

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВТСП  
КЕРАМИК  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5+\delta}$**

Н.В. Аншукова, Ю.В. Бугославский, В.Г. Веселаго, А.И. Головашкин, О.В. Ершов,  
И.А. Зайцев, О.М. Иваненко, А.А. Минаков, К.В. Мицен

*Исследован ряд ВТСП керамик  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5+\delta}$ . Показано, что варьирование  $\delta$  оказывает существенное влияние на характер перехода в сверхпроводящее состояние.*

В работе исследовались магнитные свойства и теплоемкость вблизи  $T_c$  ряда высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) керамик  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5+\delta}$  при  $R = \text{Y}, \text{Ho}, \text{Gd}$  и различном содержании кислорода  $\delta$ . Керамики изготавливались по стандартной технологии спекания окислов соответствующих материалов. Изменение  $\delta$  производилось следующим образом. Из каждой керамической таблетки — иттриевой, гольмиевой и гадолиниевой — было приготовлено по три образца. Образцы № 1 вырезались непосредственно после синтеза. Образцы № 2 были отожжены на воздухе при  $550^\circ\text{C}$  и закалены в жидком азоте, а образцы № 3 после закалки были отожжены в атмосфере кислорода при  $900^\circ\text{C}$  и медленно ( $\sim 1 \text{ К/мин}$ ) охлаждены. В работе /1/ показано, что при подобной термообработке в результате закалки получают образцы с малым  $\delta$ , а отжиг и медленное охлаждение в кислороде приводит к увеличению  $\delta$ . Оказалось, что образцы № 2 имеют  $T_c$  меньшую, чем № 1, а № 3 — большую, чем № 2. Это находится в соответствии с обратимым уменьшением  $T_c$  при уменьшении  $\delta$ , обнаруженным в /2/.

Экранирование внешнего магнитного поля и эффект Мейснера изучались при помощи вибрационного магнитометра. При низких температурах в гранулярных сверхпроводниках экранировка осуществляется за счет глобальных межгранулярных токов, при этом экранированный объем может существенно превосходить фактический объем сверхпроводящей фазы. Однако нами установлено, что измерение экранировки позволяет определить истинный объем, занимаемый СП гранулами. На рис. 1 приведены зависимости

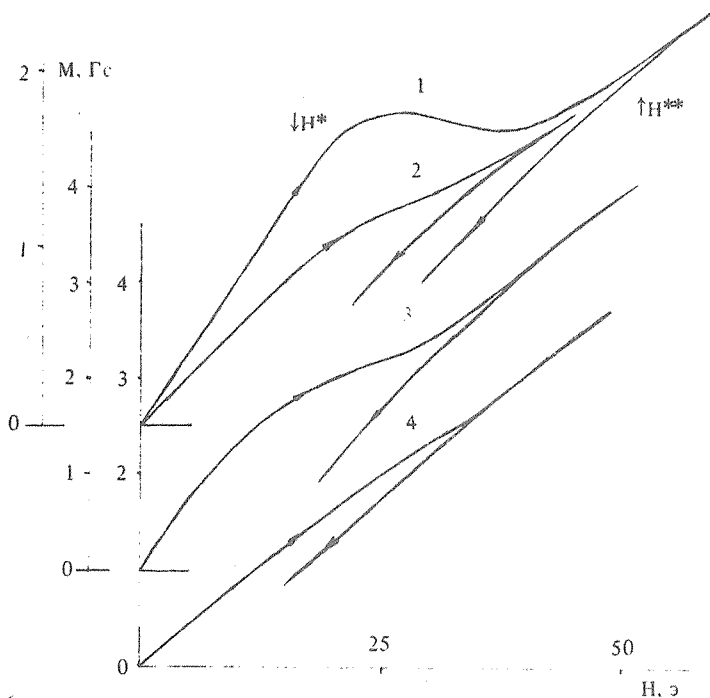


Рис. 1. Кривые намагничивания при 4,2 К для керамических образцов № 1  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  различной формы: 1 — для кольца в поле  $H$ , перпендикулярном к плоскости этого кольца; 2 — в поле, параллельном плоскости кольца; 3 — для вытянутого цилиндра в поле, перпендикулярном длинной оси; 4 — в поле, параллельном длинной оси цилиндра.

$M(H)$  при  $T = 4,2$  К для двух образцов из стандартной иттриевой керамики – цилиндра ( $l = 3$  мм;  $D = 0,7$  мм) и кольца ( $l = 2$  мм,  $D = 2$  мм,  $d = 1$  мм). Как и в /3/, наблюдаются следующие характерные особенности: начальный участок кривой ( $H < H^*$ ) линейен и зависит от ориентации образца относительно магнитного поля: для образцов, близких к эллипсоидам, начальный наклон  $S_1 = M(H)/H \sim (1 - n)^{-1}$ , и критическое поле  $H^* \sim (1 - n)$ , где  $n$  – размагничивающий фактор. При  $H^{**} < H < H_{C1}$  наблюдается также линейная и обратимая зависимость  $S_2 = M(H)/H = \text{const}$ , однако наклон практически постоянен при любой ориентации. Этот факт можно объяснить, исходя из предположения о том, что в интервале напряженностей поля  $H^* < H < H^{**}$  происходит разрушение "слабой" сверхпроводимости, так что при  $H < H^*$  за счет глобальных токов экранируется весь объем образца, а при  $H > H^{**}$  токи текут лишь по поверхности гранул, и магнитный момент пропорционален суммарному объему СП гранул. Это предположение подтверждается при сравнении кривых  $M(H)$  для диска и вырезанного из него кольца: начальные наклоны совпадают, а отношение значений  $S_2$  диска и кольца равно отношению масс этих образцов. Отношение намагниченностей диска при измерении экранировки и эффекта Мейснера в малом поле (10 Э) примерно совпадает с отношением  $S_1/S_2$ . Таким образом, по наклону  $M(H)$  при  $H > H^{**}$  можно определить объемную долю СП гранул: для наших образцов она составляла 35–50 %.

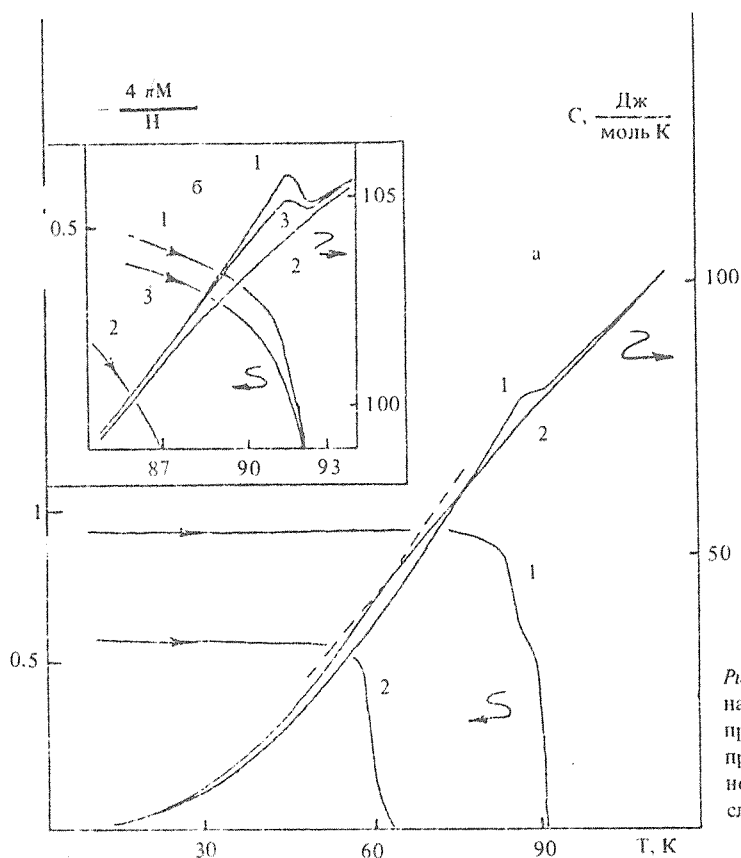


Рис. 2. Температурные зависимости теплоемкости и намагниченности для образцов: а)  $YBa_2Cu_{1-x}O_{6.5-\delta}$  при  $\delta \approx 0,5$  (1),  $\delta = 0,1$  (2); б)  $HoBa_2Cu_{1-x}O_{6.5-\delta}$  при  $\delta \approx 0,5$  (1),  $\delta \approx 0,3$  (2),  $\delta \approx 0,5$  (3). Намагниченность измерялась при нагревании в поле  $H = 10$  Э после охлаждения при  $H = 0$ .

Теплоемкость  $C$  образцов измерялась при помощи модуляционного микрокалориметра /4/. Эта методика чрезвычайно удобна при исследовании фазовых переходов, так как дает возможность проводить измерения  $C(T)$  в непрерывном режиме при изменении температуры, а также позволяет исследовать микрообразцы весом  $\sim 10$  мг.

В результате закалки образцов температура СП перехода понизилась на 31, 5, 15 К для керамик соответственно с Y, Ho, Gd. При этом уменьшилось и критическое поле слабых связей  $H^*$ . Изменилось также и поведение теплоемкости вблизи  $T_C$ . Все образцы № 1 имеют четкий ( $\Delta T \sim 1,5$  К) скачок теплоемкости  $\Delta C/C \approx 2,5$  % при  $T_C$  (рис. 2). У всех образцов № 2 с Y, Ho, Gd, судя по магнитным измерениям, доля СП фазы, как и у образцов № 1, достаточно велика, однако скачок теплоемкости не наблюдался ( $\Delta C/C < 0,5$  %). Ширина перехода, определенная в этом случае по ширине максимума мнимой части магнитной восприимчивости, составляла 2–3 К. Образец с Y имеет хорошо различимый излом теплоемкости, температура которого совпадает с  $T_C$ , определенной из магнитных измерений (рис. 2). Такое поведение теплоемкости вблизи точки перехода можно объяснить, опираясь на выводы работы /5/, где показана возможность перехода в сверхпроводящее состояние при малых  $\delta$  путем бозе-конденсации. При этом скачок производной  $\Delta \partial C / \partial T = 0,2$  Дж · моль<sup>-1</sup> К<sup>-2</sup> соответствовал бы концентрации  $n = 2,5 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup> бозонов с эффективной массой 60  $m_e$ . На гольмиевых и гадолиниевых образцах с дефицитом кислорода выделить излом теплоемкости не удается, это связано, по-видимому, с тем, что  $T_C$  лежит в области, где зависи. . . сь  $C(T)$  сильно нелинейна.

Оказалось, что изменения, вызванные закаливанием керамик, обратимы. Для образцов № 3 наблюдалось частичное восстановление свойств образцов № 1:  $T_C$  и  $H^*$  при кислородном отжиге увеличиваются, и вновь появляется скачок теплоемкости (рис. 2).

Полученные результаты могут служить указанием на то, что изменение содержания кислорода в керамиках  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6, 5+\delta}$  оказывает влияние не только на критическую температуру, но и на характер сверхпроводящего перехода, как это было предсказано в работе /5/, развивающей модель /6/.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Strobel P. et al. Nature, 327, № 6120, 306 (1987).
2. Monod P. et al. J. Physique, 48, № 8, 1369 (1987).
3. Senoussi S. et al. Phys. Rev., B36, № 7, 4003 (1987).
4. Ершов О. В., Минаков А. А., Веселаго В. Г. Препринт ФИАН № 233, М., 1983 .
5. Cohen M., Douglass D. Phys. Rev., B35, № 16, 8720 (1987).
6. Anderson P. W. et al. Phys. Rev. Lett., 58, 2790 (1987).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 17 июня 1988 г.