

СКЕЙЛИНГ В ab -СОПРОТИВЛЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛА $TmBaCuO$ В НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Е.Б.Амитин, В.Я.Диковский, А.Н.Лавров, А.П.Шелковников

Институт неорганической химии СО РАН,
Новосибирский государственный университет
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 29 октября 1997 г.

Для монокристаллов системы $TmBa_2Cu_3O_x$ в интервале $6.37 < x < 6.71$ в нормальном состоянии найдено масштабное преобразование, приводящее температурные зависимости производной сопротивления в ab -плоскости к универсальному виду, не зависящему от содержания кислорода.

PACS: 74.25.-q

В настоящее время предметом широкого экспериментального и теоретического изучения стали кроссоверные явления, обнаруженные в температурных зависимостях различных свойств купратных ВТСП в нормальном состоянии, в том числе сопротивления и эффекта Холла [1–4], магнитной восприимчивости и теплоемкости [5], ЯМР характеристик [6, 7] и др. Большинство авторов связывает наблюдаемые кроссоверы с возникновением щелей в спектрах электронной либо спиновой подсистем купратного слоя в недодопированном состоянии. Фотоэмиссионные исследования, проведенные недавно на монокристаллах $Bi-2212$ [8], подтвердили существование псевдощели в спектре носителей заряда. Обнаруженное в [9] уменьшение псевдощели с ростом допирования находится в качественном согласии с соответствующей зависимостью температуры кроссовера T^* . В литературе имеется множество различных точек зрения на происхождение особенностей в электронном и спиновом спектрах купратных ВТСП. Вместе с тем, на сегодняшний день эксперимент не позволяет сделать выбор в пользу какой-либо из имеющихся моделей. Основные препятствия при анализе этого круга явлений – небольшая величина и монотонное поведение вкладов, связанных с кроссоверами, вследствие чего возникает неопределенность в выборе характерной температуры T^* . Особенности количественного исследования кроссоверных явлений, предпринятого в настоящей работе, состоят, во-первых, в привлечении для анализа температурной производной электросопротивления, как величины, более чувствительной к описанным температурным и концентрационным изменениям. Во-вторых, в более детальном изучении зависимости от допирования – измерения проводились на одном и том же монокристалле системы $TmBa_2Cu_3O_x$, в котором различные кислородные концентрации задавались переотжигом образца.

Методики и результаты эксперимента. Образцы для исследования электросопротивления нормального состояния соединения $TmBa_2Cu_3O_x$ были вырезаны из монокристаллических пластинок, выращенных методом раствора в расплаве, и имели размеры $2.0 \times 0.3 \times 0.03$ мм. Детали выращивания исходных кристаллов описаны в [10]. Для надежности сопоставления данных, получаемых при различных x , основные измерения проводились на одном образце, который многократно переотжигался для получения заданных кислородных индексов. Для каждого значения x результаты

были получены при двух различных степенях упорядоченности цепочечного кислорода, что достигалось низкотемпературным выравнивающим отжигом образца либо его закалкой в жидкий азот [10]. Сопротивление в ab -плоскости ρ_{ab} измерялось четырехзондовым методом. Для определения температуры использовался платиновый термометр сопротивления.

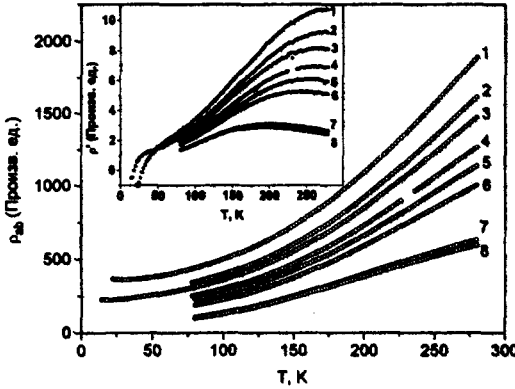


Рис.1. Температурные зависимости электросопротивления и его производной (на вставке) в ab -плоскости монокристалла $TmBa_2Cu_3O_x$ для различных кислородных концентраций: 1,2 — $x = 6.37$; 3,4 — $x = 6.42$; 5,6 — $x = 6.47$; 7,8 — $x = 6.71$. Для четных номеров проводился низкотемпературный выравнивающий отжиг

На рис.1 представлены данные о поведении ρ_{ab} и его производной $\rho'_{ab} = d\rho_{ab}/dT$ в области нормального состояния для четырех кислородных концентраций $x = 6.37, 6.42, 6.47$ и 6.71 . Видно, что производная сопротивления имеет максимум, положение которого (T_{max}) смещается к более высоким температурам с уменьшением x . Построение данных в приведенных координатах ρ'_{ab}/ρ'_{max} vs T/T_{max} говорит о наличии универсального поведения в исследованном диапазоне температур и кислородных концентраций. Ранее элементы подобия были обнаружены в температурных зависимостях ab -сопротивления и холловских параметров недодопированных YBCO-монокристаллов и пленок в нормальном состоянии [1,2]. В этих работах в качестве характерного температурного масштаба выбиралась точка отклонения зависимости $\rho_{ab}(T)$ от линейной. Эта величина определяется с большой погрешностью, что затрудняет количественное исследование. Представленное на рис.2а приведение индивидуальных кривых к данной универсальной зависимости производилось с двумя подгоночными параметрами — величины T^* и ρ'_{max} подбирались, исходя из минимизации расстояния между кривыми. При этом оказалось, что полученные значения T^* и ρ'_{max} фактически пропорциональны температуре и величине максимума ρ'_{ab} на тех кривых, где этот максимум достигается. Обращает на себя внимание тот факт, что в широкой области температур разбежка между отдельными кривыми оказывается одного порядка с экспериментальной погрешностью, характерной для каждой кривой. Видно также, что на универсальную кривую ложатся точки, относящиеся как к закаленному, так и к отожженному состояниям образца. Полученные в результате подгонки значения нормирующих параметров изменяются с изменением содержания кислорода. Для обоих параметров это изменение близко к гиперболическому (см. рис. 2б). При этом зависимости как T^* , так и ρ'_{max} от кислородного индекса оказываются сдвинутыми друг относительно друга по оси x для закаленного и отожженного состояний на величину $\Delta x \approx 0.025$. Приблизительно такой же сдвиг был получен при сопоставлении зависимости от x температур сверхпроводящего перехода $T_c(x)$ закаленного и отожженного образцов. Такая сдвигка фазовой диаграммы

согласуется с представлением о том, что для купратного слоя упорядочение в кислородной подсистеме цепочек приводит к эффективному повышению концентрации носителей заряда [10]. Из вставки на рис.1 следует, что при низких температурах имеются очевидные отклонения от универсального поведения, которые проявляются в резком уменьшении и даже смене знака производной сопротивления. Соответствующие вклады в сопротивление, связанные, возможно, с эффектами локализации, наиболее заметны для образцов с малым содержанием кислорода. Эти эффекты не будут обсуждаться в данной статье, поскольку недавно они были подробно исследованы в [11].

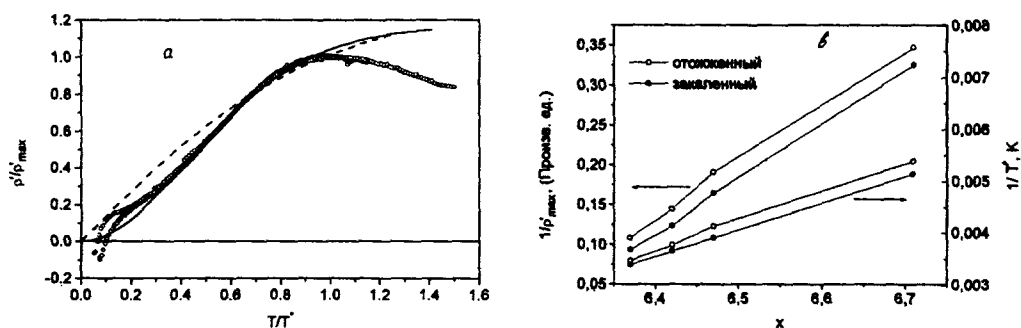


Рис.2. а – Универсальное поведение производной сопротивления в координатах $\rho'_{ab}/\rho'_{max} T/T^*$ (ρ'_{max} и T^* соответствуют величине и положению максимума $d\rho_{ab}/dT$). Пунктирная и сплошная кривые соответствуют аппроксимации данных $\rho'_{ab}(T)$ по теории Т.Мория [12] и Д.Пайнса [14]. б – Зависимость обратных величин ρ'_{max} и T^* от допирования

Анализ вида универсальной кривой говорит о том, что на низкотемпературном участке ее поведение близко к экспоненциальному (см. рис.3):

$$\rho'_{ab} = \rho'_{max}(A + B \exp(-T_A^*/T)). \quad (1)$$

Здесь постоянные A и B равны, соответственно, 0,20 и 2,9, а T_A^* и ρ'_{max} зависят от x . При этом значения параметра T_A^* , полученные из аппроксимации, оказались близкими к температуре максимума производной сопротивления ($T_A^* \approx 1.1T_{max}$ для все x). В соответствии с (1) экстраполяция низкотемпературного участка в $T = 0$ дает ненулевую отсечку. Интересно, что величина отсечки различна для разных кислородных концентраций, но всегда пропорциональна ρ'_{max} . Интервал соответствия экспоненциальному закону увеличивается по мере уменьшения кислородного индекса. Для $x = 6.37$ интервал аппроксимации достигает ~ 150 К, причем, как показывает статистический анализ, ошибка аппроксимации на этом интервале оказывается одного порядка с экспериментальной дисперсией.

Обсуждение результатов. В соответствии с рис.2а, температурные зависимости ТКС, полученные для различных кислородных концентраций, могут быть представлены в виде универсальной кривой соответствующей нормировкой как функции, так и аргумента. Иными словами, производная сопротивления, зависящая от двух переменных T и x , может быть сведена к функции от единственного аргумента, а именно, безразмерного отношения $T/T^*(x)$. Само существование масштабного преобразования, приводящего кривые $\rho'_{ab}(T)$ к универсальному виду, говорит о том, что в исследованной области фазовой диаграммы поведение ТКС, по-видимому, опреде-

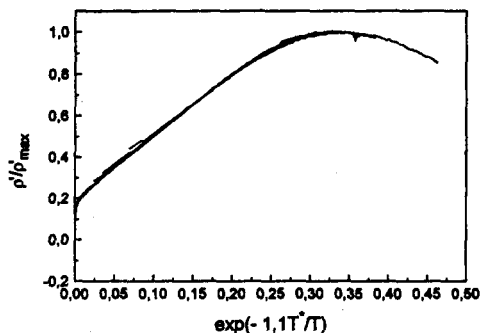


Рис.3. Построение данных $\rho'_{ab}/\rho'_{max}(T/T^*)$ в экспоненциальном масштабе

ляется одним физическим механизмом. Более того, можно говорить о наличии единого энергетического масштаба в диапазоне кислородных индексов $6.37 < x < 6.71$ и температур $1.2T_c < T < 280$ К.

Наличие эффектов масштабирования в производной сопротивления и конкретный вид универсальной кривой не находят однозначного объяснения в рамках существующих моделей. Если связывать температурную зависимость $\rho'_{ab}(T)$ на низкотемпературном интервале с наличием щели в спектре спиновых возбуждений либо псевдощели в спектре носителей тока, то эти две возможности приводят (для обычных магнитных металлов) соответственно к уменьшению вклада магнного рассеяния, то есть к уменьшению сопротивления, либо к уменьшению плотности состояний носителей, то есть к уменьшению проводимости. В качественном отношении поведение производной сопротивления ближе к первому варианту, поскольку в области универсальности ρ'_{ab} всегда положительна. Вместе с тем, для сильно коррелированной электронной системы купратных ВТСП ситуация с электрон-спиновым рассеянием может оказаться довольно сложной из-за тесного взаимовлияния электронных и спиновых степеней свободы. Учет этого взаимовлияния методом среднего поля заметно улучшает согласие теории с экспериментом. Теория электрон-спинового рассеяния, построенная Т.Мория [12] для купратных ВТСП, позволяет качественно описать поведение $\rho'_{ab}(T)$ (см. рис.2а). Однако количественное согласие отсутствует и, к тому же, теория не дает прямого указания на наличие универсальности. В расчетах же спинового рассеяния в рамках модели Хаббарда, как правило, используются значительные приближения. Так, в обзоре [13] обсуждаются различные варианты коллективных состояний, возникающих вследствие самосогласованности электронных и спиновых возбуждений. В соответствии с [13], взаимодействие фермионов с коллективной флуктуационной модой приводит в первом приближении к линейному по температуре поведению $\rho_{ab}(T)$.

Заметно лучшее описание (но также не количественное, см. рис.2а) зависимостей $\rho'_{ab}(T)$ может быть получено с помощью выражения для ab -сопротивления, полученного в модели почти антиферромагнитной ферми-жидкости Д.Пайнсом и др. [14]:

$$\rho_{ab} = A \frac{T^2}{T_0 + T}, \quad (2)$$

где A – величина, учитывающая особенности спектра носителей в купратном слое, T_0 – температура кроссовера. В общем случае A и T_0 являются функциями как степени допирования, так и температуры, однако в простейшем случае, когда отсутствует

температурная эволюция ферми-поверхности, A зависит лишь от степени допирования, а $T_0 \sim F(x)/T$. При этом нетрудно показать, что производная $\rho'_{ab}(T)$ зависит от температуры только через отношение $T/F(x)$, что создает условия для универсального поведения. Вместе с тем, отмеченное согласие с экспериментом может оказаться случайным из-за значительных упрощений, использованных при выводе выражения (2). К тому же, пренебрежение температурной зависимостью параметров ферми-поверхности именно для псевдошелевого режима не является оправданным.

Что касается обнаруженного нами экспоненциального поведения производной сопротивления, то мы пока не можем дать ему однозначного объяснения. Ясно лишь, что такое поведение в низкотемпературной области является скорее всего асимптотическим. Об этом говорит то обстоятельство, что свойство универсальности (то есть единый физический механизм и единый энергетический масштаб) распространяется не только на экспоненциальный участок, но и на область максимума ρ'_{ab} . Вместе с тем, наличие доминирующего активационного вклада при низких температурах наряду с утверждением о единственности энергетического масштаба может означать, что температура T_A^* , близкая к точке максимума производной сопротивления, как раз и играет роль единственной характерной энергии, определяющей свойства системы в области универсальности.

Таким образом, для производной сопротивления в ab -плоскости монокристалла $TmBa_2Cu_3O_x$ характерно универсальное поведение в широком диапазоне температур и кислородных индексов. На низкотемпературном участке поведение универсальной кривой близко к экспоненциальному.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-19249а и 9619227) и Научного совета по ВТСП (проект 93037). Авторы признательны Э.В.Матизену и Л.А.Боярскому за полезную дискуссию.

-
1. T.Ito, K.Takenaka, and S.Uchida, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3995 (1993).
 2. B.Wuyts, V.V.Moshchalkov, and Y.Bruynseraede, *Phys. Rev.* **B51**, 6115 (1995).
 3. A.Carrington, D.J.C.Walker, A.P.Mackenzie, and J.R.Cooper, *Phys. Rev.* **B48**, 13051 (1993).
 4. K.F.Quader and A.Levin, *Phil. Mag.* **74**, 609 (1996).
 5. W.Y.Liang, J.W.Loram, K.A.Mizra et al., *Physica C* **263**, 277 (1996).
 6. H.Alloul, T.Ohno, and D.Mondels, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 1700 (1989).
 7. M.Horvatic, P.Segransan, C.Berthier et al., *Phys. Rev.* **B39**, 7322 (1989).
 8. D.S.Marshall, D.S.Dessau, A.G.Loesser et al., *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4841 (1996).
 9. J.M.Harris, Z.-H.Shen, P.J.White et al., Preprint cond-mat/9611010.
 10. A.Lavrov and L.P.Kozeeva, *Physica C* **248**, 365 (1995); *ibid.* **253**, 313 (1995).
 11. В.Ф.Гантмахер, Л.П.Козеева, А.Н.Лавров и др., Письма в ЖЭТФ **65**, 834 (1997).
 12. T.Moriya, Y.Takahashi, and K.J.Ueda, *Phys. Soc. Jap.* **59**, 2905 (1990).
 13. Ю.А.Изюмов, УФН **167**, 465 (1997).
 14. D.Pines, Preprint cond-mat/9609137.