

05;4  
©1995ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВТСП*О.Г.Вендик, А.Ю.Попов, С.П.Зубко*

Экспериментальному определению зависимости глубины проникновения магнитного поля  $\lambda_L(T)$  в высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) посвящено большое количество работ [1-7]. Обычно полученные зависимости аппроксимируют в виде бинома

$$[\lambda_L(0)/\lambda_L(T)]^2 = 1 - (T/T_c)^\gamma, \quad (1)$$

где  $\lambda_L(0)$  — глубина проникновения при  $T \rightarrow 0$ ,  $T_c$  — температура перехода в сверхпроводящее состояние,  $\gamma$  — показатель степени. Оценки, сделанные по результатам эксперимента, дают значения  $\gamma$ , лежащие в диапазоне от 1 до 4.

Более точное знание  $\gamma$  представляет интерес для сопоставления различных теоретических моделей. В то же время знание  $\gamma$  дает возможность феноменологического описания зависимости  $\lambda_L(0)$ , которое необходимо при построении численных моделей, используемых в САПР СВЧ устройств на основе ВТСП материалов [8].

Простейшая теоретическая модель ВТСП, использующая идею локализованных бозонов (биполяронов), испытывающих Бозе-Эйнштейнскую конденсацию [9-11], дает  $\gamma = 1.5$ . Однако названная модель является грубой аппроксимацией и скорее может рассматриваться как феноменологическое описание, удобное в некоторых случаях для количественных оценок [12]. Более строгий подход к проблеме о природе ВТСП приводит к зависимости  $\lambda_L(T)$ , близкой к той, которая дается теорией БКШ. Однако большинство теоретических работ, опирающихся на представление об особенностях щели в ВТСП материалах (две щели [1], пики в щели [4], бесщелевая модель [7]) или на неоднородность или многофазность состава ВТСП [1], приходят к идее об описании зависимости  $\lambda_L(T)$  в виде (1).

Для определения параметров  $\gamma$ ,  $\lambda_L(T)$ ,  $T_c$  в выражении (1) на основе эксперимента составим сумму квадратов разностей, образованных значениями  $\lambda_L$ , измеренными при температуре  $T_i$  и вычисленными с помощью (1):

$$S(\lambda_L(0), T_c, \gamma) = \sum_{i=1}^N [1 - (\lambda_L(0)/\lambda_i) - (T_i/T_c)^\gamma]^{-2}, \quad (2)$$

где  $N$  — число экспериментальных точек. Набор параметров определяется из условия минимума  $S$ :

$$\partial S / \partial \lambda_L(0) = 0, \quad \partial S / \partial T_c = 0, \quad \partial S / \partial \gamma = 0,$$

что приводит к следующей системе уравнений:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^{-2} [1 - (\lambda_L(0)/\lambda_i)^2 - (T_i/T_c)^\gamma] = 0, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N T_i^\gamma [1 - (\lambda_L(0)/\lambda_i)^2 - (T_i/T_c)^\gamma] = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N T_i^\gamma \ln(T_i/T_c) [1 - (\lambda_L(0)/\lambda_i)^2 - (T_i/T_c)^\gamma] = 0. \quad (5)$$

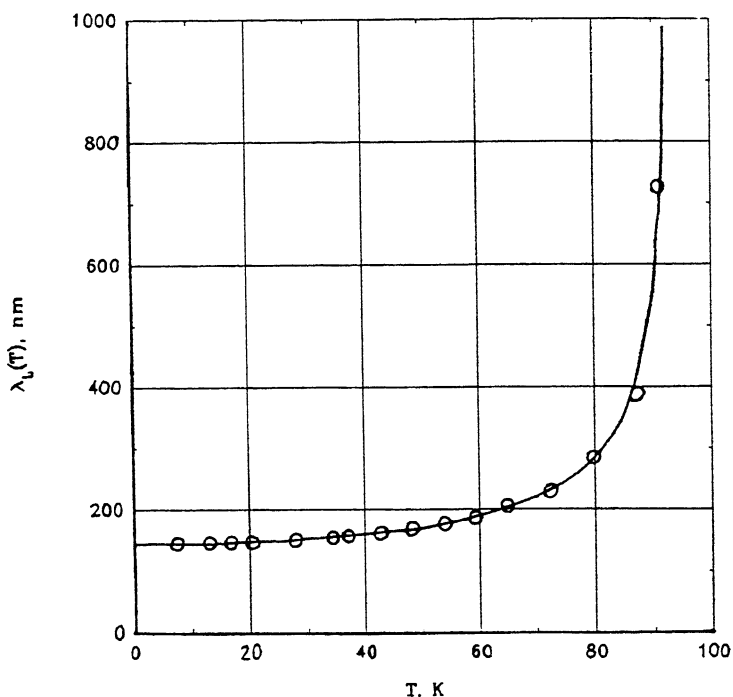
Система уравнений (3)–(5) легко решается на персональном компьютере при использовании программного обеспечения МСАД. Надежность полученной аппроксимации оценивается с помощью следующей суммы:

$$\delta = \frac{1}{\lambda_L(0)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \lambda_i - \lambda_L(0) [1 - (T_i/T_c)^\gamma]^{-1/2} \right\}^2}.$$

В качестве апробации предложенной методики описанный алгоритм был применен к традиционному низкотемпературному сверхпроводнику — свинцу, экспериментальные данные взяты из работы [13]. При этом получены следующие параметры:  $T_c = 7.198$  К,  $\lambda_L(0) = 48.1$  нм,  $\gamma = 4.204$ ,  $\delta = 0.06$ . Результаты обработки экспериментальных результатов относительно глубины проникновения в высокотемпературный сверхпроводник Y-Ba-Cu-O приведены в таблице.

Рис. 1 иллюстрирует совпадение экспериментальных точек [18] и функции  $\lambda_L(T)$ , построенной в соответствии с (1) и параметрами, взятыми из таблицы.

$\lambda_L(0)$ , нм	$T_c$ , К	$\gamma$	$\delta$	Эксперимент
134.8	89.4	2.05	0.039	[14]
219	88.5	1.68	0.063	[15]
261.7	69	1.454	0.348	[16]
147.7	91.4	2.08	0.298	[17]
144.7	93	2.004	0.102	[18]



Температурная зависимость глубины проникновения монокристаллического Y-Ba-Cu-O. Экспериментальные точки взяты из работы [18].

Экспериментально исследованные пленки Y-Ba-Cu-O можно разделить на две группы:

1) пленки высокого качества:  $\lambda_L(0) \leq 150$  нм,  $T_c \geq 89$  К;

2) пленки плохого качества:  $\lambda_L(0) > 150$  нм,  $T_c < 89$  К.

Такое разделение пленок по их качеству соответствует общепринятым оценкам [1-7]. На основании данных, приведенных в таблице, можно заключить, что феноменологическое описание зависимости глубины проникновения от температуры для пленок Y-Ba-Cu-O высокого качества может быть осуществлено при  $\gamma = 2.0$ . Для пленок низкого качества более адекватным является  $\gamma = 1.5$ . Экспериментальные данные для высококачественных в отношении структурных характеристик и остаточного сопротивления на СВЧ пленок Y-Ba-Cu-O позволили ранее заключить, что феноменологическое описание зависимости  $\lambda_L(T)$  более адекватно эксперименту при  $\gamma \cong 2.0$  [12]. Более сглаженная зависимость  $\lambda_L(T)$  для пленок низкого качества может быть объяснена размытием фазового перехода, связанного с неоднородностью фазового состава пленки.

## Список литературы

- [1] Klein N., Tellmann N., Schulz H., Urban K., Wolf S., Kresin V.Z. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N 20. P. 3355-3358.
- [2] Besley M.R. // Physica C. 1993. V. 209. P. 43-46.
- [3] Hirschfeld P.J., Goldfeld N. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. N 6. P. 4219-4222.
- [4] Hardy W.N., Bonn B.A., Morgan D.C., Liang R., Zhang K. // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. N 25. P. 3999-4002.
- [5] Dynes R.C. // Solid State Comm. 1994. V. 92. N 1/2. P. 53-62.
- [6] Ladret D., Cabon B., Chilo J., Xavier P., Richard J., Buisson C. J. de Physique IV. Colloque C6. 1994. P. C6211-C6216.
- [7] Gasparov V.A., Mkrtychyan M.R., Obolensky M.A., Bondarenko A.V. // Phys. C. 1994. V. 231. P. 197-206.
- [8] Vendik O.G., Kollberg E. // Microwave & RF. 1993. V. 32. N 7. P. 118-121.
- [9] Александров А.С. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Приложение. С. 128-131.
- [10] Вендик О.Г. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 12. С. 1098-1102.
- [11] Mott N.F. // Phil. Mag. Lett. 1990. V. 61. N 4. P. 217-221; 1990. V. 61. N 1. P. 37-40.
- [12] Vendik O.G., Popov A.Yu. Phil. Mag. Lett. 1993. V. 67. N 6. P. 833-845.
- [13] Gasparovic R.F., McLean W.L. // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. N 7. P. 2519-2526.
- [14] Pond J.M., Carroll K.R., Horwitz J.S., Chrisly D.B., Osolsky M.S., Cestone V.S. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 23. P. 3033-3035.
- [15] Lee Ju Yong, Lemberger T.R. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. N 19. P. 2419-2421.
- [16] Kisu T., Linuma T., Enpuku K., Yoshida K., Yamafuji K. // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. 1993. V. 3. N 1. P. 2961-2964.
- [17] Brorson S.D., Buhleier R., White J.O., Trofimov L.E., Harpermeier H.-U., Kuhl J. // Phys. Rev. B. 1993. V. 49. N 9. P. 6185-6187.
- [18] Bonn D.A., Liang R., Riseman T.M. et al. // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 17. P. 11314-11328.

Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет

Поступило в Редакцию  
24 апреля 1995 г.