

**ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ (Y, Ho) Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>**

Н.В.Аншукова, Г.П.Воробьев, А.И.Головашкин, О.М.Иваненко

З.А.Казей, И.Б.Крынецкий, Р.З.Левитин, Б.В.Миль,

К.В.Мицен, В.В.Снегирев

Проведены температурные измерения параметров кристаллической структуры, а также теплового расширения и модуля Юнга сверхпроводящих керамик на основе иттрия и гольмия. Обнаруженные аномалии в температурном поведении указанных характеристик связываются с упорядочением кислородных вакансий.

Для выяснения механизма сверхпроводимости в новом классе высокотемпературных сверхпроводящих керамик MBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (M = Y или редкоземельный ион) большое значение имеет выяснение взаимосвязи сверхпроводящих и структурных характеристик. В настоящей статье проведены как прямые низкотемпературные рентгенографические исследования кристаллической структуры, так и измерения структурно-чувствительных характеристик: теплового расширения  $\Delta L/L$ , модуля Юнга  $E$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$  сверхпроводящих керамик на основе Y и Ho.

Измерения проводились на рентгеновски однофазных образцах (фаза 1 – 2 – 3), полученных по керамической технологии <sup>1, 2</sup>. Температура сверхпроводящего перехода  $T_c$  составляла 93 – 95 К ширина перехода  $\Delta T_c \lesssim 2$  К. Измерения линейного расширения проводились тензометрическим методом <sup>3</sup>, измерения модуля Юнга и внутреннего трения – методом составного вибратора на частоте – 200 кГц <sup>4</sup>. Рентгеновские измерения проводились на дифрактометре "Гейгерфлекс" (Япония). Параметр решетки  $c$  определялся по изолированному рефлексу (0, 0, 11).

На рис. 1 приведены температурные зависимости теплового расширения и относительной величины модуля Юнга  $\Delta E/E_0$ ,  $\Delta E = E(T) - E_0$ ,  $E_0 = E(130$  К) керамик на основе иттрия и гольмия (а, б).

Из рис. 1а видно, что при  $T \sim T_c = 93$  К на зависимости  $\Delta L/L(T)$ , для YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> наблюдается отчетливо выраженная аномалия, заключающаяся в локальном (на интервале  $\sim 10$  К) уменьшении температурного коэффициента линейного расширения  $\alpha$  на величину  $\Delta\alpha \sim 6 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> [ $\alpha(90$  К)  $\approx$   $\alpha(100$  К)  $\approx 8 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>]. Аналогичная аномалия  $\Delta L/L$  при  $T \gtrsim T_c$  наблюдается и в образцах HoBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (рис. 1б). Оценка ожидаемого скачка  $\alpha$  при сверхпроводящем переходе из термодинамических соображений по формуле  $\Delta\alpha = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial T_c}{\partial p} \frac{\partial H_c}{\partial p} = \alpha_n - \alpha_s$  дает для YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> значение  $\Delta\alpha \sim 1,5 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup> (для

спленки использованы значения  $\partial T_c / \partial p = 0,45 \text{ К/ГПа}^5$  и  $\partial H_c / \partial T \sim 400 \text{ Э/К}^6$ ), что значительно меньше величины наблюдаемой аномалии.

На температурной зависимости  $\Delta E/E_0$  рассмотренной особенности соответствует интервал аномального возрастания модуля Юнга ( $\Delta E/E_0 \sim (2-5) \cdot 10^{-3}$ ). В этой же температурной области (90–120 К) наблюдается и максимум внутреннего трения  $Q^{-1}$  (рис. 2). В низкотемпературной области (при 40 К для  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  и при 60 К для  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  имеет место еще более резкая аномалия теплового расширения, проявляющаяся также в виде излома на температурной зависимости  $\Delta E/E_0$ . Следует отметить, что величины всех наблюдаемых аномалий менялись от образца к образцу и были минимальными для  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

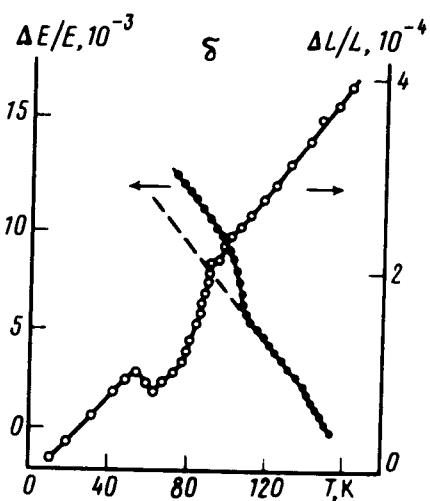
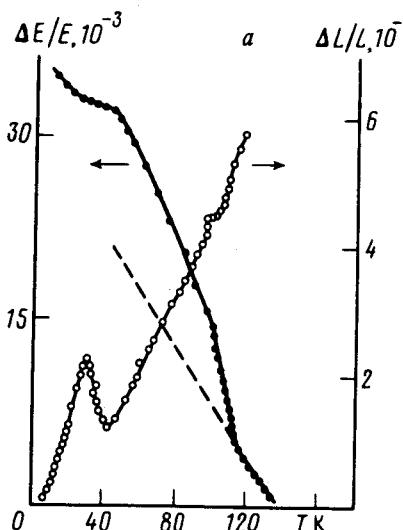


Рис. 1. Температурные зависимости теплового расширения  $\Delta L/L$  и модуля Юнга  $\Delta E/E$ : а –  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ; б –  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

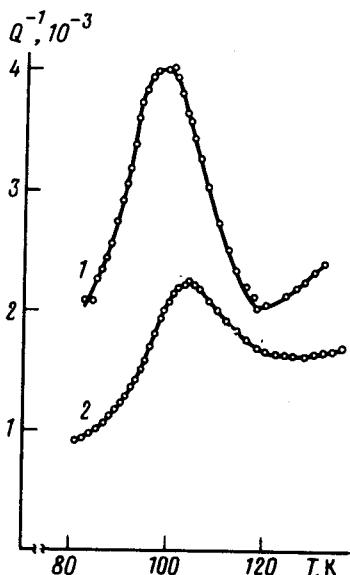


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента внутреннего трения  $Q^{-1}$ : кривая 1 –  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ; кривая 2 –  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

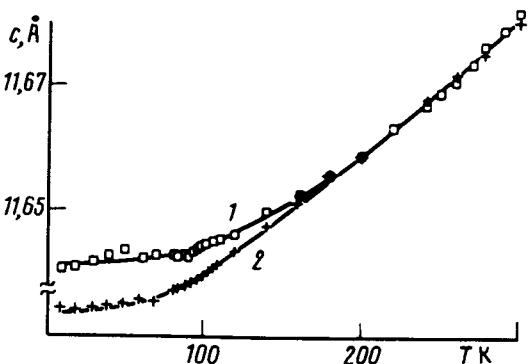


Рис. 3. Температурная зависимость параметра  $c$  решетки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ : кривая 1 – измерения в атмосфере кислорода; кривая 2 – измерения в вакууме при  $p \sim 10^{-2} \text{ мм рт.ст.}$

Низкотемпературные рентгеноструктурные исследования, проведенные на порошкообразных образцах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , показали, что отмеченные аномалии проявляются и на температурной зависимости параметра решетки  $c(T)$  (рис.3, кривая 1). Установлено, однако, что на эту зависимость существенно влияют условия эксперимента. При охлаждении в атмосфере  $\text{O}_2$  (кривая 1)  $c(T)$  приблизительно следует дебаевской зависимости с температурой Дебая  $\Theta_1 = 560$  К. При длительной выдержке и охлаждении в вакууме  $10^{-2}$  мм рт. ст. (что, по-видимому, приводит к уменьшению количества кислорода в образце) низкотемпературные аномалии исчезают и во всем исследованном интервале  $c(T)$  следует дебаевской зависимости со значительно меньшей температурой Дебая  $\Theta_2 = 310$  К. Эти результаты указывают на существенное влияние содержания кислорода в образце на динамику решетки.

Наблюдаемые в настоящей работе аномалии теплового расширения и упругих характеристик (по крайней мере в области  $90 - 110$  К) связаны, по нашему мнению, с процессом упорядочения кислородных вакансий и образованием непрерывных линейных цепочек  $\text{Cu} - \text{O}$ , вдоль которых осуществляется проводимость. При  $T \leq 110$  К, по-видимому, кислород уходит из позиций, несоответствующих упорядоченной структуре  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , и заполняет вакансии вдоль цепочек  $\text{Cu} - \text{O}$ . "Связывание" первоначально разорванных кусков цепочек может приводить к формированию более интенсивного эффективного фононного спектра  $a^2F(\omega)$  и усилинию электрон-фононного взаимодействия для электронов, движущихся вдоль этих цепочек. Для лантановой керамики сильное обострение структуры фононного спектра при понижении температуры обнаружено на эксперименте<sup>7</sup>, хотя в этом случае упорядочение кислорода идет не в цепочках, а в плоскостях  $\text{Cu} - \text{O}$ . Процесс упорядочения может являться причиной наблюдаемых аномалий тепловых упругих и структурных характеристик, а также приводить к сильному электрон-фононному взаимодействию, обуславливающему высокотемпературную сверхпроводимость.

#### Литература

1. Cava R.J., van Dover R.B., Batlogg B., Rietman E.A. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 408.
2. Chu C.W., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang L.J., Wang Y.O. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 405.
3. Баженова Н.В., Илюшин А.С., Кадомцева А.М., Крынецкий И.Б., Лукьянов Е.Н., Уманский М.М. Кристаллография, 1976, 21, 339.
4. Quimby S. Phys. Rev., 1932, 33, 345.
5. Okai B., Takahashi K., Ohta M. Jpn. J. Appl. Phys., 1987, 26, L820.
6. Worthington T.K., Gallagher W.J., Denger T.R. Preprint of IBM T.J. Watson Research Center, USA, 1987.
7. Renker B., Gompf F., Gering E., Nücker N., Ewert D., Reichardt W., Rietschel H. Preprint, Kernforschungszentrum Karlsruhe, (F.R.G.), 1987.

Физический институт им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию

29 сентября 1987 г.