

УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ $YREBaCuO$ ($RE = Pr, Nd$)

© В.А.Волошин, И.С.Абалешева, Г.Ю.Бочковая, Ф.А.Бойко, Н.А.Дорошенко, Я.И.Южелевский

Донецкий физико-технический институт Академии наук Украины,
34014 Донецк, Украина
(Поступила в Редакцию 5 марта 1994 г.
В окончательной редакции 25 октября 1995 г.)

Дано математическое описание температурных зависимостей сопротивления образцов системы $YREBaCuO$ ($RE = Pr, Nd$). Высказано предположение, что для такой системы переходу в сверхпроводящее состояние предшествует переход полупроводник-металл. Показано, что при этом металлическое состояние характеризуется нулевым остаточным сопротивлением, что говорит о формировании в кристалле при переходе полупроводник-металл практически бездефектной проводящей области.

Система $YREBaCuO$ является сверхпроводящей. Однако частичная замена Y на RE ($RE = Nd, Pr$) и Ba на RE приводит к определенному (для каждой концентрации) снижению температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c . В настоящей работе находятся зависимость, описывающая наблюдаемый температурный ход электрического сопротивления, и минимальное число подгоночных параметров, определяющих переход в сверхпроводящее состояние образцов с самой различной концентрацией примесных ионов.

Для образцов рассматриваемой системы температурный ход сопротивления при высокой температуре имеет металлический характер, т.е. подчиняется уравнению

$$\rho(T) = \rho_0 + \alpha T, \quad (1)$$

где ρ_0 — остаточное сопротивление в $m\Omega \cdot cm$, α — коэффициент в $m\Omega \cdot cm/K$.

При понижении температуры для образцов с достаточно большой концентрацией указанных редкоземельных ионов тип зависимости изменяется на полупроводниковый, причем характер роста сопротивления близок к экспоненциальному закону $\exp(\Delta E/kT)$. Это может быть объяснено рядом причин, в частности наличием потенциальных ям (ловушек) с глубиной, характеризуемой энергией ΔE (в cm^{-1}). При дальнейшем понижении температуры экспоненциальный рост прекращается, и происходит резкое понижение сопротивления вплоть до нуля.

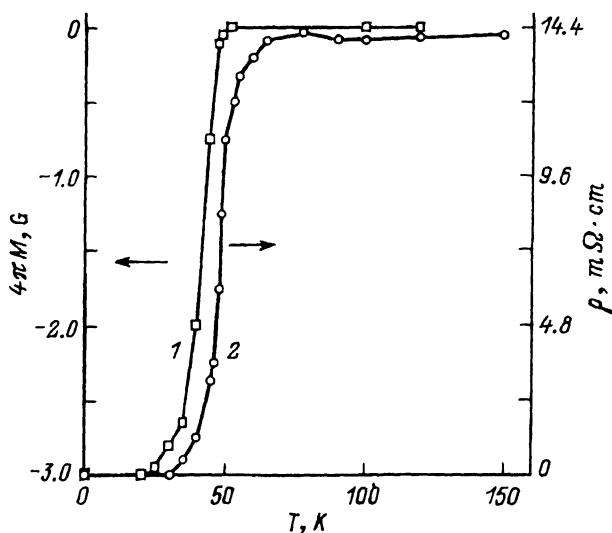


Рис. 1. Сравнение температурных зависимостей эффекта Мейсснера (1) и удельного сопротивления (2) $Y_{0.7}Pr_{0.3}Ba_2Cu_3O_7$ (по данным [1])

Здесь сделаем замечание, важное для дальнейшего обсуждения. Результаты экспериментов по одновременному исследованию эффекта Мейсснера и электрического сопротивления (например, приведенные на рис. 1 [1] и табл. 1 [2]) позволяют высказать гипотезу о том, что для подобных систем переходу в сверхпроводящее состояние предшествует переход полупроводник-металл. Для того чтобы это произошло, необходимо, чтобы ловушки нейтрализовались, причем именно при температуре, очень близкой к T_c . Поэтому для описания температурной зависимости сопротивления в нормальном состоянии для исследуемых

Таблица 1

Сопоставление данных о температуре сверхпроводящего перехода системы $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$, полученных на основании магнитных (M) и резисторных (R) измерений

x	$T_c(R)$	$T_c(M)$
0.2	75.5	74.6
0.3	60.5	59.5
0.4	74.0	44.2
0.5	32.7	-

Примечание. Если принять гипотезу настоящей статьи, то $T_c(R)$ следует считать температурой перехода полупроводник-металл, а $T_c(M)$ — температурой истинного сверхпроводящего перехода. Приведенные цифры наиболее вероятны, по мнению авторов [2]. Однако ошибка в определении $T_c(M)$ такова, что она перекрывает разницу $T_c(R) - T_c(M)$. Поэтому и после появления работы [2] предлагаемую гипотезу нельзя считать доказанной.

$$\rho(T) = \frac{\rho_0 + \alpha T}{1 - n[1 - \exp(-\Delta E/kT)]}, \quad (2)$$

где n — отношение числа ловушек к числу носителей (дырок). Предполагается, что число ловушек меньше числа носителей, т.е. $0 < n < 1$, что ловушка, в которую попала дырка, нейтрализуется. В согласии с предлагаемой гипотезой при подгонке расчета к эксперименту величина n должна быть такой, чтобы ловушки были нейтрализованы при температуре, близкой к T_c , и дальнейшее изменение сопротивления имело металлический характер.

Второе допущение, принятое при подгонке расчета к эксперименту, заключалось в том, что глубина ловушек остается постоянной независимо от концентрации RE. Требование $\Delta E = \text{const}$ приводит к тому, что фактически параметр ΔE не является подгоночным для достаточной большой серии образцов с различной концентрацией.

Керамические образцы $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$ ($x = 0, 0.16, 0.32, 0.48, 0.7$) были синтезированы из смеси окислов Pr, Y, Cu и нитрата бария по стандартной технологии. Из полученных затем таблеток были вырезаны образцы размером $10 \times 2 \times 0.5$ mm, сопротивление которых измерялось обычной четырехконтактной методикой в интервале температур 4.2–300 K.

Анализировались также данные работы [3], т.е. температурный ход сопротивления образцов $Nd(Ba_{1-x}Nd_x)_2Cu_3O_7$ ($x = 0.2, 0.25$).

Расчет гипотетического перехода полупроводник–металл при температурах, близких к T_c , и сравнение этого расчета с экспериментальными данными показаны на рис. 2, 3. Неожиданным результатом оказалось то, что необходимым условием выполнения предложенной гипотезы явилось равенство нулю параметра ρ_0 для всех исследуемых образцов. Тем самым количество подгоночных параметров уменьшилось до двух: n и α .

Физически этот результат можно объяснить следующим образом. В кристалле имеются отдельные, изолированные от короткодействующих влияний, достаточно протяженные бездефектные области. Кроме этого имеются удаленные области с резко повышенной (или пониженной) электронной плотностью, которые благодаря кулоновскому взаимодействию создают ловушки для носителей тока. По мере понижения температуры носителя, попадая в ловушки, «вымораживаются», и потенциальный рельеф сглаживается. Проводимость приобретает металлический характер. За бездефектные области, в которых осуществляется металлическая проводимость, можно принять плоскости Cu2-02-03, как это делается, например, в [4], а за области с электронной плотностью, отклоняющейся от средней, — окрестности ионов Pr и Nd, замещающих ионы Ba. Подробно это будет разобрано в следующей статье.

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета для образцов системы $Nd(Ba_{1-x}Nd_x)_2Cu_3O_7$ при $x = 0.25$ и для системы $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$ при $x = 0.48$. Экспериментальные данные представлены точками. На обоих рисунках сплошные кривые рассчитывались по формуле (2) с параметрами, приведенными в табл. 2. Из этих рисунков видно, что при

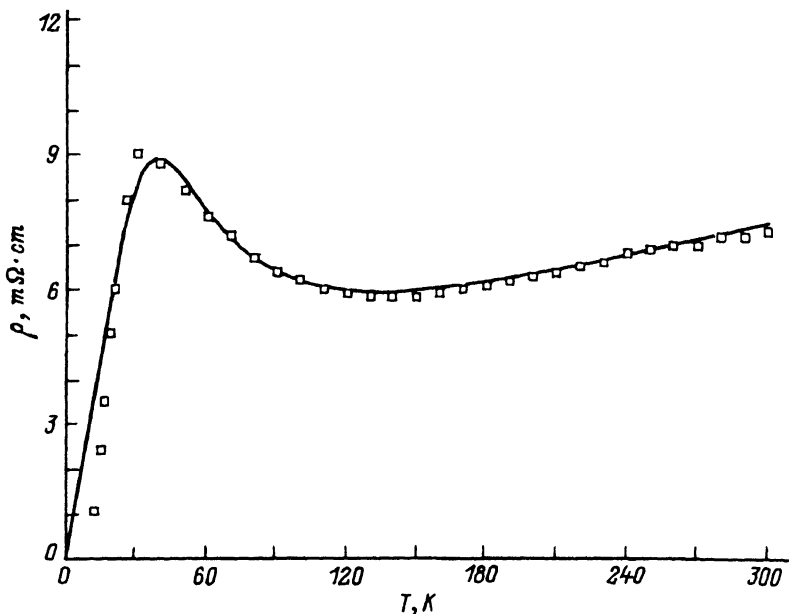


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления $Nd(Ba_{0.75}Nd_{0.25})_2Cu_3O_7$. Точки — экспериментальные данные. Сплошная кривая — расчет по уравнению (2). Подгоночные параметры приведены в табл. 2.

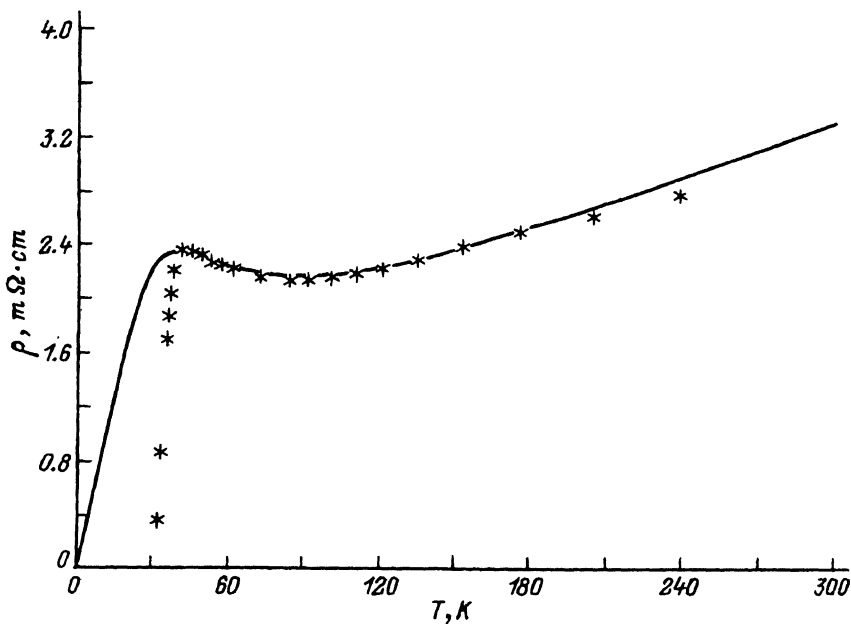


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления $Y_{0.52}Pr_{0.48}Ba_2Cu_3O_7$. Точки — экспериментальные данные. Сплошная кривая — расчет по уравнению (2). Подгоночные параметры приведены в табл. 2.

Величины подгоночных параметров для систем
 $Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$ и $Nd(Ba_{1-x}Nd_x)_2Cu_3O_7$

x	n	$\Delta E, \text{cm}^{-1}$	T_c, K	$\rho_0, \text{m}\Omega\text{-cm}$	$\alpha, \text{m}\Omega\text{-cm/K}$	Рисунок
$Y_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$						
0.16	0.58	-85	77.5	0	0.0046	-
0.32	0.7	-85	57.5	0	0.0079	-
0.48	0.91	-85	35	0	0.0078	3
0.70	1.00	-17	-	28.00	0	4
$Nd(Ba_{1-x}Nd_x)_2Cu_3O_7$						
0.20	0.885	-105	32.3	0	0.096	-
0.25	0.9545	-105	9.9	0	0.0155	2

выбранном наборе параметров на этих кривых вблизи T_c наблюдается переход полупроводник-металл. Как оказалось, одновременное выполнение двух требований, приведенных выше, однозначно определяет указанный в табл. 2 набор параметров.

Аналогичные результаты получены и для других исследованных образцов (табл. 2).

В связи с приведенными рассуждениями возникает следующий вопрос. Известно, что у образцов с большим содержанием Pr ($x > 0.5$) сверхпроводимость не наблюдается (рис. 4). Имеются ли в них идеально проводящие области? Другими словами, можно ли описать темпе-

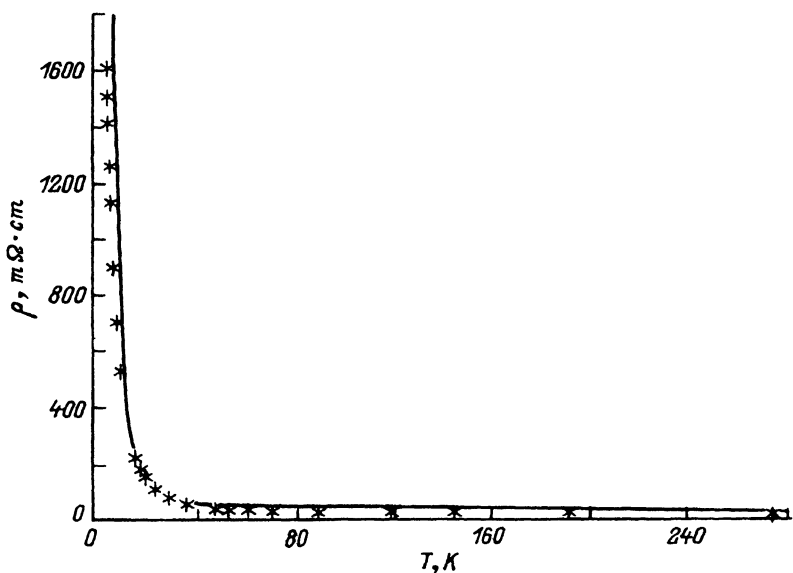


Рис. 4. Температурная зависимость удельного сопротивления $Y_{0.3}Pr_{0.7}Ba_2Cu_3O_7$. Точки — экспериментальные данные. Сплошная кривая — подгоночная по уравнению (2) с параметрами согласно табл. 2.

ратурную зависимость сопротивления таких образцов в рамках принятой формулы при условии, что параметр ρ_0 будет равен нулю?

Оказывается, что при таких больших концентрациях Pt бездефектных областей в образцах нет. Для согласия с экспериментом в выражении (2) необходимо положить $n = 1$ и $\rho_0 \gg 1$.

Кроме того, необходимо сделать одно замечание. Система с празеодимом и система с неодимом очень различны. Подавление сверхпроводимости в системе с Pt начинается при очень низких концентрациях редкоземельного иона, сразу же как только ион Pt начинает замещать ион Y.

Подавления сверхпроводимости в системе с Nd не происходит даже при полной замене Y на Nd. Оно начинается только при более высоких концентрациях, когда ион Nd начинает замещать ион Ba. Между тем данные настоящей статьи свидетельствуют о следующем: 1) температурные зависимости сопротивления систем с Pt и Nd подобны; 2) математическая обработка результатов эксперимента приводит к выводам о том, что подавление сверхпроводимости в обоих случаях обусловлено наличием ловушек с примерно одинаковой глубиной (100 cm^{-1}); сверхпроводимость возникает только при условии $\rho_0 = 0$.

Таким образом, в настоящей работе никаких формальных различий в резистивных свойствах этих двух систем не обнаружено.

В заключение авторы благодарят Ю.Кузовлева за предоставленную возможность воспользоваться его великолепной программой «Graphical Calculator».

Список литературы

- [1] Peng J.L., Klavins P., Shelton R.N., Radousky H.B., Hahn P.A., Bernardez L. Phys. Rev. **B40**, 7, 4517 (1989).
- [2] Soerensen C., Gydax S. Phys. Rev. **B51**, 17, 11848 (1995).
- [3] Van Woerden R.A.M., de Leeuw D.M. Physica **C165**, 221 (1990).
- [4] Сухаревский Б.Я. Тез. докл. VI научн сем «Физика магнитных явлений». Донецк (1993). С. 127.