электрического сопротивления.

⁵⁾ ρ — мкОм · см; $\partial \rho / \partial T$ — мкОм · см/град.

⁶⁾ Естественно, что это не означает соответствующего различия в температурах полного обращения сопротивления в нуль. Ограниченная точность измерений не позволяет убедиться в этом непосредственно.

Характер температурной зависимости магнитного момента и специфическое влияние магнитного поля на резистивный переход в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ², хотя и благоприятствует этой точке зрения, но не исключает эффектов, связанных с неоднородностью образцов.

Авторы выражают глубокую благодарность И.В. Александрову за определение параметров элементарной ячейки и Г.И. Шманенковой, выполнившей анализы химического состава исследованных образцов.

Литература

1. *Tozer S.W., Kleinsasser A.W. et al. Phys. Rev. Lett., 1987. 59, 1768.*
2. *Авдеев Л.З., Быков А.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 196.*

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
25 ноября 1987 г.