

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 210 КБАР

*И.В.Берман, Н.Б.Брандт, И.Э.Грабой, А.Р.Кауль,  
Р.И.Козлов, И.Л.Ромашкина, В.И.Сидоров, Хан Цуй инь*

Впервые обнаружено, что у монокристаллических и керамических образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  зависимости критической температуры  $T_c$  от давления при  $P$  до 210 кбар имеют нелинейный характер. Величина производной  $dT_c/dP$  коррелирует со значением  $T_c$  при  $P = 0$ : у монокристаллов с более низкими значениями  $T_c$  производная  $dT_c/dP$  имеет более высокое значение.

Исследование высокотемпературных сверхпроводников при высоких давлениях, начиная с приоритетной работы <sup>1</sup>, вызывает большой интерес. Однако большинство исследований ограничивается областью относительно небольших давлений до 20 кбар ( $v^2$  — до 40 кбар), так что вопрос о поведении критической температуры  $T_c$  при существенно больших давлениях остается, в известной мере, открытым.

В экспериментах с гидростатическим давлением регистрируются полностью завершённые переходы в сверхпроводящее (СП) состояние, ширина которых несколько увеличивается при сжатии. Ситуация меняется при переходе к области давлений, превышающих 50 кбар, в которой исследования проводятся с использованием наковален Бриджмена, когда размеры образца, как правило, сильно ограничены. В этом случае ширина переходов в СП состояние больше, чем в опытах с гидростатическим давлением, причем в ряде работ переходы регистрируются на фоне роста (или очень слабого понижения) сопротивления  $R$  при охлаждении <sup>3-5</sup> и не являются завершёнными вплоть до 4,2 К. В работах <sup>6,7</sup> получены завершённые переходы в СП состоянии при высоких давлениях, но данные этих работ заметно различаются: в <sup>6</sup>  $T_c$  у  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  растёт от 96 до 107 К при увеличении давления от 0 до 149 кбар, в <sup>7</sup>  $T_c$  у монокристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  при увеличении давления в интервале (0 — 100 кбар) проходит через пологий максимум при  $P \approx 50$  кбар.

В настоящей работе исследованы зависимости  $R$  от  $T$  у монокристаллических и керамических образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  в интервале (300 — 1,5 К) в магнитных полях до 30 кЭ при давлениях до 210 кбар. Сопротивление образцов размерами  $30 \times 30 \times 300$  мкм<sup>3</sup> регистрировалось четырехконтактным методом. Electroдами служили платиновые полоски толщиной 10 мкм.

На рис. 1 а приведены некоторые кривые переходов в СП состояние у керамических образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  при различных давлениях. Для наглядности начало отсчета по температурной шкале смещено для каждой кривой на 10 К. Значения  $T_c$  указаны стрелками. Видно, что хотя  $R$  при СП переходе уменьшается до 0, форма кривых существенно трансформирована по сравнению с аналогичными кривыми, полученными в условиях гидростатики. В области давлений  $P < 100$  кбар СП переходу предшествует незначительное возрастание сопротивления. При  $P > 100$  кбар  $R$  слабо уменьшается при охлаждении. В магнитном поле 30 кЭ форма кривых СП переходов изменяется: начало ( $T_c$ ) смещается очень слабо, конец линейного участка — на 10 — 15 К.

У монокристаллов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  (рис. 1 б) в области относительно небольших давлений сопротивление при СП переходе уменьшается резко, но не до нуля. При увеличении давления наклон линейных участков СП переходов практически не увеличивается в широком диапазоне давлений ( $30 \lesssim P \lesssim 100$  кбар), а переходы в СП состояние становятся полностью завершёнными, смещаясь в сторону более высоких температур.

Сильно размытый переход в СП состояние у поликристаллических образцов и наличие, при малых давлениях, отличного от нуля сопротивления у монокристаллов, является, по-ви-

димому, следствием сильной неоднородности (по значениям  $T_c$ ) образцов малых размеров, в которых эффекты, связанные со свойствами поверхности, могут играть определяющую роль. Известно, что поверхность является наиболее уязвимой частью высокотемпературных сверхпроводников, т. к. все процессы, связанные с нарушением структуры (диффузия кислорода, внедрение паров воды, углекислоты и т. д.), в первую очередь, происходят на поверхности. По-видимому, именно с этим обстоятельством связаны сильные вариации величины энергетической щели по поверхности образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ , обнаруженные методом туннельной спектроскопии<sup>8</sup> при смещении зонда вдоль поверхности.

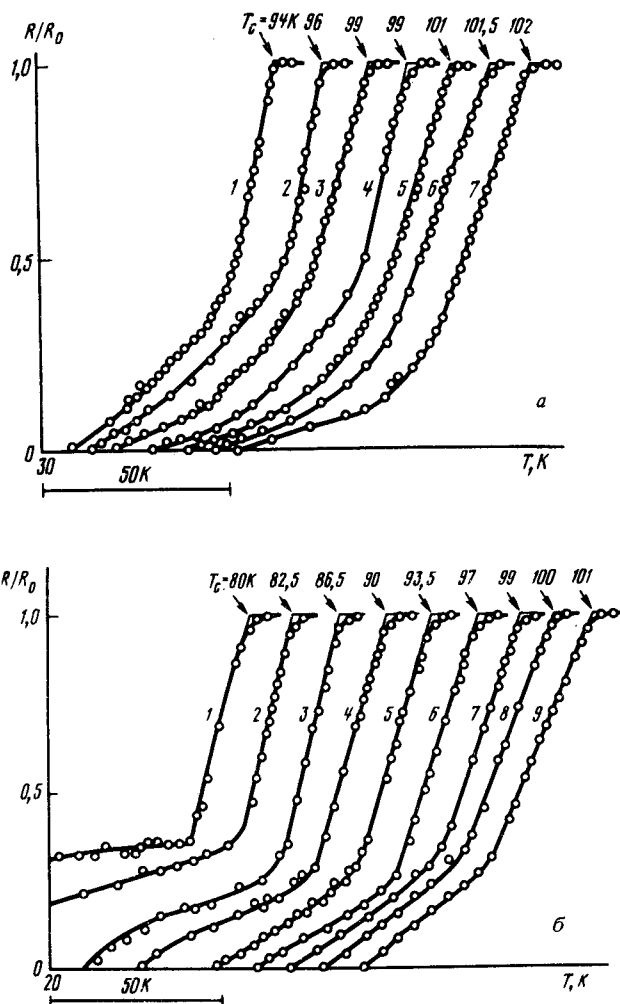


Рис. 1. Кривые переходов в сверхпроводящее состояние керамических (а) и монокристаллических (б) образцов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  при различных давлениях : а -  $P$ , кбар: 1 - 61, 2 - 67, 3 - 87, 4 - 97, 5 - 119, 6 - 150, 7 - 170; б -  $P$ , кбар: 1 - 36, 2 - 46, 3 - 53, 4 - 75, 5 - 86, 6 - 93, 7 - 100, 8 - 120, 9 - 140

На рис. 2 приведены зависимости  $T_c$  от давления у  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  построенные как по данным настоящей работы (кривые 1-3 - монокристаллы, 4 - керамика), так и по литературным данным (5 - 3, 6 - 4, 7 - 9, 8 - 10). На основании полученных данных можно предположить, что в широком интервале давлений зависимости  $T_c$  от  $P$  у соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  имеют следующий вид. При увеличении давления  $T_c$  линейно возрастает, затем скорость изменения  $T_c$  постепенно уменьшается и обращается в нуль при некотором критическом давлении. Вопрос о том, как изменяется  $T_c$  в области более высоких давлений, пока остается открытым, хотя, с нашей точки зрения, вид этой зависимости (сохраняет ли

$T_c$  постоянное значение, или пройдя через максимум, падает) имеет принципиальное значение для выяснения механизма изменения  $T_c$  при сжатии. Давление, при котором  $T_c(P)$  достигает максимального значения, коррелирует с величиной давления структурного превращения из орторомбической в тетрагональную фазу<sup>11, 12</sup>.

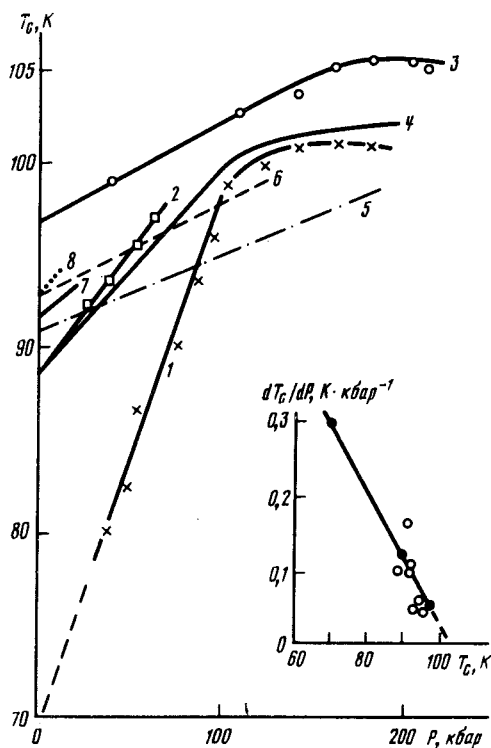


Рис. 2. Зависимости  $T_c$  от давления у монокристаллических (кривые 1 – 3) и керамических (кривая 4) образцов  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ , 5 – данные<sup>3</sup>, 6 – 4, 7 – 9, 8 – 10. Сплошные кружки на вставке – данные настоящей работы для монокристаллов

Другой интересной особенностью зависимостей  $T_c$  от  $P$  является то, что у орторомбической фазы  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$  величина производной  $dT_c/dP$ , по-видимому, сильно зависит от значения  $T_c$  при  $P = 0$ . Максимальное значение  $dT_c/dP$  имеют образцы с более низкими значениями  $T_c$ . Ориентировочный характер зависимости  $dT_c/dP$  от  $T_c$  для различных образцов приведен на вставке к рис. 2.

Одной из причин связи  $dT_c/dP$  с  $T_c$  могло бы быть перераспределение кислорода между различными позициями в решетке, в результате которого концентрация кислорода в слоях, ответственных за сверхпроводимость, увеличивается. Очевидно, что эффект перераспределения должен приводить к сильной зависимости  $T_c$  от  $P$  у первоначально дефектных по кислороду образцов и у образцов с оптимальной концентрацией – отсутствовать. Однако, в настоящее время отсутствуют данные структурных исследований, свидетельствующие о возможности эффекта перераспределения.

С другой стороны, обнаруженную зависимость  $dT_c/dP$  от  $T_c$  можно объяснить на основании гипотезы о возможности усиления электрон-решеточного взаимодействия вблизи температуры  $T_m$  структурных переходов<sup>13, 14</sup>. Чтобы согласовать полученные данные с этой гипотезой, следует предположить, что при большем дефиците кислорода (низких  $T_c$ ) усиливается величина электрон-решеточного взаимодействия вблизи  $T_m$ . С этой точки зрения, сильное возрастание  $T_c$  у дефектных по кислороду образцов при сжатии является следствием уменьшения  $T_m$  по действию давления<sup>14</sup>.

## Литература

1. *Chu C.W., Hor P.H., Meng R.L. et al.* Science, 1987, **235**, 567.
2. *Yoto S., Murayama C., Takanashi T., et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 1987, **26**; L603.
3. *Griessen A., Griessen R., Hemmes H. et al.* Phys. Rev. B, **36**, 5602.
4. *Okai D., Takahashi K., Ohta M.* Jpn. J. Appl. Phys., 1987, **26**, L820.
5. *Берман И.В., Брандт Н.Б., Кыстаубаев Т.З. и др.* В сб. : Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости, Свердловск, 1987, ч. II. с. 213.
6. *Maple M.B., Dalichaouch Y. et al.* Proceedings of ICHTS, 1988, Switzerland.
7. *Latter N., Wittig J.* Proceedings of ICHTS, 1988, Switzerland.
8. *Володин А.П., Хайкин М.С.* Письма в ЖЭТФ, 1987, **46**, 466.
9. *Hor P.H., Gao L., Meng R.L. et al.* Phys. Rev. Lett., 1987, **58**, 911.
10. *Yoshida H., Murata K., Noto K. et al.* J. Appl. Phys., 1987, **26**, L867.
11. *Tatada M., Ihara H., Yo M. et al.* Proceedings of ICHTS, 1988, Switzerland.
12. *Fietz W.H., Dietrich M.R., Ecke J.* Z. Phys. B – Cond. Mat., 1988, **69**, 17.
13. *Брандт Н.Б., Толмачев В.В.* Письма в ЖЭТФ, 1974, **19**, 439.
14. *Кассан-Оглы Ф.А.* В сб. : Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Свердловск, 1987, ч. I, с. 177.

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
3 мая 1988 г.