АНИЗОТРОПИЯ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ТРАНСПОРТА В МОНОКРИСТАЛАХ $HOBA_2CU_3O_{7-\Delta}$.

Вовк Р.В., Оболенский М.А., Завгородний А.А., Бондаренко А.В.

Харьковский национальный университет им. Каразина В.Н., г.Харьков

Измерены температурные зависимости продольной и поперечной проводимости монокристаллов $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с различным содержанием кислорода. Обнаружено, что, в отличие от монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, анизотропия нормального электросопротивления $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ хорошо описывается посредством универсального «закона ½» для термоактивационной прыжковой проводимости.

Как известно, общей особенностью высокотемпературных сверхпроводящих соединений (ВТСП) является ярко выраженная слоистая структура, приводящая к существенной анизотропии целого ряда физических свойств, в частности, электропроводности [1-3]. Так, например, для соединения вида $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ существует принципиальное отличие в поведении температурных зависимостей электросопротивления измеренных в направлении базисной ab-плоскости $\rho_{ab}(T)$ и вдоль оси с $\rho_c(T)$. В то время как даже малое отклонение от стехиометрии по кислороду приводит к переходу от металлического поведения кривых $\rho_c(T)$ к зависимостям с характерным термоактивационным прогибом, в базисной плоскости, на зависимостях $\rho_{ab}(T)$ даже при значительном дефиците кислорода $\delta>0.5$, в области относительно высоких температур сохраняется достаточно широкий линейный участок, свидетельствующий о стабильности интенсивности рассеяния нормальных носителей [4]. Несмотря на значительное число работ посвященных изучению продольного и поперечного транспорта в системе 1-2-3, многие аспекты этого вопроса остаются до сих пор окончательно невыясненными. Так, например, в теоретической работе [5] был предложен механизм резонансного тунеллирования носителей заряда между проводящими CuO_2 - плоскостями через локализованные состояния в CuO – цепочках. Согласно [5], температурная зависимость анизотропии электросопротивления $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ должна описываться соотношением:

$$\rho_c / \rho_{ab} \sim T \cosh^2(T_0 / T), \qquad (1)$$

где T_0 – некоторая энергия активации процесса. Экспериментальная проверка этой модели была проведена в [3] на монокристаллических образцах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. При этом, однако, было показано, что хотя теория [5] качественно согласуется с экспериментом, наилучшее описание экспериментальных данных получается для экспоненциальной зависимости вида:

$$\rho_c / \rho_{ab} \sim \exp(\Delta / T) \qquad (2)$$

Подобное выражение было обосновано ранее в теоретической модели [6], предполагающей поляронный механизм осуществления поперечного транспорта в ВТСП.

Характерной особенностью соединения $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ является относительная простота полной или частичной замены Y его изоэлектронными аналогами, что дает нам возможность варьирования проводящих характеристик, и тем самым, проверки адекватности тех или иных теоретических моделей. Учитывая вышесказанное, в настоящей работе было проведено исследование продольной и поперечной проводимости монокристаллических образцов системы 1-2-3 при замене иттрия на гольмий.

Методика получения монокристаллических образцов $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и проведения резистивных измерений приведена в [1,2]. Понижение содержания кислорода приводит к увеличению удельного электросопротивления, понижению T_c и переходу от металлического поведения кривых $\rho_c(T)$ к зависимостям с характерным полупроводниковым прогибом. При этом высота максимума, предшествующего сверхпроводящему переходу на зависимости

$\rho_c(T)/\rho_c(300)$ возрастает в 4-5 раз. Существует принципиальное отличие в поведении зависимостей $\rho_{ab}(T)$ от измеренных перпендикулярно базисной плоскости. В то время как отклонение от стехиометрии по кислороду приводит к переходу от металлического к полупроводниковому ходу кривых $\rho_c(T)$, в базисной плоскости, на зависимостях $\rho_{ab}(T)$ в области относительно высоких температур сохраняется достаточно широкий линейный участок, что, согласно теории NAFL [4], служит достоверным признаком нормального состояния системы. При понижении температуры ниже некоторого характерного значения T* происходит отклонение $\rho_{ab}(T)$ от линейной зависимости, что свидетельствует о появлении некоторой избыточной проводимости, обусловленной переходом к псевдощелевому режиму [2].

Понижение содержания кислорода приводит к значительному росту абсолютной величины анизотропии ρ_c/ρ_{ab}. При этом, как следует из полученных результатов, хотя уравнение (2) и позволяет качественно описать экспериментальную зависимость $\rho_c/\rho_{ab}(T)$ в области относительно высоких температур, но делает это заметно хуже, чем соотношение

$$\rho_c / \rho_{ab} = BT \exp(T_o / T)^{1/2} \qquad (3)$$

для прыжковой проводимости. Здесь B, T_0 – константы. Как известно, соотношение (3) характерно для прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка – «закон 1/2» [8,9]. Из теории известно, что закон ½ обычно трактуется как проявление кулоновской щели в энергетическом спектре носителей, более характерном для полупроводниковых соединений [8]. С другой стороны, как было показано в работе [9] соотношение (3) носит гораздо более универсальный характер, и может выполняться для широкого класса проводящих соединений при достаточно большой степени структурного разупорядочения. В частности, подобная ситуация реализуется для случая гранулированных металлов (нанокомпозитов) – совокупности малых металлических гранул в диэлектрической матрице [9]. В то же время хорошо известно, что допирование ВТСП-купратов путем иновалентного замещения либо изменение содержания кислорода, приводит к распаду системы на электронейтральные области двух типов - металлические, с высокой концентрацией носителей, и диэлектрические [10]. При этом вид доменов может "навязываться" и упорядочивающимися допантами. Очевидно, что при достаточно малом размере включений с металлической проводимостью система может приобретать признаки характерные для гранулированных металлов. В нашем случае, видимо, определенную роль на структурный порядок в системе играет замена иттрия на гольмий, имеющий гораздо больший ионный радиус, что, в свою очередь, приводит к изменению взаимодействия ионов кислорода в плоскостях CuOx. Действительно, как известно из литературы [11], при замене иттрия на другие редкоземельные элементы с большим ионным радиусом происходят значительные качественные изменения в зависимостях Tc(δ). При этом характерная для $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ зависимость Tc(δ) с двумя плато при 60 и 90К вырождается в гораздо более резкую монотонную зависимость, а орто-II структура не реализуется вообще [11]. Таким образом, можно предположить, что в случае отклонения от стехиометрии по кислороду соединение $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ должно характеризоваться гораздо более разупорядоченной кислородной сверхструктурой по сравнению с $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Следует также отметить, что для кривых с пониженной $T_c \approx 70$К при температурах вблизи 125 К наблюдается изменение угла наклона более чем в два раза, что, в свою очередь, свидетельствует об уменьшении энергии активации, и отражает наличие фазовых переходов, наблюдавшихся раннее в работе [1] для монокристаллов YBaCuO. Согласно [1], переходы такого типа оказывают влияние на кинетику переноса заряда. Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных дает основания предположить, что понижение содержания кислорода в соединении $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ приводит к возникновению локализации носителей в направлении оси c и изменению межслойного взаимодействия. При этом

температурная зависимость анизотропии электросопротивления $\rho_c/\rho_{ab}(T)$, в отличие от $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, хорошо описывается посредством универсального закона ½ для термоактивационной прыжковой проводимости.

Список литературы.

1. *М.А.Оболенский и др.*, ФНТ, т.16, №9, 1103 (1990).
2. *M.A.Obolenskii, R.V.Vovk, A.V.Bondarenko, and N.N.Chebotaev*, ФНТ, т.32, №6, с.746-752 (2006).
3. *В.Н.Зверев, Д.В.Шовкун*, Письма в ЖЭТФ, т.72, №2, 103-108 (2000).
4. *B.P.Stojkovic and D.Pines*, Phys. Rev. B 55, 8567 (1997).
5. *А.А.Абрикосов*, УФН 168, 683 (1998).
6. A.S.Alexandrov, V.V.Kabanov, and N.F.Mott, Phys. Rev. Lett. 77, 4796 (1996).
7. *M.A.Obolenskii et al.*, Low Temp. Phys. 23(11), 882 (1997).
8. *Ping Sheng, J.Klafter*, Phys. Rev. B 27, 4, 2583 (1983).
9. *М.З. Мейлихов*, ЖЭТФ 115, 4, 1484 (1999).
10. *М.А Иванов, В.М. Локтев*, ФНТ, 25, 1325 (1999).
11. *H.Lutgemeier et al.*, Physica C 267, 191 (1996); H.Shaked et al. Phys. Rev. B 41, 4173 (1990).