

## ИЗМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

*Е.А.Алексеева, И.В.Берман, Н.Б.Брандт, А.А.Жуков,  
И.Л.Ромашкина, В.И.Сидоров*

У монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  в области давлений до 160 кбар обнаружено нелинейное обратимое уменьшение критической температуры  $T_c$  при сжатии, коррелирующее с изменением характера температурных зависимостей электросопротивления в области температур  $T_c < T < 300$  К.

У образцов системы Bi-Sr-Ca-Cu-O с критической температурой  $T_c$  перехода в сверхпроводящее (СП) состояние  $\sim 80-90$  К в области гидростатических давлений  $T_c$  при сжатии увеличивается. Для монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  с  $T_c \sim 80$  К величина барической производной составляет  $dT_c/dP = 0,2$  К/кбар до давлений  $15^1$  и  $20^2$  кбар соответственно. Для поликристаллических образцов величины  $dT_c/dP$  могут принимать меньшие значения до  $dT_c/dP = 0,11$  К/кбар  $^3$ .

Однако, в области квазигидростатических давлений у поликристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  наблюдалось понижение  $T_c$  с барической производной  $dT_c/dP = -0,15$  К/кбар  $^4$ . При этом переход в СП состояние регистрировался при охлаждении на фоне полупроводникового роста электросопротивления  $R(T)$ , и при  $P \sim 80$  кбар становился неразличим на этом фоне. Наличие полупроводникового фона на кривых  $R(T)$  может заметно повлиять на точность полученных результатов. Так, в  $^5$  при исследовании многофазных керамических образцов Bi-Sr-Ca-Cu-O с  $T_c(P=0) \sim 80$  К получено, что величина  $T_c$  слабо растет при давлениях до 120 кбар, а доля СП фазы уменьшается.

Аналогичные результаты по "исчезновению" сверхпроводимости были получены рядом авторов  $^6, ^7$  для системы La-Sr-Cu-O и связывались со структурным превращением под действием давления. Однако по данным рентгеновских исследований до 500 кбар никаких структурных превращений у  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  не обнаружено  $^8$ . Можно было предположить, что исчезновение сверхпроводимости у Bi-Sr-Ca-Cu-O связано либо с нарушениями структуры, вызванными сдвиговыми деформациями под действием негидростатических давлений, либо с влиянием контактных явлений.

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости  $R$  от  $T$  у монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  в интервале (1,5–300) К при давлениях до 160 кбар. Давление создавалось методом наковален Бриджмена. Для создания низкоомных контактов в токе кислорода при специально подобранном температурно-временном режиме в образец размерами  $300 \times 30 \times 30 \text{ мкм}^3$  вжигался тонкий слой серебряной пасты. К полученным контактным областям площадью не более  $30 \times 30 \text{ мкм}^2$  прижимались мягкие платиновые полоски. Величина контактного электросопротивления не превышала 0,1 Ом.  $R$  регистрировалось квазичетырехконтактным методом при измерительном токе  $\leq 100 \text{ мкА}$ .

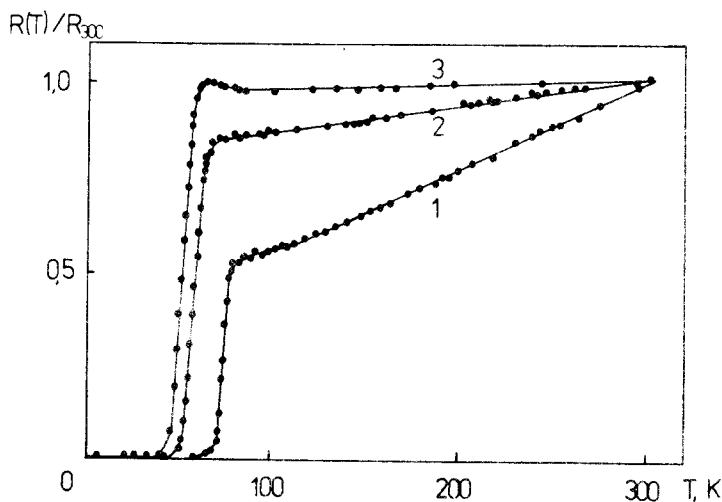


Рис. 1. Температурные зависимости нормированного электросопротивления  $R(T)/R_{300}$  образца  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  при различных давлениях  $P$ : 1 – 66; 2 – 143; 3 – 158 кбар соответственно

Электросопротивление при комнатной температуре  $R_{300}$  под действием давления увеличивается в несколько раз, проходит через максимум в области давлений  $\sim 30$  кбар, затем уменьшается примерно до первоначального значения и при давлениях выше 50 кбар меняется незначительно. Значение удельного электросопротивления при  $P > 50$  кбар составляет  $\rho \sim 5\text{--}10 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ .

При переходе в СП состояние  $R$  резко уменьшается практически до нуля, а при  $T > T_c$  имеет место металлическое поведение электросопротивления (рис. 1). По мере роста давления величина изменения электросопротивления при охлаждении от 300 К до  $T_c$  уменьшается, и при  $P > 150$  кбар СП переходу предшествует небольшое возрастание  $R(T)$ . Такое изменение характера зависимостей  $R(T)$  при сжатии и снятии давления происходит полностью обратимо.

В отличие от опубликованных ранее работ <sup>4, 5</sup>, в которых  $T_c$  исследовались при  $P > 20$  кбар, в настоящей работе регистрируются практически завершённые СП переходы во всей области давлений до 160 кбар (рис. 2). Ширина СП перехода  $\Delta T$  обратимо увеличивается от 6 К при  $P \sim 50$  кбар до 12 К при  $P \sim 160$  кбар. Способ определения  $T_c$  по началу, середине и концу СП перехода ( $T_{co}$ ,  $T_{cm}$  и  $T_{ce}$  соответственно) иллюстрируется стрелками на рис. 2.

Зависимость  $T_c$  от  $P$  представлена на рис. 3. Различными символами обозначены данные для  $T_{cm}$  у разных образцов, верхние и нижние концы вертикальных отрезков соответствуют  $T_{co}$  и  $T_{ce}$ . Как видно из рис. 3, характер кривых  $T_c(P)$  зависит от значения  $T_c$  при  $P = 0$ , причем для всех исследованных образцов зависимости  $T_c$  от  $P$  не являются линейными. Для образцов с более высокими значениями  $T_c$  в начальной области давлений зависимость  $T_c$  от  $P$ , по-видимому, имеет максимум, расположенный примерно в той же области давлений, что и

максимум на зависимости  $R_{300}$  от  $P$ . У образцов с более низкими значениями  $T_c$  максимум сменяется плато, а нелинейный характер зависимости  $T_c$  от  $P$  становится более выраженным, особенно в области высоких давлений. Значение  $dT_c/dP \sim -0,15$  К/кбар при  $P \sim 80$  кбар совпадает с полученным в <sup>4</sup>. Следует отметить, что полученные зависимости являются полностью обратимыми (сплошными кружками на рис. 3 обозначены данные при увеличении давления, полыми — при уменьшении), так что увеличение скорости уменьшения  $T_c$  при росте давления не может быть связано с деструкцией образца. Отмеченная выше связь  $T_c$  при  $P=0$  с изменением характера зависимостей  $T_c$  от  $P$  качественно согласуется с данными, полученными в <sup>9</sup> для области давлений (30–60) кбар.

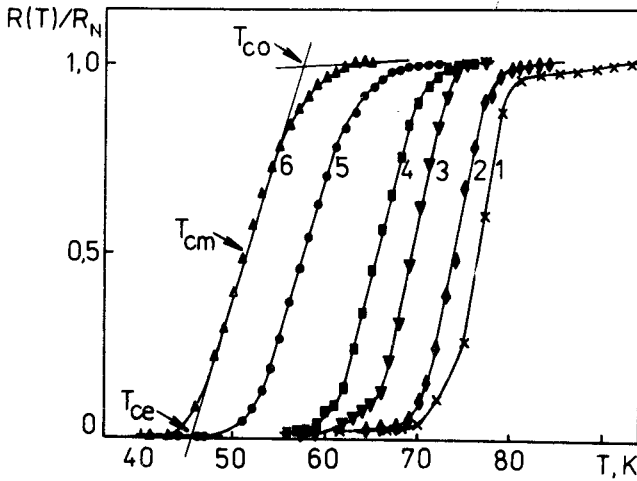


Рис. 2. Кривые СП переходов образца  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ , нормированные на сопротивление в нормальном состоянии  $R_N$  и снятые при различных давлениях  $P$ : 1 – 52; 2 – 66; 3 – 91; 4 – 115; 5 – 143; 6 – 158 кбар соответственно

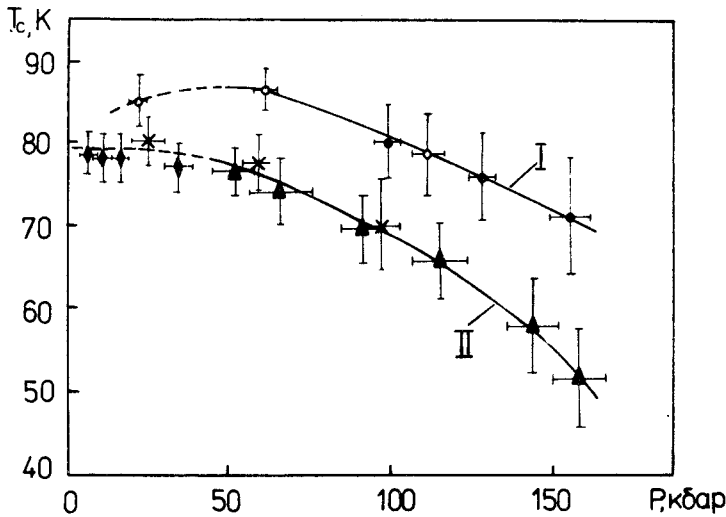


Рис. 3. Зависимости  $T_{co}$ ,  $T_{cm}$  и  $T_{ce}$  от давления для монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$

Из полученных результатов следует также, что у монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  сверхпроводимость сохраняется в области давлений до 160 кбар, так что наблюдавшееся в работах <sup>4,5</sup> исчезновение сверхпроводимости при сжатии является, по-видимому, следствием несовершенства контактов электродов с образцом.

Наблюдавшееся в настоящей работе нелинейное понижение  $T_c$  (кривые I и II, рис. 3) в широком интервале давлений, а также рост производной  $dT_c/dP$  при больших давлениях (кривая II, рис. 3) являются нетипичными не только для большинства ВТСП, в которых, как правило, наблюдается рост  $T_c$  при сжатии<sup>10</sup>, но и для большинства классических сверхпроводников.

Уменьшение  $T_c$  под действием давления коррелирует с изменением характера зависимости  $R$  от  $T$  при  $T > T_c$  (рис. 1). Следует обратить внимание на то, что изменение характера кривых  $R(T)$  выше  $T_c$  при сжатии у  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  аналогично изменению зависимостей  $R$  от  $T$  у классических аморфных полупроводников при приближении к переходу металл–диэлектрик<sup>11</sup>. Исходя из этой аналогии, можно предположить, что корреляция между уменьшением  $T_c$  и изменением вида кривых  $R(T)$  у образцов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  при сжатии также может быть связана с диэлектризацией электронного энергетического спектра  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  под действием давления.

#### Литература

1. Beille J. et al. Phys. C, 1988, 156, 448.
2. Tajima Y. et al. Phys. C, 1989, 158, 237.
3. Tamura S. et al. J. Phys. Soc. Jap., 1988, 57, 2215.
4. Wijngaarden R.J. et al. Phys. C, 1988, 152, 140.
5. Okai B. et al. Jap. J. of Appl. Phys., 1988, 27, L674.
6. Beille J. et al. Phys. C, 1989, 157, 446.
7. Erskine D. et al. J. Mater. Res., 1987, 2, 783.
8. Mori Y. et al. 12 AIRAPT int. conf. on high pressure science and technology, 1989. Programme with Abstracts, Pt. 1, p. 4.
9. Van Eenige E.N. et al. Ibid. Pt. 2, p. 13.
10. Berman I.V. et al. High temperature superconductivity from Russia. Ed. A.I.Larkin and N.Y.Zavaritsky. Singapore, World Scientific, 1989, p. 250.
11. Берман И.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 472.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
21 марта 1990 г.