

PACS: 74.25.Fy, 74.20.De, 74.72.Jt

**В.А. Волошин**, В.В. Кузнецова, Т.Н. Шевцова

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина  
E-mail: vika@kiit.net

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2008 года

*Предложен механизм, описывающий переход в сверхпроводящее состояние кристаллов  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$ , основанный на изменении соотношения полупроводниковой и металлической проводимостей в веществе.*

**Ключевые слова:** высокотемпературная сверхпроводимость, полупроводниковая проводимость, металлическая проводимость,  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

### Введение

В 1998 г. на кристаллах  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$ , синтезированных радиационным методом, был обнаружен переход в сверхпроводящее состояние [1]. В ходе эксперимента были зарегистрированы температурные зависимости электросопротивления  $\rho$  при различных давлениях. В работах [2] и [3] уже делалась попытка объяснить полученные в [1] результаты с помощью эмпирической зависимости

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

где первое слагаемое описывает металлический или полупроводниковый температурный ход сопротивления, а второе, предложенное авторами [4], учитывает возникновение локальных сверхпроводящих областей, флуктуационно образующихся при температуре выше температуры перехода. На основании анализа этой формулы в статье [3] впервые была высказана гипотеза о том, что переход системы в сверхпроводящее состояние происходит при изменении проводимости от полупроводниковой к металлической.

Целью настоящей работы является желание показать, что механизм высокотемпературной сверхпроводимости, в отличие от низкотемпературной,

может быть описан через взаимодействие металлической  $\sigma_1$  и полупроводниковой  $\sigma_2$  проводимостей, взятых в определенном соотношении, или, что более общее, через равновесную конфигурацию  $4f^2$  состояния, когда  $4f$ -электроны взаимодействуют с окружением слабо (металл) и сильно (полупроводник).

### Результаты и обсуждение

Для объяснения экспериментальных данных, характеризующих кристалл  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$  [1], вводим температурную зависимость металлической  $\sigma_1$  и полупроводниковой  $\sigma_2$  проводимостей:

$$\begin{aligned}\sigma_1(T) &= \frac{1-n}{\rho_0 + \alpha T}, \\ \sigma_2(T) &= \frac{n}{(\rho_0 + \alpha T) \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)},\end{aligned}\tag{1}$$

где параметр  $n$  – доля полупроводниковой проводимости в веществе,  $\rho_0$  – остаточное сопротивление,  $\alpha$  – температурный коэффициент,  $\Delta E$  – ширина энергетической щели. Параметр  $n$  может меняться от 0 до 1. При  $n = 0$   $\sigma_2(T) = 0$ , т.е. вещество обладает только металлической проводимостью, а при  $n = 1$   $\sigma_1(T) = 0$  – только полупроводниковой.

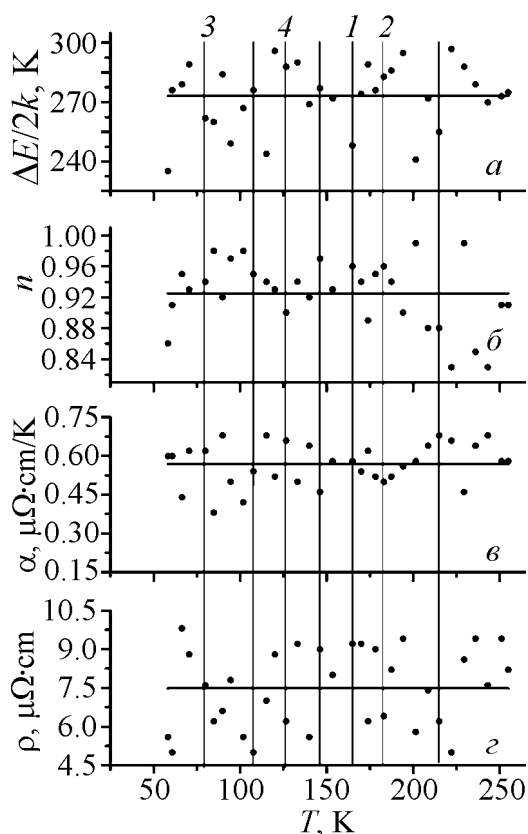
При анализе металлических и полупроводниковых свойств редкоземельного иона обнаруживается фундаментальный признак высокотемпературных сверхпроводников: величины  $\sigma_1(T)$  и  $\sigma_2(T)$  в некоторой точке  $T$  имеют равные значения, т.е. их графики должны пересекаться [2]. Причем при высокой температуре преобладает полупроводниковая проводимость, а при низкой – металлическая. При этом возникает особое резонансное взаимодействие проводимостей, при котором формально проводимость вещества можно представить как сумму этих величин.

С учетом вышесказанного экспериментальную зависимость  $\rho_{\text{exp}}(T)$  можно описать выражением

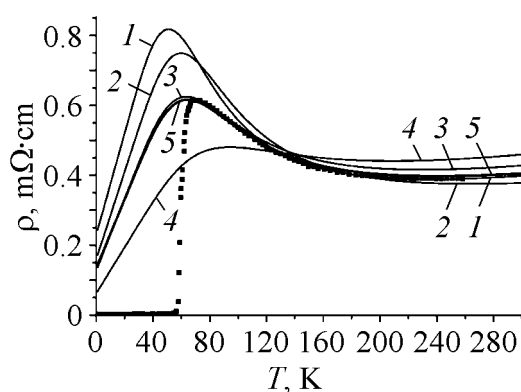
$$\rho(T) = \frac{1}{\sigma_1(T) + \sigma_2(T)} = \frac{\rho_0 + \alpha T}{(1-n) + n \exp\left(\frac{-\Delta E}{2kT}\right)}.\tag{2}$$

Значения подгоночных коэффициентов  $\rho_0$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\Delta E/2k$  рассчитывали с помощью компьютерной программы методом подбора, исходя из условия, что при определенном их наборе значение уравнения (2) с определенной степенью точности совпадает с соответствующим по температуре значением эксперимента  $\rho_{\text{exp}}(T)$  [1].

Для каждой температуры получился свой набор коэффициентов (вертикальные линии 1–4 на рис. 1). Из-за того, что все вычисления проведены с определенной точностью, одной точке экспериментальной кривой может удов-



**Рис. 1.** Подгоночные коэффициенты (•) для уравнения (2): *a* –  $\Delta E/2k(T)$ , *б* –  $n(T)$ , *в* –  $\alpha(T)$ , *г* –  $\rho_0(T)$ . Горизонтальные линии – сглаживание, вертикальные линии соединяют точки, принадлежащие одному произвольно выбранному набору



**Рис. 2.** Температурная зависимость электрического сопротивления: 1–5 –  $\rho_{\text{theor}}$  (табл. 1); ■ –  $\rho_{\text{exp}}$

летворять множество наборов, из которых произвольно выбирается любой. На рис. 2 показаны кривые, которые получаются из уравнения (2) с использованием соответствующих наборов 1–4 (см. рис. 1). Как видно на рис. 1, подгоночные коэффициенты  $\rho_0$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\Delta E/2k$  имеют достаточно большой разброс значений. Но если рассматривать некоторые средние значения, то их можно считать постоянными во всем диапазоне температур.

После проведения анализа полученных данных было найдено среднее значение подгоночных коэффициентов (рис. 2, кривая 5), с которыми уравнение (2) при температуре до  $T_c$  достаточно точно описывает экспериментальную кривую:  $n = 0.942$ ,  $\rho_0 = 0.0078 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ ,  $\alpha = 0.00057 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm/K}$ ,  $\Delta E/2k = 270 \text{ K}$  [2]. Однако при температуре ниже  $T_c = 56 \text{ K}$  теоретическая кривая 5 плавно спадает до 0, не обнаружив переход в сверхпроводящее состояние.

Если же построить согласно (1) графики зависимостей  $\sigma_1(T)$  и  $\sigma_2(T)$  (рис. 3,а), рассчитанные с использованием уже отобранных коэффициентов, то можно заметить, что они пересекаются при температуре  $T = 100 \text{ K}$ , которая не совпадает с  $T_c$  эксперимента. Если увеличить  $\sigma_2(T)$  и соответственно уменьшить  $\sigma_1(T)$  в одинаковое количество раз для того, чтобы оставаться в области изменения  $n$ , то точка их пересечения сместится (табл. 2).

Таким образом, при  $0.364\sigma_1(T)$  и  $2.75\sigma_2(T)$  получаем пересечение графиков в точке  $T_c = 56 \text{ K}$  (рис. 3,б).

Таким образом, при  $0.364\sigma_1(T)$  и  $2.75\sigma_2(T)$  получаем пересечение графиков в точке  $T_c = 56 \text{ K}$  (рис. 3,б).

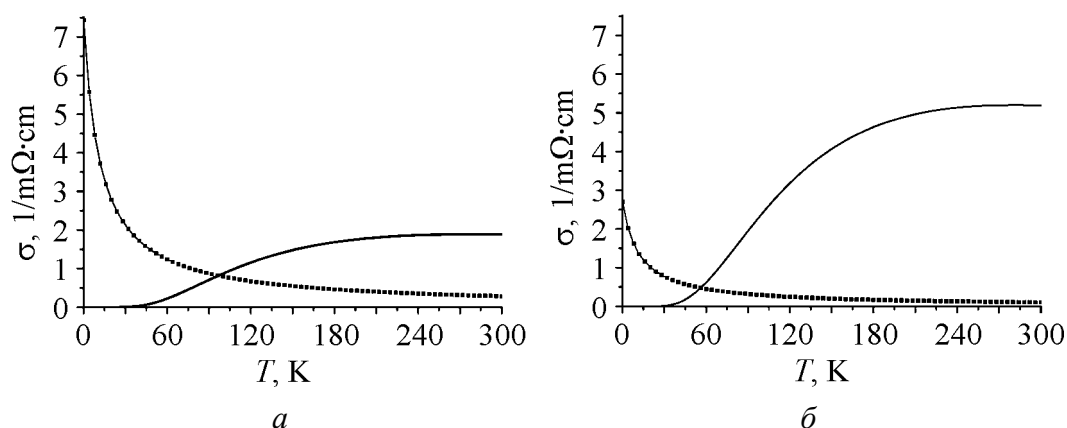


Рис. 3. Температурные зависимости металлической  $\sigma_1$  (—■—) и полупроводниковой  $\sigma_2$  (—) проводимостей: *a* – без поправки, *б* – с поправками 0.364 для  $\sigma_1$  и 2.75 – для  $\sigma_2$

Таблица 1

Варианты значений подгоночных коэффициентов для уравнения (2)

№ кривой $\rho_{\text{theor}}(T)$ (рис. 2)	$n$	$\rho_0, 10^{-3} \text{ м}\Omega\cdot\text{см}$	$\alpha, 10^{-4} \text{ м}\Omega\cdot\text{см}/\text{К}$	$\Delta E/2k, \text{ К}$
1	0.960	9.2	5.8	248
2		6.4	5.0	283
3	0.940	7.6	6.2	262
4	0.900	6.2	6.6	288

Таблица 2

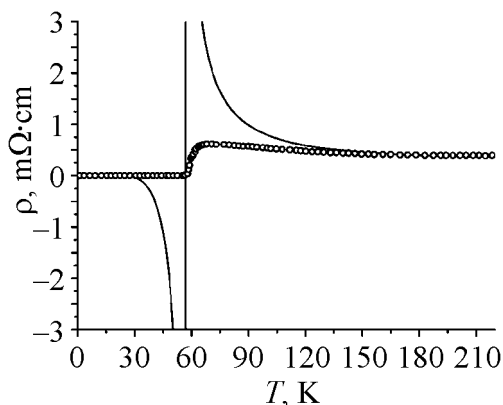
Варианты множителей, смещающих точку пересечения проводимостей  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$

Множитель для проводимостей		Температура, при которой $\sigma_1 = \sigma_2, \text{ К}$
$\sigma_1$	$\sigma_2$	
1.000	1.0	100.0
0.667	1.5	74.0
0.500	2.0	64.5
0.400	2.5	58.3
0.364	2.75	56.0

В точке пересечения  $\sigma_1(T)$  и  $\sigma_2(T)$  равны. Это означает, что кристалл  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$  в данной точке в одинаковой степени проявляет свойства как полупроводника, так и металла. Переход в сверхпроводящее состояние происходит, если металлическая проводимость  $\sigma_1(T)$  подавляет полупроводниковую  $\sigma_2(T)$ . Тогда уравнение (2) с поправкой для проводимостей, с учетом условия перехода в сверхпроводящее состояние запишется в следующем виде:

$$\rho(T) = \frac{1}{0.364\sigma_1 + 2.75\sigma_2} - \frac{1}{0.364\sigma_1 - 2.75\sigma_2}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлен график  $\rho_{\text{theor}}(T)$ , полученный с помощью уравнения (3), который согласуется с экспериментальной зависимостью [1].



**Рис. 4.** Температурная зависимость электросопротивления с переходом в сверхпроводящее состояние: — —  $\rho^{\text{theor}}$  (уравнение (3));  $\circ$  —  $\rho_{\text{exp}}$  для  $P = 0$

### Выводы

Итогом данной работы явилось нахождение такого сочетания величин проводимостей  $0.364\sigma_1(T)$  и  $2.75\sigma_2(T)$  (и только этих проводимостей), которое описывает всю совокупность рассматриваемых экспериментальных результатов, в том числе и сверхпроводящий переход. Следовательно, переход вещества в сверхпроводящее состояние можно связывать с изменением соотношения проводимостей в кристалле, что можно считать аналогом возникновения куперовских пар в низкотемпературном сверхпроводнике.

1. Z. Zou, J. Ye., K. Oka, Y. Nishihara, Phys. Rev. Lett. **80**, 1074 (1998).
2. V.A. Voloshin, I.C. Abalesheva, G.Yu. Bochkovaya, F.A. Boiko, N.A. Doroshenko, N.A. Doroshenko, Ya.I. Yuzhelevsky, Phys. Solid State **38**, 855 (1996).
3. Ф.А. Бойко, Г.В. Букин, В.А. Волошин, А.А. Гусев, ФНТ **28**, 138 (2002).
4. L.G. Aslamazov, A.I. Larkin, Phys. Lett. **A26**, 238 (1968).

В.А. Волошин, В.В. Кузнецова, Т.М. Шевцова

### УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ В $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

Запропоновано механізм, який описує перехід в надпровідниковий стан кристалів  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$ , заснований на зміні співвідношення напівпровідникової та металічної провідностей у речовині.

**Ключові слова:** високотемпературна надпровідність, напівпровідникова провідність, металічна провідність,  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

V.A. Voloshin, V.V. Kuznetsova, T.N. Shevtsova

### CONDITIONS FOR ORIGINATION OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY IN $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

A mechanism is proposed that describes the transition of  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$  crystals to a superconducting state based on a change in the ratio of semiconductor and metallic conductivities in the material.

**Keywords:** high-temperature superconductivity, semiconductor conductivity, metallic conductivity, PrBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.6</sub>

**Fig. 1.** Adjustable coefficients (●) for equation (2):  $a - \Delta E/2k(T)$ ,  $\bar{b} - n(T)$ ,  $\bar{e} - \alpha(T)$ ,  $\bar{z} - \rho_0(T)$ . Horizontal lines – smoothing, the vertical lines connect points belonging to the same arbitrarily selected set

**Fig. 2.** Temperature dependence of electrical resistance:  $I-5 - \rho_{\text{theor}}$  (Table 1); ■ –  $\rho_{\text{exp}}$

**Fig. 3.** Temperature dependences of metallic  $\sigma_1$  (—■—) and semiconductor  $\sigma_2$  (—) conductivities:  $a$  – no correction,  $\bar{b}$  – with corrections 0.364 for  $\sigma_1$  and 2.75 for  $\sigma_2$

**Fig. 4.** Temperature dependence of electrical resistance with the transition to a superconducting state: — –  $\rho_{\text{theor}}$  (equation (3)); ○ –  $\rho_{\text{exp}}$  for  $P = 0$