

05.2; 05.4

© 1991

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТИ
ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
КОМПОЗИТА $YBa_2Cu_3O_8 - Ag$ ОТ ОБЪЕМНОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ СЕРЕБРА

В.И. Доценко, И.Ф. Кисляк,
К.В. Русанов, Е.Г. Тюринна,
Г.М. Гладченко

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), изготовленные по керамической технологии, имеют ряд недостатков, затрудняющих их использование в технике (низкая критическая плотность тока, хрупкость, склонность к деградации при воздействии влаги и т.д.). Эти недостатки во многом устраняются путем изготовления композитов ВТСП - серебро [1]. Для корректного расчета стабильности сверхпроводниковых устройств необходимо знать, как зависят теплопроводность λ и удельное электросопротивление ρ композита от объемной концентрации в нем серебра X .

В зависимости от технологии при объемном допировании серебра может размещаться на границах зерен ВТСП, но может и частично замещать атомы меди в кристаллической решетке [2]. Использованные в наших экспериментах таблетки диаметром 18-20 мм и толщиной 6-7 мм и бруски размерами 3x4x30 мм³ изготовлены холодным прессованием с усилием 600 МПа из перемешанных всухую порошков $YBa_2Cu_3O_8$ ($\delta = 6.95$, средний размер зерен 30-40 мкм) и серебра ПСр - 1 по ТУ 48-1-708-87 (средний размер частиц 10 мкм). Термообработка: нагрев со скоростью 150 град/час до 930 °С и выдержка при этой температуре 17 часов; охлаждение со скоростью 80 град/час при 500 °С и выдержка 10 часов; охлаждение до комнатной температуры вместе с печью. Изготовлены образцы с $X=0-0.5$ (0-50 объемных %); при описанной технологии замещение меди серебром не происходит [3].

Электросопротивление постоянному току определялось четырехзондовым методом от $T=300$ К до 78 К. При $X=0-0.3$ температура начала СП-перехода равна 93.0-93.5 К, при $X=0.5$ начало перехода не наблюдается вплоть до 78 К. Температура окончания перехода $T_{с0} = 89.9, 90.6, 87.6, 82.2$ К при $X=0, 0.1, 0.2$ и 0.3 соответственно.

Теплопроводность образцов определялась в диапазоне $T=65-150$ К методом стационарного теплового потока по показаниям двух термопар медь-константан.

Как видно на рис. 1, наши данные хорошо согласуются с результатами других авторов об электросопротивлении композитов

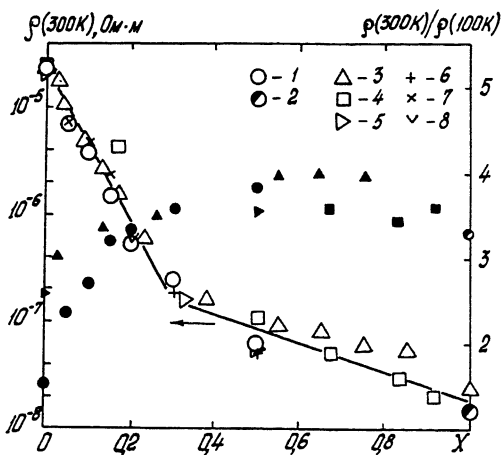


Рис. 1. Концентрационная зависимость электросопротивления (светлые значки) и отношения сопротивлений (темные) композитов $YBCO - Ag$: 1 - наши данные; 2 - [4] (металлическое серебро); 3 - [3]; 4 - [5]; 5 - [6]; 6 - расчет $\rho(300\text{ K})$ по (1), (2); 7 - по (3); 8 - по (4); линии проведены для наглядности.

$YBaCuO - Ag$ с межзерненным размещением серебра. Граница между двумя участками зависимости ρ от X , имеющими различный наклон, находится при $\approx 0.25-0.30$. Выше этой концентрации Ag отношение $\rho(300\text{ K})/\rho(100\text{ K})$ практически постоянно.

В работе [2] молярная доля серебра в композите $YBa_2Cu_{3-x}Ag_xO_7$ изменялась в пределах $0-0.5$, что не влияло на $T_c = 91.9\text{ K}$. Величина $\rho(273\text{ K})$ при $X_M = 0-0.2$ была примерно равна электросопротивлению недопированной керамики на рис. 1, однако дальнейшее увеличение концентрации Ag привело к росту $\rho(273\text{ K})$: $5 \cdot 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $X_M = 0.3$; $2.2 \cdot 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $X_M = 0.5$.

В исследованном диапазоне температур λ мало зависит от T ; лишь при $X = 0-0.1$ наблюдается небольшой рост теплопроводности с уменьшением температуры от $T = 90\text{ K}$ до 65 K , типичный для ВТСП [7]. Теплопроводность композита растет с увеличением X ; зависимость $\lambda = \lambda(X)$ также имеет два четко выраженных участка с разным наклоном - рис. 2. Здесь же представлены значения постоянной Лоренца $L = \lambda\rho/T$, рассчитанные по измеренным значениям теплопроводности и электросопротивлению. Легко видеть, что граничная концентрация X_c для обеих величин находится также в районе $0.2-0.3$.

Теплопроводность системы с замещением [2] систематически убывает с ростом концентрации Ag : $\lambda(100\text{ K}) = 4.4, 3.3$ и $2.4\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при $X_M = 0, 0.1$ и 0.3 соответственно. По-видимому, снижение коэффициентов переноса (λ и $\sigma = \rho^{-1}$) с увеличением X_M

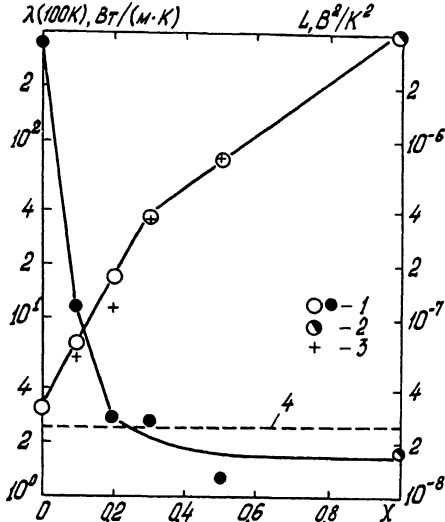


Рис. 2. Концентрационная зависимость теплопроводности (светлые значки) и числа Лоренца (темные значки) композитов $YBCO - Ag$: 1 - наши данные; 2 - [4, 8]; 3 - расчет $\lambda(100K)$ по (1), (2); 4 - $L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} B^2/K^2$; сплошные линии проведены для наглядности.

связано в таких системах с искажением кристаллической решетки из-за того, что Ag имеет больший атомный радиус, чем Cu .

Композиты с межзерненным размещением серебра представляют собой неоднородную среду со случайным объемным распределением Ag , $YBCO$ и пор (объемная пористость образцов Π убывает с ростом X от $\Pi=0.29$ при $X=0$ до $\Pi=0.09$ при $X=0.5$). Эффективная проводимость Λ таких сред может быть интерпретирована в рамках теории перколяции [9]:

$$\frac{\Lambda}{\Lambda_A} = S_1 - \nu \left[\frac{\Delta S}{1 - (\nu) l_2} + \frac{2S_3}{1 - (\nu) l_1} \right] + S_4, \quad (1)$$

где $\nu = \frac{\Lambda_Y}{\Lambda_A}$, $l_1 = \left(\frac{X - X_c}{1 - X_c} \right)^{0.8}$, $l_2 = X^{1/3}$, $S_1 = l_1^2$, $S_2 = l_2^2$, $\Delta S = S_2 - S_1$, $S_3 = (1 - l_2) l_1$, $S_4 = 1 - S_2 - 2S_3$, индексы А и Y относятся к серебру и керамике соответственно. При $S_2 \leq S_1$ считается, что $\Delta S = 0$ и $l_2 = l_1$. Порог перколяции X_c определяется с учетом наличия пор [9]:

$$X_c = \frac{3}{17} \left(\frac{1 - X - \Pi}{1 - \Pi} \right). \quad (2)$$

Расчет теплопроводности ($\Lambda = \lambda(100\text{K})$) по (1), (2) дает в целом неплохое описание экспериментальной зависимости $\lambda = \lambda(X)$ - рис. 2. Расчет электросопротивления ($\Lambda = \rho^{-1}$) для $T=100$ и 300 К удовлетворительно согласуется с опытными данными только при $X=0.3$ и 0.5 - рис. 1. При $X=0.05-0.15$ лучшие результаты дает соотношение [9]:

$$\frac{\Lambda}{\Lambda_y} = k(1-5X)^{-1}, \quad (3)$$

где $k=4.2$ при $T=100$ К и $k=2.4$ при $T=300$ К, а при $X=0.2$ - соотношение [9]:

$$\frac{\Lambda}{\Lambda_A} = k_1(X-X_c)^{1.6}, \quad (4)$$

где $k_1=2.1$ и X_c - по (2).

В заключение отметим, что композиты $YBCO - Ag$ с межзеренным размещением серебра обладают свойствами, значительно более выгодными с точки зрения сильноточного применения, чем системы с замещением. Полученные данные о зависимости λ и ρ от X могут быть использованы при расчете сверхпроводниковых проводов, тоководов, соленоидов и т.д.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В л а с е н к о К.Е., Р у с а н о в К.В., Т ю р и н а Е.Г. // Обзоры по высокотемпературной сверхпроводимости. 1991. В. 7. С. 25-52.
- [2] Б л и н к и н А.А., Г о л о в и н В.Н., Д е р е в я н к о В.В. и др. В сб.: Вопросы атомн. науки и техники. Сер.: Ядерно-физ. исследования. Вып. 9(17). М.: ЦНИИАтоминформ. 1990. С. 36-40.
- [3] L i n J.J., C h e n T.M. // Physica B. 1990. V. 165-166. P. 1669-1670.
- [4] Справочник по физико-техническим основам криогеники / Ред. М.П. Малков. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
- [5] N i s h i o T., I t o h Y. et al. // J. Mater. Science. 1989. V. 24. N 9. P. 3228-3234.
- [6] О к а Т., О г а с а в а р а Ф. et al. // Japan. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. N 10. P. 1924-1931.
- [7] К и р и ч е н к о Ю.А., Р у с а н о в К.В., Т ю р и н а Е.Г. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 7. С. 1385-1409.
- [8] К о ж е в н и к о в И.Г., Н о в и ц к и й Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1982. 328 с.
- [9] Д у л ь н е в Г.Н., М а л а р е в В.И. // ИФЖ. 1990. Т. 59. № 3. С. 522-539.

Поступило в Редакцию
27 сентября 1991 г.