

Сравнительный анализ влияния La и Co на сверхпроводимость и зонный спектр $YBa_2Cu_3O_y$ при различном содержании кислорода

© В.Э. Гасумянц, Е.В. Владимирская, М.В. Елизарова, И.Б. Патрина*

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

* Институт химии силикатов Российской академии наук,
195155 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: VGAS@phsc5.stu.neva.ru

(Поступила в Редакцию 25 июня 1998 г.)

Измерены температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента термоэдс в образцах $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0.25$) в случае их максимального насыщения кислородом, а также после отжига в кислорододефицитной атмосфере. Обнаружено, что зависимости $T_c(x)$ для стартовых серий имеют максимум при $x = 0.05$, который после отжига сохраняется для $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и исчезает для $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$. На основе феноменологической модели зонного спектра в нормальной фазе определены параметры проводящей зоны и системы носителей заряда и проанализировано их изменение в зависимости от типа и содержания легирующей примеси, а также под действием отжига. Несмотря на обнаруженные различия в зависимости $T_c(x)$, для всех исследованных серий значения критической температуры коррелируют с эффективной шириной проводящей зоны. Обсуждается механизм влияния примесей на параметры зонного спектра и причины различий во влиянии отжига на свойства $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$.

Известно, что состояние кислородной подсистемы в значительной степени определяет как свойства нормальной фазы, так и значение критической температуры T_c в системе $YBa_2Cu_3O_y$. Помимо отжига в кислорододефицитной атмосфере воздействовать на содержание и распределение атомов кислорода в решетке можно путем легирования различными гетеровалентными примесями. При этом характер изменения свойств $YBa_2Cu_3O_y$ при замещении цепочечной меди 3d-металлами (Fe, Co, Al) и бария редкоземельными элементами оказывается во многом аналогичным, несмотря на то что в первом случае замене подвергается медь, которая наряду с кислородом считается ответственной за свойства нормальной фазы. Представляет интерес проведение сравнительного количественного анализа влияния данных двух типов замещений на свойства нормального состояния для выяснения роли различных узлов решетки в формировании зоны, ответственной за проводимость.

Для решения этой задачи использован метод анализа кинетических коэффициентов в нормальной фазе на основе модели электронного транспорта в ВТСП-материалах [1], что позволяет определять количественные характеристики зонного спектра и анализировать тенденции в его трансформации при легировании различными примесями [1–3]. В качестве исследуемых примесей, замещающих медь и барий, были выбраны кобальт и лантан соответственно. Первый в соединении $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ в широком диапазоне концентраций замещает медь только в цепочечных позициях [4,5], а второй наиболее часто используется при исследовании влияния замещения бария ввиду близости ионных радиусов Ba ($r_i = 1.35 \text{ \AA}$) и La ($r_i = 1.33 \text{ \AA}$). Обе примеси имеют валентность больше, чем замещаемые

ими элементы, что приводит к увеличению содержания кислорода с ростом уровня легирования [4,6–9]. Характерной особенностью систем $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ и $YBa_{2-x}La_xCu_3O_y$ является то, что в области малых концентраций обеих примесей значение T_c слабо возрастает, а затем происходит его резкое падение [4,8–11]. В работе [8] особо отмечается, что максимум на зависимости $T_c(x)$ в $YBa_{2-x}La_xCu_3O_y$ при малых x наблюдается в образцах с максимальной степенью орторомбического искажения, при этом наличие этого максимума связывается с дозаполнением кислородом позиций O(1). Трансформация температурных зависимостей удельного сопротивления [8–10,12–15] и коэффициента термоэдс [13,16,17] с увеличением содержания как кобальта, так и лантана в целом аналогична случаю роста дефицита кислорода. Отметим, что ранее нами показано, что в системе $YBa_{2-x}La_xCu_3O_y$, несмотря на немонотонность зависимости $T_c(x)$, существует корреляция между параметрами зонного спектра и значением T_c , обнаруженная ранее для системы $YBa_2Cu_3O_y$ с другими типами замещений [17].

В связи с этим, цель данной работы — сравнительное исследование влияния кобальта и лантана на сверхпроводимость, транспортные свойства в нормальной фазе и параметры зонного спектра в образцах $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0.25$) и $YBa_{2-x}La_xCu_3O_y$ ($x = 0-0.5$). Для получения более детальной информации о механизме воздействия примесей, причинах немонотонности зависимости $T_c(x)$ и характере связи между параметрами зонного спектра и сверхпроводящими свойствами в соединении Y–Ba–Cu–O для обеих систем исследовалось также влияние дополнительной нестехиометрии по кислороду.

1. Характеристика исследованных образцов

Керамические образцы состава $YBa_{2-x}La_xCu_3O_y$ ($x = 0-0.5$) и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ ($x = 0-0.25$) были изготовлены стандартным методом твердофазного синтеза. Заключительная обработка проводилась в атмосфере проточного кислорода при температуре $T = 450^\circ\text{C}$ в течение 10 h. Однофазность всех образцов контролировалась методом рентгеновской дифракции с точностью не ниже 1%. Для отражения процентного соотношения между замещающим и замещаемым элементами использовались формулы соединений в виде $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ ($x = 0-0.25$) и $YBa_2Cu(2)_2Cu(1)_{1-x}Co_xO_y$ ($YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$) ($x = 0-0.25$), поскольку в системе $YBa_2Cu_3O_y$ для замещающего лантана имеются две эквивалентные позиции бария, тогда как кобальт замещает медь только в позиции Cu(1). Параметры элементарной ячейки, определенные по данным рентгенографического анализа с точностью $\pm 0.001-0.002$, приведены в табл. 1, 2. Для системы $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ при $x = 0.025$ наблюдается максимум орторомбического искажения $b-a$, а в случае $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ параметр $b-a$ при $x = 0$ и 0.05 остается неизменным. Переход к тетрагональной симметрии в соединении $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ происходит вблизи $x = 0.2$, а в $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ — вблизи $x = 0.10$, что согласуется с литературными данными [4,6,8,9,15,18]. Создание дополнительного дефицита кислорода достигалось путем совместного отжига образцов обеих серий в вакууме при $T = 450^\circ\text{C}$ в течение 2 h. Содержание

Таблица 1. Параметры элементарной ячейки в стартовых образцах $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и содержание кислорода до (y_1) и после (y_2) отжига

x	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$a-b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	y_1	y_2
0.00	3.822	3.885	0.063	11.670	6.95	6.86
0.025	3.820	3.894	0.074	11.655	6.98	6.89
0.05	3.823	3.895	0.072	11.630	6.99	6.92
0.10	3.819	3.890	0.071	11.650	7.03	6.96
0.15	3.828	3.879	0.051	11.640	7.10	7.02
0.20	3.857	3.857	0	11.600	7.14	7.04
0.25	3.853	3.853	0	11.580	7.17	7.06

Таблица 2. Параметры элементарной ячейки в стартовых образцах $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ и содержание кислорода до (y_1) и после (y_2) отжига

x	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$a-b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	y_1	y_2
0.0	3.822	3.880	0.058	11.698	6.98	6.88
0.05	3.831	3.889	0.058	11.682	7.00	6.90
0.10	3.865	3.872	0.007	11.661	7.02	6.92
0.15	3.869	3.869	0	11.676	7.04	6.94
0.20	3.872	3.872	0	11.669	7.05	6.95
0.25	3.874	3.874	0	11.666	7.06	6.95

кислорода определялось методом иодометрического титрования с точностью $\pm 0.01-0.02$. Значения кислородного индекса y для всех четырех серий приведены в табл. 1, 2. Увеличение уровня легирования приводит к росту значений y , после отжига содержание кислорода уменьшилось на величину 0.07–0.1.

2. Экспериментальные результаты

На всех сериях образцов проводились измерения температурных зависимостей удельного сопротивления и коэффициента термоэдс в диапазоне $T = T_c - 300 \text{ K}$ по методике, описанной в [16].

Температурные зависимости удельного сопротивления демонстрируют вид, типичный для системы $YBa_2Cu_3O_y$. Для трех серий значения ρ линейно падают с уменьшением температуры, при этом наклон зависимостей $\rho(T)$ уменьшается с ростом содержания примесей. Исключение составляет серия образцов $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ с дополнительным дефицитом кислорода, для которой при $x \geq 0.15$ наблюдается переход к полупроводниковому виду $\rho(T)$ в области низких температур.

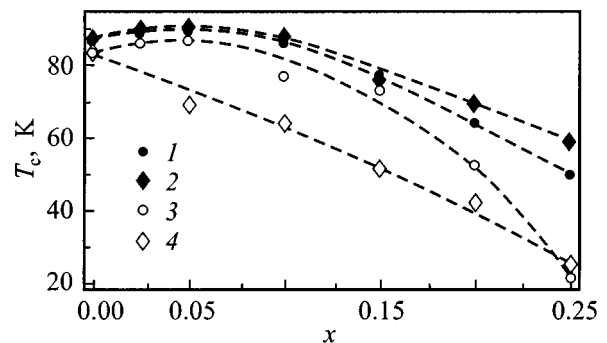


Рис. 1. Зависимость значений критической температуры от содержания примесей в соединениях $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ (1, 3) и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ (2, 4). 1, 2 — стартовые серии образцов, 3, 4 — серии с пониженным содержанием кислорода.

На рис. 1 приведены зависимости значения T_c от концентрации примесей для всех четырех серий, определенные по данным резистивных измерений. Для обеих стартовых серий на зависимости $T_c(x)$ наблюдается максимум при $x = 0.05$. Отметим, что вблизи этой концентрации примесей наблюдается максимальное орторомбическое искажение решетке, а содержание кислорода максимально приближается к стехиометрическому значению $y = 7$, т. е. кислородная подсистема становится наиболее упорядоченной (табл. 1, 2). Дальнейшее увеличение концентрации примесей приводит к монотонному падению значений критической температуры. После отжига в кислорододефицитной атмосфере максимум на зависимости $T_c(x)$ для системы $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ сохраняется при том же значении концентрации лантана, в то время как в соединении $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ с ростом x наблюдается монотонное во всем диапазоне падение T_c .

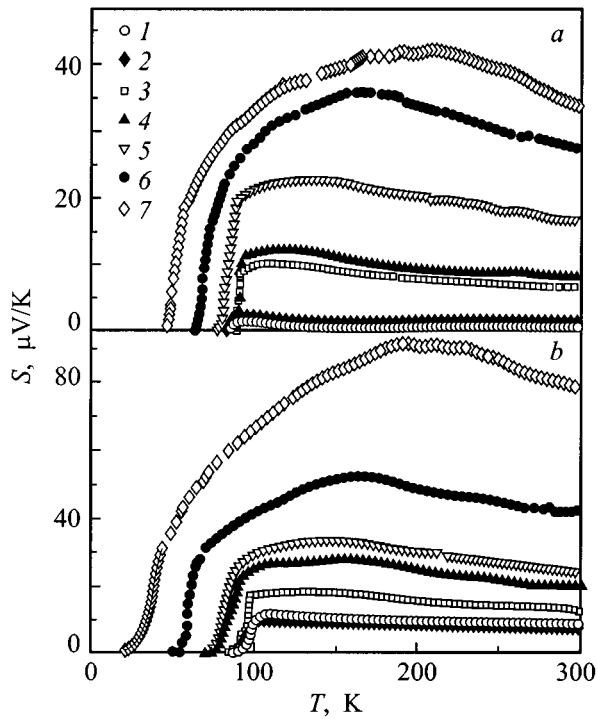


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента термоэдс в соединении $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$. *a* — стартовая серия образцов, *b* — серия с пониженным содержанием кислорода. *x*: 1 — 0, 2 — 0.025, 3 — 0.05, 4 — 0.1, 5 — 0.15, 6 — 0.2, 7 — 0.25.

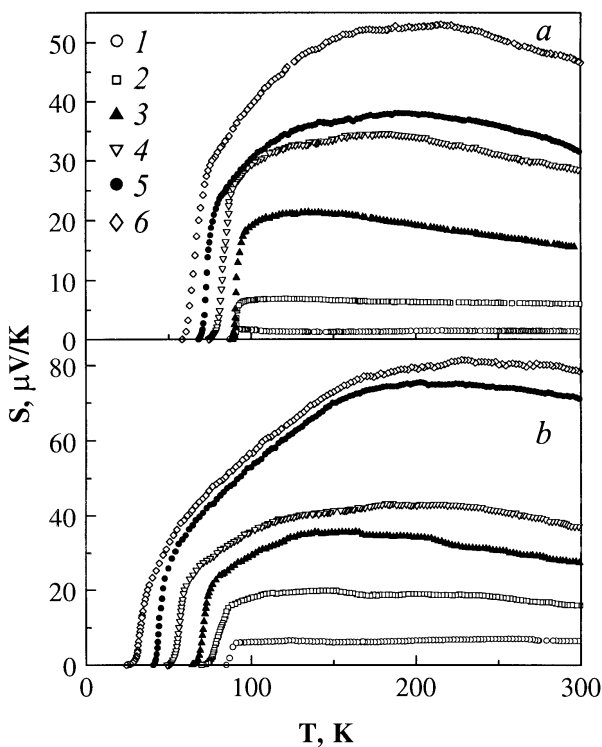


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента термоэдс в соединении $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$. *a* — стартовая серия образцов, *b* — серия с пониженным содержанием кислорода. *x*: 1 — 0, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.15, 5 — 0.2, 6 — 0.25.

Температурные зависимости коэффициента термоэдс для соединений $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ приведены на рис. 2, 3. Они демонстрируют все особенности, характерные для системы $YBa_2Cu_3O_y$: протяженный участок в области высоких температур, где $S(T) \approx \text{const}$ (для образцов с малыми отклонениями от стехиометрии), и наличие на кривой $S(T)$ максимума при $T = 120\text{--}200$ К. С ростом содержания примесей происходит существенное увеличение абсолютного значения коэффициента термоэдс, расширение максимума на зависимости $S(T)$ и его смещение в область более высоких температур. Уменьшение содержания кислорода для обеих систем привело к ожидаемому увеличению абсолютных значений коэффициента термоэдс, но вид зависимостей $S(T)$ и характер их трансформации с ростом уровня легирования существенно не изменился. Таким образом, характер трансформации $S(T)$ в образцах $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ с ростом уровня легирования аналогичен случаю $YBa_2Cu_3O_y$ с ростом дефицита кислорода [2].

3. Анализ полученных результатов и выводы

Полученные результаты были проанализированы в рамках феноменологической модели электронного транспорта в нормальной фазе (модель узкой зоны), подробно описанной в наших предыдущих публикациях [1,2]. В результате количественного сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, описанными в предыдущем разделе, были определены три основных модельных параметра, характеризующие параметры зонного спектра и системы носителей заряда: эффективная ширина проводящей зоны W_D и интервала делокализованных состояний W_σ , а также степень заполнения зоны электронами F , равная отношению числа электронов n к числу состояний N в зоне. Далее проанализируем концентрационные зависимости этих параметров в исследованных образцах.

Что касается степени заполнения F , то ее значение во всех четырех сериях практически линейно возрастает с ростом концентрации примесей (в стартовых сериях от 0.5 до 0.543 и 0.565, а в отожженных — от 0.51 до 0.565 и 0.579 для образцов, легированных лантаном и кобальтом соответственно). Это означает, что при гетеровалентных замещениях $La \rightarrow Ba$ и $Co \rightarrow Cu(1)$ не происходит полной компенсации избыточного положительного заряда за счет роста содержания кислорода, и число носителей заряда (дырок) в зоне уменьшается. В системе $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ значения F возрастают сильнее, чем в $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ при соответствующих уровнях замещений, что объясняется меньшей степенью компенсации избыточного положительного заряда примеси дополнительным кислородом (см. табл. 1, 2).

На рис. 4 приведены результаты расчетов для эффективной ширины проводящей зоны W_D в зависимости

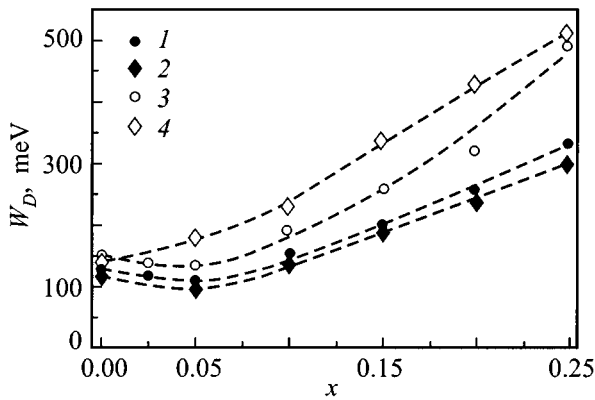


Рис. 4. Зависимости полной эффективной ширины проводящей зоны от уровня легирования в $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ (1, 3) и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ (2, 4). 1, 2 — стартовая серия образцов, 3, 4 — серии с пониженным содержанием кислорода.

от уровня легирования для всех исследованных серий образцов. Видно, что в системе $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ при $x = 0.05$ наблюдается слабый минимум на зависимости $W_D(x)$ как в случае образцов с высоким, так и с пониженным значением кислородного индекса. Аналогичная тенденция наблюдается и для первой серии образцов $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$, однако в данном соединении понижение содержания кислорода приводит к исчезновению минимума на зависимости $W_D(x)$, и она становится монотонно растущей во всем диапазоне концентрации кобальта. Ширина интервала делокализованных состояний W_σ с ростом содержания примесей во всех четырех сериях изменяется аналогично величине W_D , включая наличие минимума на зависимостях $W_\sigma(x)$ в трех первых случаях. При этом в области увеличения значений W_σ и W_D их отношение последовательно уменьшается. Так, в отожженных сериях величина W_σ/W_D падает от 0.36 и 0.42 при $x = 0.05$ до 0.21 и 0.24 при $x = 0.25$ для образцов, легированных лантаном и кобальтом соответственно.

Обнаруженное немонотонное изменение энергетических размеров проводящей зоны коррелирует со степенью разупорядочения подсистемы цепочечного кислорода и может быть объяснено на основе предположения о реализации в исследованных системах механизма андерсоновской локализации состояний. Напомним, что, согласно выводам авторов работы [8], при малых концентрациях лантана в $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ происходит дозаполнение позиций кислорода $O(1)$. Можно предположить, что аналогичная ситуация реализуется и в соединении $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$. В таком случае, концентрация примеси $x \approx 0.05$ соответствует максимальному упорядочению кислородной подсистемы, когда все позиции $O(1)$ оказываются заполненными, а позиции $O(5)$ еще вакантны. В результате, именно при этом значении содержания примесей ширина проводящей зоны становится минимальной. Дальнейшее увеличение x в обеих системах приводит к статистически распре-

деленному по кристаллу заполнению кислородных позиций $O(5)$, т.е. ведет к появлению и последовательному увеличению разупорядочения кислородной подсистемы. Соответственно значения W_D возрастают, а отношение W_σ/W_D уменьшается, т.е. происходит относительное сужение интервала делокализованных состояний за счет локализации состояний на краях зоны.

Что касается сверхпроводящих свойств исследованных систем, то наблюдается взаимнооднозначное соответствие между значениями эффективной ширины зоны и T_c (ср. рис. 1 и 4), которое находит свое объяснение в рамках нашей модели. При условии неизменного (или слабо изменяющегося) числа состояний в зоне уменьшение величины W_D в области малых концентраций примеси приводит к увеличению функции плотности состояний на уровне Ферми $D(E_F)$, которое становится максимальным при $x = 0.05$, обеспечивая достижение максимального значения критической температуры. Дальнейший рост концентрации обеих примесей, приводя к расширению зоны, вызывает падение величины $D(E_F)$. Дополнительно это падение несколько усиливается за счет роста степени заполнения зоны, что ведет к смещению уровня Ферми в сторону больших энергий от максимума плотности состояний. Следствием уменьшения значения $D(E_F)$ является наблюдаемое падение величины T_c . Отметим, что тенденции в изменении зонных параметров и величины T_c для соединений $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ одинаковы. Наблюдаются только некоторые количественные различия в их зависимостях от уровня легирования, при этом более высоким значениям T_c в целом для серии $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ соответствуют меньшие значения эффективной ширины зоны.

Общее уменьшение содержания кислорода в каждой из исследованных серий привело к возрастанию значений W_D за счет дополнительного кислородного разупорядочения в соответствии с данными для $YBa_2Cu_3O_y$ с различным y [1,2] (рис. 4). В то же время обнаруженная корреляция между энергетическими размерами проводящей зоны и величиной критической температуры в соединениях $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ сохраняется и в случае создания дополнительной нестехиометрии по кислороду (рис. 1, 4). Минимуму на зависимости $W_D(x)$ в $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ при $x = 0.05$ соответствует максимальное значение T_c , а в системе $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ монотонный рост величины W_D сопровождается последовательным уменьшением значения критической температуры. Значения W_D для серии $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ в целом больше, а величина T_c — соответственно меньше, чем для $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$, за исключением образцов с $x = 0.25$, для которых величины как эффективной ширины зоны, так и критической температуры примерно одинаковы. Таким образом, полученные данные подтверждают наличие в $YBa_2Cu_3O_y$ универсальной корреляции между эффективной шириной проводящей зоны и значением T_c , обнаруженной ранее для различных типов отклонений от стехиометрии [19].

Совместный анализ результатов для всех четырех исследованных серий образцов позволяет сделать следующий вывод. Механизм воздействия примесей, вводимых в узлы цепочечной меди или бария, в целом одинаков и определяется, прежде всего, влиянием примесных атомов на содержание кислорода и характер распределения его атомов по позициям в решетке. Именно изменение свойств кислородной подсистемы за счет введения в решетку неизовалентных примесей является главным фактором, определяющим как параметры зонного спектра в нормальной фазе, так и сверхпроводящие свойства системы $YBa_2Cu_3O_y$. Расширение проводящей зоны, вызванное ростом степени разупорядочения цепочечного кислорода, является основной причиной подавления сверхпроводящих свойств $YBa_2Cu_3O_y$ под действием легирования.

Основываясь на данном выводе и характере перераспределения атомов кислорода в решетке, вызываемого лантаном и кобальтом, обсудим возможные причины сохранения немонотонности зависимостей $T_c(x)$ и $W_D(x)$ для $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и отсутствия максимума на $T_c(x)$ и минимума на $W_D(x)$ для $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ после отжига в кислорододефицитной атмосфере.

Кобальт, замещающий медь непосредственно в цепочечных позициях Cu(1), имеет большее координационное число и стремится к увеличению числа окружающих его атомов кислорода, образуя с ними достаточно сильные связи. По этой причине уход кислорода при отжиге из тех ячеек, где располагаются атомы кобальта, затруднен. В результате при общем понижении среднего по кристаллу содержания кислорода при отжиге происходит дополнительное разупорядочение кислородной подсистемы за счет неравномерности удаления кислорода из различных ячеек. Таким образом, даже в образцах с малыми концентрациями кобальта подсистема цепочечного кислорода становится более разупорядоченной, чем в образце с $x = 0$. Это и приводит к тому, что изменение ширины зоны и, соответственно, сверхпроводящих свойств с ростом содержания кобальта после отжига становится монотонным. С другой стороны, замещение бария лантаном оказывает более слабое воздействие на кислородную подсистему. Поскольку атомы лантана находятся вне цепочек, связь между ними и избыточным кислородом более слабая, и при отжиге уход кислорода из различных ячеек может происходить относительно равномерно, т. е. общий характер распределения атомов кислорода в цепочках в целом остается неизменным. Таким образом, минимум на зависимости $W_D(x)$ и соответственно максимум на $T_c(x)$ для серии с пониженным содержанием кислорода сохраняется при той же концентрации лантана, что и до отжига.

Таким образом, на основе сравнительного анализа влияния легирования кобальтом и лантаном на свойства $YBa_2Cu_3O_y$ получены следующие основные результаты.

1) В соединениях $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ при содержании кислорода, близком

к стехиометрическому в стартовом образце, на зависимостях $T_c(x)$ наблюдается максимум при концентрации примесей $x = 0.05$. При равномерном понижении содержания кислорода во всех образцах в системе $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ максимум на $T_c(x)$ сохраняется при том же значении концентрации лантана, тогда как в $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ зависимость критической температуры от содержания примеси становится монотонно падающей.

2) На основе анализа зависимостей $S(T)$ в рамках модели узкой зоны определены значения основных параметров зонного спектра для исследованных образцов и проанализировано их изменение в зависимости от концентрации примесей. Показано, что во всех случаях существует универсальная корреляция между значениями эффективной ширины проводящей зоны и критической температуры.

3) Сравнительный анализ изменения параметров зонного спектра и критической температуры в $YBa_2Cu_3O_y$ при неизовалентных замещениях $Co \rightarrow Cu(1)$ и $Ba \rightarrow La$ показывает, что основной причиной изменения свойств данного соединения является вызываемое введением примесей изменение состояния кислородной подсистемы, в частности степень разупорядочения атомов цепочечного кислорода.

4) Различия в трансформации концентрационных зависимостей критической температуры и параметров зонного спектра в системах $Y(Ba_{1-x}La_x)_2Cu_3O_y$ и $YBa_2Cu_{3-x}Co_xO_y$ под влиянием отжига в кислорододефицитной атмосфере могут быть объяснены различиями в характере перераспределения атомов цепочечного кислорода под действием примесей, размещающихся в узлах цепочечной меди и бария.

В.Э.Г. благодарит администрацию Санкт-Петербурга, Российскую академию наук и Министерство общего и профессионального образования России за индивидуальную финансовую поддержку (грант для молодых ученых 1998 г.)

Список литературы

- [1] V.E. Gasumyants, V.I. Kaidanov, E.V. Vladimirskaia. *Physica C* **248**, 2&3, 255 (1995).
- [2] В.Э. Гасумянц, С.А. Казьмин, В.И. Кайданов, В.И. Смирнов, Ю.М. Байков, Ю.П. Степанов. *СФХТ* **4**, 7, 1280 (1991).
- [3] Е.В. Владимирская, В.Э. Гасумянц, И.Б. Патрина. *ФТТ* **37**, 7, 1990 (1995).
- [4] J.M. Tarascon, P. Barboux, P.F. Miceli, L.H. Greene, G.W. Hull, M. Eibschutz, S.A. Sunshine. *Phys. Rev.* **B37**, 13, 7458 (1988).
- [5] R.S. Howland, T.H. Geballe, S.S. Laderman, A. Fischer-Colbric, M. Scott, J.M. Tarascon, P. Barboux. *Phys. Rev.* **B39**, 13, 9017 (1989).
- [6] Y. Xu, R. Sabatini, A.R. Moodenbaugh, Yi. Zhu, S.-G. Shyu, M. Suenaga, K.W. Dennis, R.W. McCallum. *Physica C* **169**, 3&4, 205 (1990).

- [7] A. Tokiwa, Y. Syono, M. Kikuchi, R. Suzuki, T. Kajitani, N. Kobayashi, T. Sasaki, O. Nakatsu, Y. Muto. *J. Jap. Appl. Phys.* **27**, 6, L1009 (1988).
- [8] R. Liang, M. Itoh, T. Nakamura, R. Aoki. *Physica* **C157**, 1, 83 (1989).
- [9] A. Manthiram, J.B. Goodenough. *Physica* **C159**, 6, 760 (1989).
- [10] J.J. Neumeier. *Appl. Phys. Lett.* **61**, 15, 1852 (1992).
- [11] R.G. Buckley, D.M. Pooke, J.L. Tallon, M.R. Presland, N.E. Flower, M.P. Staines, H.L. Johnson, M. Meylan, G.V.M. Williams, M. Bowden. *Physica* **C174**, 4–6, 383 (1991).
- [12] В.С. Грунин, И.Б. Патрина, М.М. Пивоваров, М.В. Разуменко, Н.П. Баранская, И.А. Дроздова, В.Л. Макаров. *СФХТ* **3**, 10, 110 (1990).
- [13] B. Fisher, J. Genossar, L. Patlagan, G.M. Reisner. *Phys. Rev.* **B48**, 21, 16 056 (1993).
- [14] Z. He, Z. Chen, Z. Zhao, Z. Xu, Y. Qian, Q. Zhang. *Phys. Lett.* **A132**, 4, 217 (1988).
- [15] R. Aoki, S. Takahashi, H. Murakami. *Physica* **C156**, 3, 405 (1988).
- [16] Е.В. Владимирская, В.Э. Гасумянц. *ФТТ* **36**, 4, 1002 (1994).
- [17] E. Vladimirskaia, V. Gasumyants, I. Patrina. *Superlatt. Microstruct.* **21**, Suppl.A, 71 (1997).
- [18] C.Y. Yang, A.R. Moodenbaugh, Y.L. Wang, Y. Xu, S.M. Heald, D.O. Welch, M. Suenaga, D.A. Fischer, J.E. Penner-Hahn. *Phys. Rev.* **B42**, 4, 2231 (1990).
- [19] В.Э. Гасумянц, Е.В. Владимирская, И.Б. Патрина. *ФТТ* **39**, 9, 1520 (1997).