

## «Температурное эхо» от сверхпроводящего фазового перехода в теплоемкости $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$

В.Н. Наумов<sup>а)</sup>, Г.И. Фролова<sup>а)</sup>, Т. Атаке<sup>б)</sup>

<sup>а)</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>б)</sup>Лаборатория материалов и структур, Токийский институт технологии 4259, Иокогама 226-8503, Япония

Температурная зависимость теплоемкости  $C_p(T)$  образца  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  была исследована выше  $T_c$  с целью выявления аномальных вкладов. Для выделения аномальной компоненты  $\delta C(T)$  в теплоемкости  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  использовалась измеренная теплоемкость другого образца  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ , который был синтезирован идентичным образом, и отличался только режимом отжига. Выделенная компонента  $\delta C(T)$  имеет сверхпроводящую аномалию ( $T_c$ ) и еще одну аномалию ( $T_h$ ) в интервале 250-290 К. Между  $T_c$  и  $T_h$  наблюдается корреляция: отношение  $T_h/T_c$  близко к трем. Основываясь на полученных результатах, аномалию  $T_h$  можно рассматривать как "температурное эхо" от сверхпроводящего фазового перехода.

По-прежнему важным является изучение особенностей в области нормального состояния купратных систем, где многими экспериментами обнаружено псевдощелевое явление, которое сопровождается понижением плотности состояний электронов и наблюдается значительно выше температуры сверхпроводящего перехода. Сейчас неясно, является ли псевдощелевая линия только кроссовером [1,2] или она сопровождается скрытым спонтанным изменением симметрии параметра порядка [3-6]. В работах [7-9] сообщалось об аномалии ( $T_h$ ) в теплоемкости сверхпроводников  $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  (где R - Y, Tm, Gd, Nd), которая локализована в температурной области нормального состояния и напоминает фазовый переход. Было замечено [9], что для образца в пределах 90-градусного плато с изменением  $T_c$ , также изменяется и  $T_h$ , при этом отношение  $T_h/T_c$  остается близким к трем. Корреляция  $T_h$  и  $T_c$  указывает на связь между процессом  $T_h$  и сверхпроводимостью. В работе [9] такая взаимосвязь между процессом  $T_h$  и процессом  $T_c$  называется «температурным эхом». В данной работе мы представляем исследование теплоемкости образца  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ , в котором также обнаруживается отмеченное выше явление.

Образец  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  приготовлен из реагентов высокой чистоты методом прокаливания порошков по стандартной технологии. Продукт был идентифицирован методом рентгеновской дифракции, который показал отсутствие других (не орторомбических) фаз. Содержание кислорода было определено иодометрическим титрованием. Состав образца соответствует формуле

$\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ . Теплоемкость  $C_p(T)$  образца  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  была измерена в интервале 8-300 К. Для выделения компоненты  $\delta C(T)$ , из теплоемкости  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$  был вычтен регулярный фон. В качестве регулярного фона мы использована теплоемкость другого образца  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ . Этот образец был синтезирован тем же способом и отличался только режимом отжига. Измерение было выполнено в том же калориметре с одинаковыми условиями проведения эксперимента в интервале 8-300 К. В теплоемкости этого образца не наблюдалось каких-либо аномалий. Следует отметить, что такой способ выделения аномальной компоненты практически исключает экспериментальные систематические погрешности. Установка и методика измерений описана в работе [10].

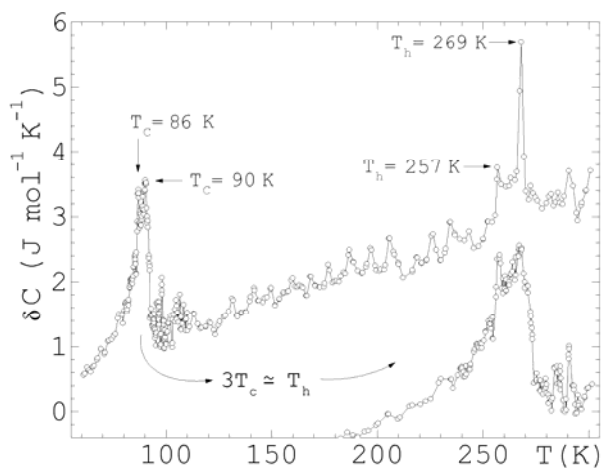


Рис. 1.

Полученная таким способом разность  $\delta C(T)$  представлена на Рис.1. Образец  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$ , как видно из рисунка, имеет особенность: его сверхпроводящая аномалия расщеплена на два пика (с  $T_c=86$  К и  $T_c=90$  К в максимумах). Кроме сверхпроводящей аномалии имеется еще двухпиковая аномалия в области нормального состояния (аномалия  $T_h$  с  $T_h=257$  К и  $T_h=269$  К в максимумах), причем отношение  $T_h/T_c$  с хорошей точностью равно 3 для обоих пиков.

В приведенном примере аномалия  $T_h$  предстает как своеобразное «температурное эхо» от сверхпроводящего фазового перехода. Полученные результаты подтверждают предположение,

высказанное в работе [9]. Наблюдаемая в данной работе (как и ранее в [9]) корреляция между сверхпроводящей аномалией и аномалией  $T_h$  может быть указанием на некоторый процесс, который происходит при температуре  $T_h \approx 3T_c$  и имеет отношение к явлению сверхпроводимости. Можно полагать, что  $T_h$  процесс связан с зарождением сверхпроводимости.

Наличие  $T_h$  - процесса в соединениях системы (R)BaCuO подтверждается аномалиями в других физических свойствах. Например, температурная зависимость производной электросопротивления  $\rho'(T)/\rho'(200 \text{ K})$  образца  $YBa_2Cu_3O_{6.85 \pm 0.03}$  ( $T_c = 92.7 \text{ K}$ ) показывает резкое изменение этой зависимости именно в температурной области 260-300 K (см. [7]). При исследовании скорости ультразвука в сверхпроводнике  $GdBaSrCu_3O_{7-x}$  ( $T_c = 82 \text{ K}$ ) наблюдалась ступенчатая аномалия при температуре 245 K [11], указывающая на изменение жесткости решетки. Результаты прецизионных измерений коэффициента теплового расширения  $\alpha(T)$  сверхпроводящих монокристаллов  $YBa_2Cu_3O_{6.95}$  ( $T_c=93 \text{ K}$ ) в интервале 5-500 K для трех орторомбических осей приведены в работе [12]. В зависимости  $\alpha(T)$  наблюдаются аномалии, как при температуре сверхпроводящего перехода, так и при температуре  $T_g = 280 \text{ K}$ . Для обеих аномалий (при  $T_c$  и  $T_g \approx 3T_c$ ) наблюдаются одинаковые амплитуды изменения  $\alpha(T)$  (по осям  $a$  и  $b$ ). Это прямое свидетельство изменения фоннных характеристик. Анализ особенностей температурного поведения упругих свойств [11] и коэффициента теплового расширения [12] в купратных сверхпроводниках, сделанный в работе [13] показывает, что наблюдаемые особенности, скорее всего, обусловлены формированием зарядового упорядочения. Сейчас считается установленным [14,15], что электрон-фононная связь в купратных сверхпроводниках является сильной. В этих условиях какое-либо изменение электронной структуры неизбежно должно приводить к изменению фоннных характеристик. Таким образом, наши результаты и результаты отмеченных выше работ не вступают в противоречие, а наоборот подтверждают существование сильных коллективных эффектов взаимодействия элементарных возбуждений в этих объектах.

Если аномалию  $T_h$  (подобно аномалии  $T_c$ ), можно отнести к электронной подсистеме, и связывать ее с флуктуационным зарождением сверхпроводимости, то процесс  $T_h$  должен отражать возникновение псевдощели  $\Delta_p$  в электронной плотности (индекс  $p$  – здесь от слова pairing). В этом случае изменение электронной плотности (она пропорциональна постоянной Зоммерфельда  $\gamma$ ), определяется величиной  $\Delta\gamma = \Delta S/T_h$  (где  $\Delta S$  – энтропия аномалии  $T_h$ ), которая в лучшем случае

составляет всего несколько процентов от величины  $\gamma$ . Это изменение  $\gamma$  значительно меньше, чем изменение  $\gamma$  при  $T_c$ .

Таким образом, в теплоемкости  $HoBa_2Cu_3O_{6.95}$  обнаружена аномалия  $T_h$ . Аномалия выглядит как фазовый переход. Форма аномалии  $T_h$  повторяет форму аномалии  $T_c$ . Температура аномалии  $T_h$  коррелирует с  $T_c$ , так что выполняется соотношение  $T_h = 3 T_c$ .

Наличие  $T_h$  процесса в соединениях (R)BCO<sub>x</sub> подтверждается особенностями в других свойствах, при этом корреляция между температурами  $T_c$  и  $T_h$  также наблюдается.

Оба процесса  $T_c$  и  $T_h$  приводят к изменению, как электронных, так и фоннных характеристик. Это еще одно свидетельство их родства и может быть объяснено сильным электрон-фононным взаимодействием в этих системах. Отмеченные свойства позволяют назвать  $T_h$  процесс “температурным эхом” от сверхпроводящего фазового перехода.

Взаимосвязь  $T_h$  и  $T_c$  процессов наводит на мысль, что явление при  $T_c$  и явление при  $T_h$  – родственны и они оба связаны со сверхпроводимостью. При этом  $T_h$  – процесс можно интерпретировать как зарождение спаренных носителей заряда. Понижение плотности электронных состояний при этом процессе можно связать со сверхпроводящей псевдощелью  $\Delta_p$ . Таким образом, обнаруженное нами явление, возможно, является термодинамическим свидетельством существования сверхпроводящей псевдощели, возникающей при температуре  $\sim 3 T_c$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 03-03-32446а)

1. Randeria, M., Trivedi, N., Moreo, A., Scalettar, R. T. Phys. Rev. Lett. **69**, 2001 (1992).
2. Emery, V. J., Kivelson, S. A. Nature **374**, 434 (1995).
3. Varma, C. M. Phys. Rev. Lett. **83**, 3538 (1999).
4. Chakravarty, S., Laughlin, R.B., Morr, D. K., Nayak, C. Phys. Rev. **B63**, 094503 (2001).
5. Ivanov, D. A., Lee, P. A., Wen, X.-G. Phys. Rev. Lett. **84**, 3958 (2000).
6. A. Kaminski, S. Rosenkranz, H. M. Fretwell et al., Nature **416**, 610 (2002).
7. V.V.Nogteva, V.N.Naumov, A.N.Lavrov. Russian Journal of Physical Chemistry. **72** (1998) 1629.
8. V.N. Naumov, G.I. Frolova, V.V. Nogteva, N.I. Matskevich, R.W. McCallum. Chemistry for Sustainable Development **8** (2000) 143.
9. V.N. Naumov, A.I. Romanenko, G.I. Frolova, V.V. Nogteva, O.B. Anikeeva, T. Atake. Physica C, **388** (2003) 359.
10. T. Atake, H. Kawaji, A. Hamono and Y. Saito. Report Res. Lab. Eng. Mater., Tokyo Inst. Technol., **15**, 13-23 (1990).
11. Ahmad Kamal Yahya, A.K. Koh, R. Abd-Shukor. Physics Letters **A 259** 1999 295–301.
12. P. Nagel, V. Pasler, C. Meingast, A.I. Rykov, S. Tajima. Phys. Rev. Lett. **85**, 2376 (2000).
13. V. E. Gusakov, Cond-mat/0204408.
14. E.G. Maksimov. Physics Uspekhi **43** (2000) 965.
15. V.M. Loktev, R.M. Quick, S.G. Sharapov. Physics Reports **349** (2001) 1-123.