

очевидно, что при выборе $\Phi_n = \text{const } \epsilon_{св}$ обращается в нуль, т. е. волновая функция (4) описывает в этом случае две невзаимодействующие дырки.

При минимизации выражения (5) по вариационным параметрам Φ_m будем предполагать, что их величины зависят только от числа шагов k , необходимых для перескока с блока 0 на блок m . В предположении экспоненциальной зависимости Φ_m от k оценка для $\epsilon_{св}$ и радиуса пары k_0 в линейном приближении по t приводит к значениям $\epsilon_{св} \approx 0.1 t$, $k_0 \approx 2$. При характерных значениях $t \sim 1$ эВ получаем $\epsilon_{св} \sim 10^3$ К (учет членов $\sim at$ только увеличивает энергию связи). Однако само существование пар обусловлено основным состоянием (1), которое разрушается при температуре $\sim t^2/U$. Напомним, что эту температуру не следует отождествлять с температурой сверхтекучего (сверхпроводящего) перехода, определяемой Бозе-конденсацией пар и пропорциональной их концентрации.

Таким образом, проведенное вариационное рассмотрение показывает, что возникающим на фоне RVB состояния (1) двум дыркам энергетически выгодно связаться в синглетную пару с зарядом $2e$. С Бозе-конденсацией таких пар связана возможность существования сверхпроводимости в рассмотренной модели [4]. В заключение отметим, что в одномерном случае аналогичное рассмотрение приводит к нулевой энергии связи пары, а в квазидномерном (две параллельные цепочки) энергия связи отлична от нуля.

Л и т е р а т у р а

- [1] Hubbard J. Proc. Roy. Soc. (A), 1963, vol. 276, N 1365, p. 238—257; 1965, vol. 285, N 1403, p. 542—560.
- [2] Emery V. J. Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 58, N 26, p. 2794—2797.
- [3] Hirsh J. E. Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 58, N 2, p. 228—231.
- [4] Anderson P. W., Baskaran G., Zou Z., Hsu T. Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 58, N 26, p. 2790—2793.
- [5] Kivelson S., Rokhsar D., Sethna J. Phys. Rev., 1987, vol. B35, N 16, p. 8865—8868.
- [6] Fazekas P., Anderson P. W. Phil. Mag., 1974, vol. 30, N 2, p. 423—440.
- [7] Покровский В. Л., Уймин Г. В. ЖЭТФ, 1971, т. 61, № 2, с. 859—869.
- [8] Барабанов А. Ф., Михеенков А. В. ФТТ, 1986, т. 28, № 4, с. 998—1004.
- [9] Luther A., Peschel J. Phys. Rev., 1975, vol. B12, N 9, p. 3908—3917.
- [10] Зайцев Р. О., Кузьмин Е. В., Овчинников С. Г. УФН, 1986, т. 148, № 4, с. 603—636.

Институт физики высоких давлений
им. Л. Ф. Верещагина АН СССР
Троицк
Московская область

Поступило в Редакцию
12 октября 1987 г.
В окончательной редакции
16 февраля 1988 г.

ВЛИЯНИЕ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПЕРЕХОДА T_c ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ЭКСПОЗИЦИИ ЕГО В ПАРАХ АЗОТА

А. И. Головашкин, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич,
Л. М. Полухина

Одним из основных вопросов, связанных с применением новых высокотемпературных сверхпроводников, является вопрос об их стабильности. В литературе приводился целый ряд примеров нестабильности указанных сверхпроводников, возникающей при воздействии различных реагентов или температуры.

В данной работе мы исследовали нестабильность, связанную с экспозицией сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в парах азота при разных температурах.

Для исследований использовались керамические образцы, полученные методом порошковой твердофазной реакции. Исходными материалами для приготовления образцов являлись порошки Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO . Смесь состояла из частиц микронных размеров. Технология приготовления образцов, включающая предварительный отжиг, спекание, прессование и окончательную термообработку в атмосфере O_2 , изложена в [1].

Измерение зависимости сопротивления от температуры $R(T)$ проводилось четырехконтактным методом.

Для повышения точности определения изменений температуры T_c и ширины ΔT_c перехода в сверхпроводящее состояние образцов использовалась производная dR/dT . Точность измерения приращения температуры ΔT при измерении сверхпроводящего перехода составляла 0.005 К, а точность измерения температуры — 0.1 К. Точность относительного

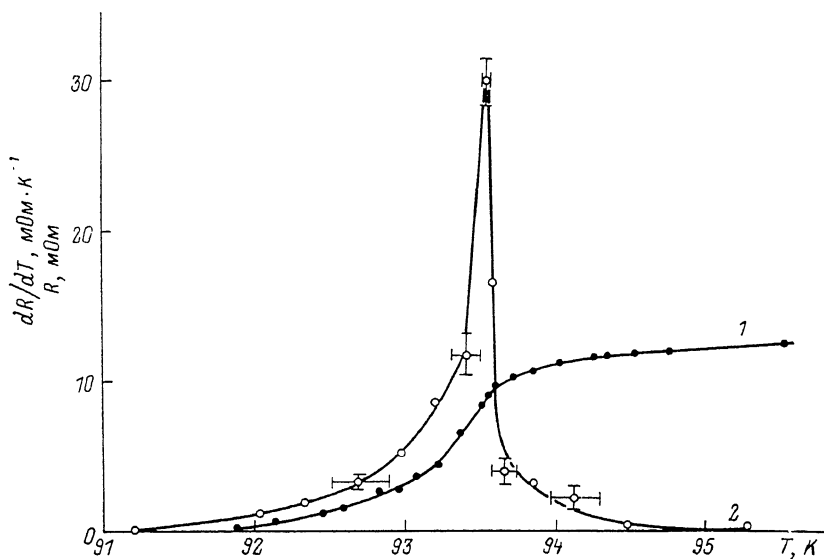


Рис. 1. Зависимость $R(T)$ (1) и dR/dT (2) от T для образца № 1. (Указаны ошибки).

измерения сопротивления образца $\Delta R/R$ при использовании цифрового вольтметра Ш300 составляла 0.001 (при $R \approx 0.01$ Ом). Измерительный ток был 5–10 мА.

Использование нами производной dR/dT для определения характеристик перехода связано с возможной неоднозначностью такого определения по принятой методике (T_c — по середине перехода, ΔT_c — по 10–90 % от величины R перед переходом). Это особенно относится к новым высокотемпературным сверхпроводникам. Известно, что в магнитном поле при изменении концентрации кислорода в образце при введении примесей в них меняется даже форма перехода. В этом случае нам кажется естественным за T_c принимать температуру, соответствующую максимуму производной dR/dT , а за ширину — полуширину кривой dR/dT от T . В случае резкого перехода оба определения T_c практически совпадают; что касается ΔT_c , то наш метод дает температурную ширину для наиболее резкой части перехода, которая меньше, чем в обычном методе, частично включающем «хвосты».

В исследованных образцах отношение сопротивлений при комнатной температуре и перед переходом $R_x/R_0 \approx 2.0$. Плотность образцов 3.8 г/см³.

Изучение влияния экспозиции в парах азота разной температуры на T_c проводилось для двух образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Образцы № 1 и 2 были изготовлены в одном технологическом цикле из одной партии порошка. С целью исключить влияние факторов, приводящих к относительно быстрым изменениям свойств, образцы выдерживались в течение трех месяцев при комнатной температуре. Условия их хранения отличались.

Образец № 1 хранился в герметическом объеме без доступа CO_2 и паров воды, а образец № 2 — на воздухе. Величина T_c образца № 1 оказалась равной 93.2 К и была на 0.7 К выше, чем T_c образца № 2. На рис. 1 приведены зависимости $R(T)$ и dR/dT от T для образца № 1. Точность определения T_c по положению максимума dR/dT определялась величиной шага при изменении температуры и составляла 0.02 К.

Пребывание образцов в парах азота изменяло их T_c и форму зависимости $R(T)$ в районе перехода. Эти изменения для образца № 1 были больше, чем для образца № 2. Для образца № 1 они иллюстрируются на рис. 2.

После первого измерения T_c (кривая 1 на рис. 2) образец № 1 находился в парах азота при температуре $T_n \approx 200$ К в течение 2 ч. При этом

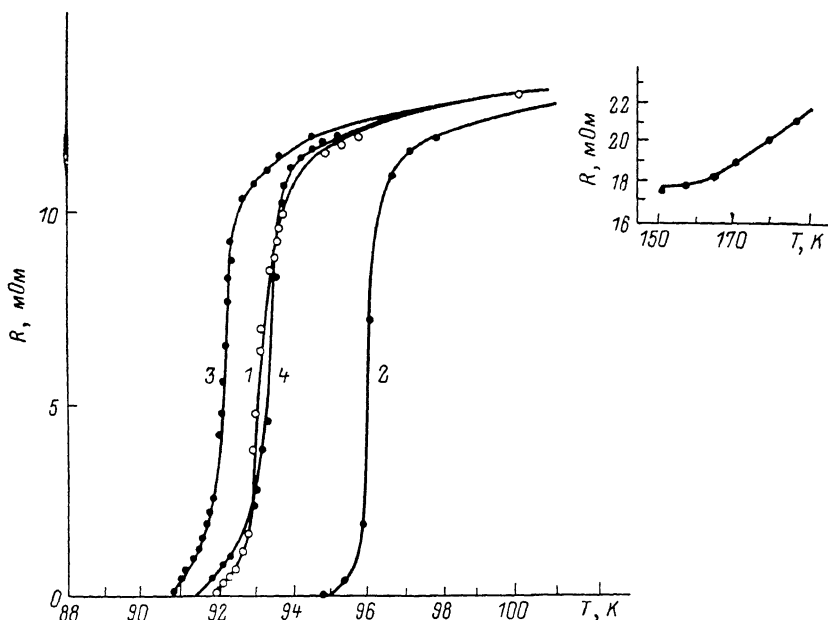


Рис. 2. Влияние температуры T_n паров азота на зависимость $R(T)$ в области фазового перехода в сверхпроводящее состояние для образца № 1.

температура перехода возросла до $T_c = 96.0$ К (кривая 2). Дальнейшее хранение образца в течение трех суток при $T_n = 89$ К плюс 15 ч при $T_n = 140$ К привело к понижению T_c до 92.2 К (кривая 3). Выдержка образца еще в течение двух суток при $T_n = 110$ К дополнительно понизила T_c до 91.9 К. После этого образец № 1 вновь был отогрет до $T_n \approx 200$ К и хранился в парах азота в течение четырех суток при $T_n = 210 \div 230$ К. Это привело к повышению T_c до 93.6 К (кривая 4). Дальнейшее пребывание в парах азота при $T_n = 180 \div 210$ К в течение 20 ч практически не изменило T_c .

На образце № 2 наблюдалась такая же закономерность, что и на образце № 1, однако диапазон изменений T_c был меньше. Выдержка образца № 2 в парах азота при $T_n = 110 \div 150$ К в течение 2.5 суток привела к небольшому понижению T_c с 92.5 до 92.1 К. Нагрев образца до $T_n \approx 180$ К (1 ч) повысил T_c до 92.7 К.

Нами наблюдался гистерезис в зависимости $R(T)$ образцов. Максимальное изменение температуры перехода при нагревании и охлаждении составляло 1.7 К для образца № 2 и 0.9 К для образца № 1. Площадь образца № 2 была в три раза больше площади образца № 1. Приведенные в данной работе T_c относятся к переходу из сверхпроводящего в нормальное состояние.

Таким образом, выдержка в парах азота при температурах вблизи 200 К приводила к небольшому, но заметному повышению T_c . Этот ре-

зультат согласуется с результатом работы [2], в которой наблюдалось повышение T_c до 110 К при экспозиции образца $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при температуре $T_{cr} \approx 239$ К.

Для образца № 1 наблюдалась дополнительная особенность в зависимости $R(T)$ при $T \approx 165$ К (вставка к рис. 2). Величина dR/dT при этом имела минимум при $T \approx 150$ К. Наличие такой особенности в $R(T)$ указывает на структурные изменения в системе (например, на возможное упорядочение вакансий кислорода при его критической температуре $T_{cr} \sim 155$ К), которые в свою очередь могут влиять на изменения T_c образца.

Гистерезис, наблюдавшийся нами при измерении $R(T)$, может быть связан, например, с явлениями переохлаждения и перегрева при конденсации кислорода в решетке $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Образец № 1 является более совершенным (судя по T_c), и эти явления в нем ослаблены. Хотя образец № 2 был примерно в три раза больше образца № 1, трудно объяснить наличие гистерезиса перегревом и переохлаждением образца относительно термометра. Образцы находились в тесном контакте с термометром в массивном медном стакане, измерение одного перехода занимало 1–2 ч. Другим возможным объяснением мог бы быть захваченный магнитный поток.

Следует отметить, что в работе [3] наблюдался гистерезис аномалий в температурной зависимости параметров решетки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в районе T_c , достигавший 5 К.

Таким образом, нами наблюдался эффект увеличения T_c при нагревании образцов в парах азота при $T > 155$ К. Эффект связывается нами с образованием аномальной структуры кислородных вакансий в $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [1]. Определенную роль при этом может играть и внедрение атомов азота в решетку керамического окисла.

В данной работе нами предложен метод определения T_c и ΔT_c , основанный на функциональной зависимости $R(T)$ в области перехода. Мы применили его при исследовании влияния паров азота на стабильность образцов. Метод повышает относительную точность при изучении небольших изменений характеристик перехода, но его целесообразно применять и в других случаях, например при изучении влияния различных факторов на переход: измерительной частоты или магнитного поля. Для высокотемпературных сверхпроводников это особенно актуально.

Выражаем благодарность К. В. Мицену за изготовление образцов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Головашкин А. И., Иваненко О. М., Мицен К. В., Храменков Н. Е. Препринт ФИАН, № 298. М., 1987. 11 с.
- [2] Bhargava R. N., Herko S. P., Osborne W. N. Phys. Rev. Lett., 1987, vol. 59, N 13, p. 1468–1471.
- [3] Головашкин А. И., Иваненко О. М., Лейтус Г. И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 8, с. 325–327.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
17 февраля 1988 г.