

УДК 537.312.62+538.945+548.537.611.45

©1994

## МАГНИТНЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ В ПОЛЯХ ДО 12 Т

С. Пехота,<sup>1</sup> А. Набьялэк,<sup>1</sup> А. Глубоков,<sup>1</sup> В. И. Маркович, В. В. Чабаненко

Исследованы электрические, магнитные, структурные свойства сверхпроводящих и несверхпроводящих твердых растворов  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  для  $0 < x < 1$ . Магнитные свойства этих соединений определяются конкуренцией парамагнитного и диамагнитного моментов. Парамагнитная восприимчивость образцов подчиняется закону Кюри-Вейсса. Из измерений магнитного момента построены  $H-T$  диаграммы первых критических полей межзеренного кластера и зерен. Рост содержания стронция ведет к деградации сверхпроводящих характеристик — уменьшению температуры сверхпроводящего перехода, критического тока, диамагнетизма. Обнаружена более резкая зависимость  $T_c$  от содержания кислорода, чем в чисто бариевых соединениях 1-2-3.

Для ВТСП-соединений типа 123, имеющих перовскитоподобную структуру ( $\text{ABX}_{3-\delta}$ ), возможны замещения в двух типах катионных позиций (А и В). В целом ряде работ, например [1-7], проводилось изучение влияния катионного замещения в позиции А бария стронцием на структурные и электрофизические свойства системы  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Уменьшение параметров кристаллической решетки  $a, b, c$  при возрастании содержания стронция из-за различия ионных радиусов  $\text{Ba}^{2+}$  ( $r_{\text{Ba}} \cong 1.42 \text{ \AA}$ ) и  $\text{Sr}^{2+}$  ( $r_{\text{Sr}} \cong 1.26 \text{ \AA}$ ) сопровождалось падением температуры сверхпроводящего перехода ( $T_c \approx 80 \text{ К}$  при  $x = 1$  [1-4,6]). Интересно отметить, что в соединении  $\text{YBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$  обнаружены повышенные значения плотности критического тока  $j_c$  по сравнению с  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [8] за счет увеличения силы пиннинга. Изучение вопроса изоструктурности бариевой и стронциевой фаз, границ замещения этих катионов друг другом показало, что примесные фазы появляются в системе  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  при  $x > 1.0$  [5,6].

Как известно, в системе Y-123 температура сверхпроводящего перехода зависит от содержания кислорода и практически не изменяется при замещении Y магнитными редкоземельными ионами, за исключением Pr [9-11]. Среди соединений  $\text{ReBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  тщательное изучение влияния последовательного замещения Ba стронцием на сверхпроводящие свойства было проведено для  $\text{GdBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [12,13]. В нем было обнаружено более резкое понижение критической температуры  $T_c$  с ростом содержания стронция, чем в  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Подробно структурные свойства и температура сверхпроводящего перехода при замещении  $\text{Ba}^{2+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$  для соединений  $\text{ReBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$

<sup>1</sup> Институт физики Польской АН, Варшава.

исследованы в серии работ [14-17]. Было показано, что соединения  $\text{ReBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$  изоструктурны Y-123, за исключением  $\text{Re} = \text{Ce}, \text{Tb}$  и  $\text{Lu}$ , для которых фаза 123 не образуется [16].

Структура соединений зависит от ионного радиуса редкоземельного элемента. Для образцов  $\text{ReBaSrCu}_3\text{O}_x$  ( $x \approx 6.93$ ), у которых  $r_{\text{Re}} < r_{\text{Dy}}$ , решетка орторомбична, а для образцов, у которых  $r_{\text{Re}} > r_{\text{Dy}}$ , решетка тетрагональна [16]. На фазовой границе, т.е. у  $\text{DyBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , она может быть тетрагональной или орторомбической в зависимости от термообработки образца [16].

В настоящем исследовании изучены структурные, электрофизические и магнитные свойства синтезированных твердых растворов  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $x = 0.5, 1.0$ ).

## 1. Образцы и методика эксперимента

Соединения  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $x = 0.5, 1.0$ ) получались в результате взаимодействия в потоке кислорода окислов диспрозия и меди с нитратами бария и стронция при температуре 900–950°C с промежуточным перетиранием и брикетированием под давлением  $\sim 2$  ГПа. Из синтезированного таким образом порошка прессовали под давлением  $\sim 1 \div 1.2$  ГПа цилиндрические образцы, спекание которых осуществлялось в потоке кислорода в течение 15 h при температуре 950°C с последующим охлаждением до 410°C со скоростью 75 K/h, нагревом до 580°C, охлаждением до 420°C с той же скоростью и выдержкой при 420°C в течение 12 h.

Изменение кислородного индекса образцов осуществлялось путем термообработки в атмосфере воздуха при температурах 898, 650, 570°C в течение 3, 6, 7 h соответственно с последующей закалкой в жидкий азот. Величина индекса рассчитывалась по изменению веса образцов. В насыщенном кислородом при температуре 420°C образце кислородный индекс был  $\approx 6.90 \div 6.92$ , а в результате термообработки при температуре 898°C его величина уменьшалась до 6.3 для  $\text{DyBa}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и до 6.4 для  $\text{DyBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . При температуре 650°C кислородный индекс уменьшался до 6.63 и 6.66, а при температуре 570°C — до 6.75 и 6.76 соответственно.

Тип кристаллической решетки определялся методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-1.5 в медном излучении при комнатной температуре. По данным рентгеноструктурного анализа тип решетки в зависимости от содержания кислорода для систем  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  изменяется так же, как и у обычных соединений типа 123 и  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [3], т.е. образцы  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $x = 0.5, 1.0$ ) с  $\delta \approx 0.1$  имели орторомбическую структуру, а образцы с  $\delta > 0.5$  — тетрагональную структуру в отличие от  $\text{GdBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $\delta \approx 0.1$ ), у которого при  $x \approx 0.6$  происходит переход из орторомбической решетки в тетрагональную [12,14].

Однородность образца контролировалась методом рентгеноструктурного микроанализа на системе, состоящей из электронного микроскопа «Jeol ISX-35A» и приставки для EDX анализа «Link LN 85/S». Съемка проводилась при следующих параметрах: ускоряющее напряжение 20 kV, рабочее расстояние 13 mm, ток 1.5 mA, время накопления 100°C.

В качестве эталонов использовались следующие чистые вещества и соединения: на Cu—Cu, на Dy—DyPO<sub>4</sub>, на Ba—BaSO<sub>4</sub>, на Sr—SrTiO<sub>3</sub>. Анализ проводился по следующим линиям: CuK, DyK, BaL, SrL. Калибровалась система по K<sub>α1</sub> линии Ni.

Температурная зависимость электросопротивления измерялась на цилиндрических образцах (диаметром 2,4, длиной 6 мм, массой 0.15 г) по стандартной четырехзондовой схеме в диапазоне 4.2–300 К. При этом использовался компьютер для фильтрации сигнала и наполнения данных. Чувствительность измерительного блока ~ 1 μV.

Изучение магнитных свойств проводилось с помощью вибрационного магнитометра PAR-155, приспособленного для измерений в сверхпроводящем соленоиде.

При исследованиях в полях до 12 Т магнитное поле изменялось со скоростью ≈ 220 Ое/с. В полях до 0.8 Т она уменьшалась на порядок. При измерениях в меньших полях до 0.1 Т с целью определения критических полей H<sub>c1</sub> скорость протяжки изменялась от 0.015 до 1.2 Ое/с.

Данные анализа однородности двух образцов DyBa<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> с x = 0.5, 1.0 и δ ≈ 0.1 приведены в табл. 1. Оба образца имеют высокую однородность по кислороду: в пяти произвольно выбранных точках образца максимальное отклонение от среднего арифметического Δ ≤ 0.1%. Неоднородность по меди и диспрозию несколько больше: Δ<sub>Cu</sub> ≤ 2%, Δ<sub>Dy</sub> ≤ 3%. По барии в DyBa<sub>1.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> Δ<sub>Ba</sub> ≤ 1%, тогда как в DyBaSrCu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> Δ<sub>Ba</sub> ≤ 4%. Большая неоднородность имеет место по стронцию: в DyBa<sub>1.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> Δ<sub>Sr</sub> доходит до 7%, а в DyBaSrCu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub> достигает 10%. Возможно, это связано с тем, что ионный радиус Sr<sup>2+</sup> близок к ионным радиусам редкоземельных элементов. Стронций и по электроотрицательности близок к Re<sup>3+</sup>. Эти обстоятельства могут приводить к перемешиванию положений Sr<sup>2+</sup> и Re<sup>3+</sup> [14,16] и к локальным неоднородностям состава по Sr.

Таблица 1

Однородность состава образцов

Номер точки на образце	Концентрация, ат.%				
	Dy	Ba	Sr	Cu	O
DyBa <sub>1.5</sub> Sr <sub>0.5</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>6.9</sub>					
1	7.686	11.955	4.202	24.236	51.921
2	7.931	11.884	4.712	23.491	51.983
3	7.861	12.023	4.612	23.537	51.963
4	7.813	11.918	4.439	23.877	51.953
5	7.776	11.963	4.718	23.599	51.944
Среднее	7.813	11.949	4.537	23.748	51.953
DyBaSrCu <sub>3</sub> O <sub>6.9</sub>					
1	7.761	7.986	7.222	25.091	51.940
2	7.652	7.618	6.749	26.068	51.913
3	7.654	8.206	6.997	25.230	51.914
4	8.088	7.920	6.056	25.913	52.022
5	7.906	8.043	6.603	25.472	51.976
Среднее	7.812	7.955	6.725	25.555	51.953

## 2. Результаты и их обсуждение

Как показали наши исследования, магнитные свойства исследуемого соединения определяются парамагнитным моментом  $M_p$  образца, связанным с  $4f$ -электронами диспрозия  $Dy^{+3}$ , и диамагнитным моментом  $M_d$ , характерным для гранулярных ВТСП.

На рис. 1 представлены температурные зависимости магнитного момента  $M = M_p + M_d$  трех образцов  $DyBa_{2-x}Sr_xCu_3O_{6.9}$  с различным содержанием стронция. Выше температур сверхпроводящего перехода  $T_c = 92, 85, 73$  К для образцов с  $x = 0, 0.5, 1.0$  соответственно имеется только парамагнитный вклад в намагниченность. Он практически линейно нарастает при понижении температуры. Ниже  $T_c$  имеет место конкуренция парамагнитного вклада редкоземельной подрешетки и диамагнитного. В области низких температур намагниченность опять возрастает, что связано с антиферромагнитным упорядочением ионов  $Dy^{+3}$ , которое для  $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  наступает при  $T_N = 0.92 \pm 0.02$  К [18,19].

Из рис. 1 также видно, что рост содержания стронция ведет к деградации сверхпроводящих свойств, а именно к понижению температуры  $T_c$  и уменьшению диамагнитного вклада в намагниченность. При этом если для  $DyBa_2Cu_3O_{6.9}$  диамагнитный вклад является преобладающим вплоть до 4 К, то для  $DyBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{6.9}$  он ограничен областью температур 30–75 К. В соединении  $DyBaSrCu_3O_{6.9}$  суммарный магнитный момент является парамагнитным во всем диапазоне температур.

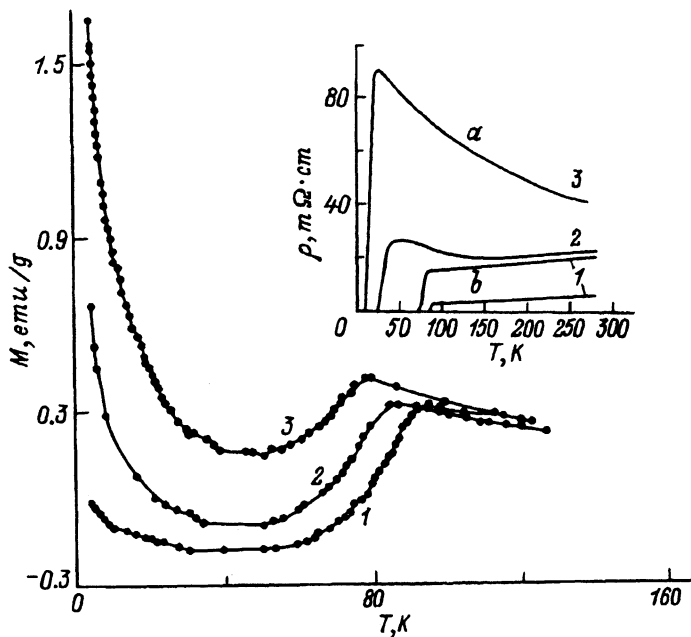


Рис. 1. Температурные зависимости магнитного момента  $M$  соединения  $DyBa_{2-x}Sr_xCu_3O_{6.9}$  в магнитном поле 0.14 Т при различном содержании Sr (1 —  $x = 0$ , 2 — 0.5, 3 — 1).

На вставке — зависимости сопротивления от температуры образцов  $DyBaSrCu_3O_{7-\delta}$  (а) и  $DyBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{7-\delta}$  (б) с разными значениями кислородного индекса  $\delta$ : 1 — 0.1, 2 — 0.24, 3 — 0.34.

Содержание кислорода, стронция, температуры  
сверхпроводящего перехода (начало —  $T_c^{on}$  и конец —  $T_c^{\rho=0}$ )  
и электросопротивление в системе  $DuBa_{2-x}Sr_xCu_3O_{7-\delta}$

Номер образца	$x$	$\delta$	$\rho_{300\text{ K}}, \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$	$T_c^{on}, \text{ K}$	$T_c^{\rho=0}, \text{ K}$
1	1.0	0.1	21	81.1	73
2	1.0	0.24	23	35.2	24.6
3	1.0	0.34	41	20.2	9.5
4	1.0	0.6	180	—	—
5	0.5	0.1	6.4	87.3	85.3

На вставке к рис. 1 представлены температурная зависимость электросопротивления образцов  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  (а) с различным содержанием кислородного индекса и образца  $DuBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{7-\delta}$  ( $\delta \approx 0.1$ ) (б). Соответствующие значения сопротивлений этих образцов при комнатной температуре приведены в табл. 2. Поведение сопротивления  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  при изменении кислородного индекса сходно с обычным для систем типа 123, в частности для соединения  $GdBaSrCu_3O_{7-\delta}$  с различным  $\delta$  [14].

Для образцов  $DuBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{7-\delta}$  и  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  с  $\delta \approx 0.1$  (вставка на рис. 1, кривые 1, 2) наблюдается ярко выраженное металлическое поведение вплоть до температур  $\approx 90$  и  $80$  К соответственно. При этом нулевое сопротивление достигается для первой системы при  $T^{\rho=0} = 85.3$  К, для второй — при  $T^{\rho=0} = 73.0$  К. Ширина сверхпроводящего перехода увеличивается с ростом содержания стронция.

Из сравнения данных измерений электросопротивления и магнитных свойств (рис. 1) видно, что температура, при которой магнитный момент  $M(H)$  начинает отклоняться от линейного парамагнитного хода, хорошо коррелирует с температурой  $T^{\rho=0}$ . Отметим, что в работе [15] для системы  $DuBaSrCu_3O_y$  ( $y = 6.93$  для орторомбической фазы и  $y = 6.94$  для тетрагональной фазы) нулевое сопротивление достигалось в первом случае при  $83$  К, а во втором случае — при  $80$  К.

Для образца  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  с  $\delta \approx 0.34$  (вставка на рис. 1, кривая 3) при понижении температуры сопротивление возрастает до  $T \approx 25$  К, а ниже  $20$  К уменьшается, достигая  $\rho = 0$  при  $T \approx 10$  К (что, по-видимому, свидетельствует о близости по кислородному индексу к переходу металл-диэлектрик). Для образцов  $DuBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{7-\delta}$  ( $\delta \approx 0.7$ ) и  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  ( $\delta \approx 0.6$ ) наблюдалось явно выраженное полупроводниковое поведение  $\rho(T)$  вплоть до  $4.2$  К. Значение электросопротивления образца  $DuBaSrCu_3O_{6.9}$  возрастает при низких температурах до  $\rho(4.2\text{ K}) \approx 7.9 \cdot 10^3 \Omega\cdot\text{cm}$ .

Отличие соединений  $ReBaSrCu_3O_{7-\delta}$  от обычных бариевых 123 состоит в более резкой зависимости температуры сверхпроводящего перехода от содержания кислорода и в исчезновении сверхпроводимости уже при  $\delta = 0.4$ . Это подтверждается нашими данными по исследованию  $DuBaSrCu_3O_{7-\delta}$  (табл. 2, [20]) и  $GdBaSrCu_3O_{7-\delta}$  [21], а также резуль-

татами работы [17], полученными для системы  $\text{ReBaSrCu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $\text{Re}=\text{Gd}, \text{Dy}, \text{Eu}$ ).

Величина электросопротивления наших образцов  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  несколько отличается от значений, приведенных в [15] для  $x = 1$  и [22] для других концентраций. Нам представляется, что причина этого расхождения может быть связана с особенностями их приготовления.

Как отмечалось ранее, при прессовании цилиндрических образцов использовалось давление 1–1.5 ГПа. При этом в образцах проявлялась текстура с ориентацией оси  $c$  кристаллитов вдоль оси цилиндра. Измерения электросопротивления сверхпроводящих монокристаллов  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , выполненные в [23], свидетельствуют о его анизотропии. При этом максимальное значение ( $\rho \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$  при комнатной температуре) достигается при измерении вдоль оси  $c$ . Такой порядок величины имеет сопротивление и наших образцов (табл. 2).

На рис. 2 для различных температур показано поведение магнитного момента  $M(H, T) = M_p(H, T) + M_d(H, T)$  соединения  $\text{DyBa}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  при сканировании магнитного поля.

В области температур ниже критической (рис. 2) на типичную полевою зависимость парамагнитного момента  $M_p(H)$  образца происходит наложение диамагнитного гистерезиса  $M_d(H)$ , характерного для жест-

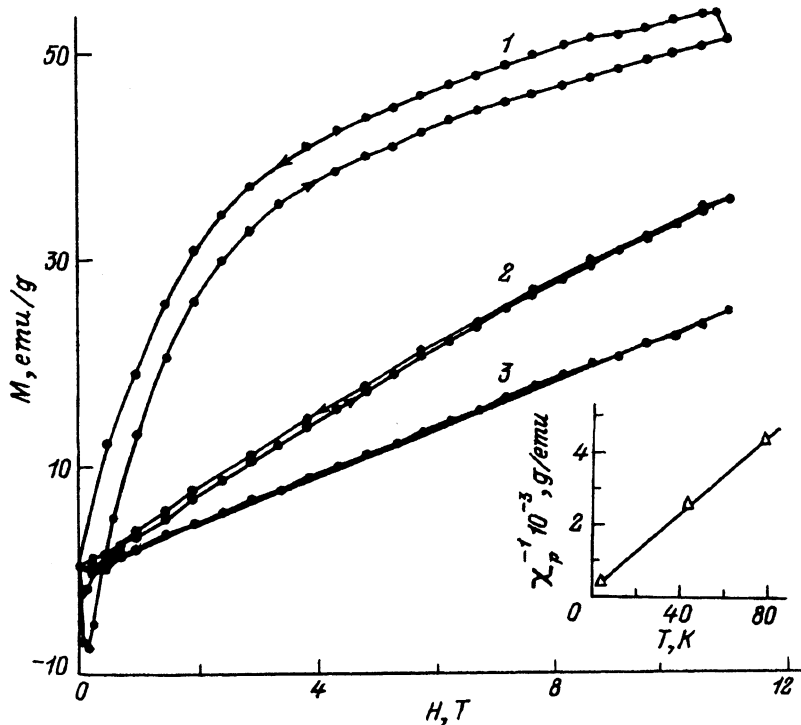


Рис. 2. Полевые зависимости магнитного момента  $\text{DyBa}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  при различных температурах.

На вставке — зависимость магнитной восприимчивости  $\chi_p$  от обратной температуры  $T^{-1}$ .  $T, \text{K}$ : 1 — 4.2, 2 — 42.6, 3 — 78.4.

ких сверхпроводников. Гистерезисные явления здесь повторяют особенности, наблюдаемые в  $\text{Dy-123}$  [24]. В сильных полях при гелиевых температурах кривая  $M_p(H)$  асимптотически приближается к насыщению.

Анализ поведения в слабом магнитном поле температурной зависимости парамагнитного вклада в восприимчивость  $\chi_p(T) = dM_p(T)/dH$ , результаты которого приведены на вставке в рис. 2, свидетельствует о выполнении закона Кюри-Вейсса  $\chi_p = C/(T - \Theta)$ . При этом из эксперимента получены значения постоянной Кюри  $C = 0.02 \text{emu}\cdot\text{K/g}$  и парамагнитной температуры  $\Theta = -4 \text{K}$  ( $C = 0.02 \text{emu}\cdot\text{K/g}$ ).

Замещение Ba на Sr (рис. 3) уменьшает диамагнитные свойства сверхпроводящих образцов в сильном и слабом (нижняя вставка) магнитном полях. Отсутствие влияния на полевую зависимость парамаг-

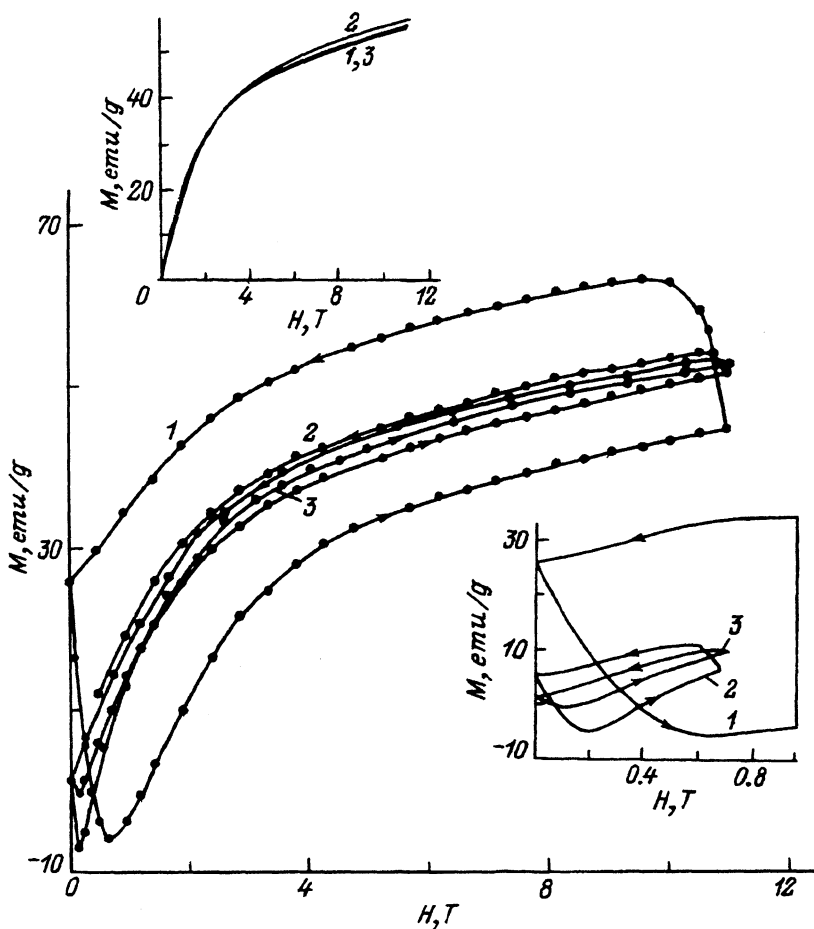


Рис. 3. Гистерезисная зависимость магнитного момента сверхпроводящих соединений  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  при 4.2 К при различном содержании стронция в сильном и слабом (нижняя вставка) магнитном полях.

На верхней вставке — полевые зависимости магнитного момента для несверхпроводящих образцов  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  с различной концентрацией Sr. Концентрация Sr на обеих вставках и основном поле рисунка  $x = 0$  (1), 0.5 (2), 1 (3).

нитного момента в несверхпроводящих соединениях, полученных изменением кислородного индекса  $\delta$  (верхняя вставка), свидетельствует о том, что намагниченность в большом поле определяется исключительно вкладом от редкоземельной подрешетки ионов  $Dy^{+3}$ .

Известно, что измерения намагниченности позволяют определить первое критическое поле по отклонению  $M(H)$  от линейной зависимости. В наших образцах в магнитных полях до 650 Oe (рис. 4) наблюдаются две характеристические точки. Первая точка обычно связывается с проникновением магнитного потока в межгранульное пространство, вторая — с началом проникновения потока внутрь гранул.

Определенная таким образом величина межгранульного критического поля  $H_{c1}^j$  при 4.2 K составила 22 Oe для  $DyBa_2Cu_3O_{6.9}$ , 13 Oe для  $DyBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{6.9}$  и 7 Oe для  $DyBaSrCu_3O_{6.9}$ , т.е. уменьшается практически линейно с ростом содержания стронция (верхняя вставка к рис. 4). Значение внутригранульного критического поля  $H_{c1}^g$ , наоборот, возрастает с увеличением содержания стронция, причем для  $DyBaSrCu_3O_{6.9}$  оно достигает 620 Oe. Полученные данные хорошо согласуются с результатами работы [15], где критическое поле имело значение 770 Oe для  $DyBaSrCu_3O_{6.93}$  в орторомбической модификации и 560 Oe для  $DyBaSrCu_3O_{6.94}$  в тетрафазе.

Температурные зависимости критических полей в соединении  $DyBa_{1.5}Sr_{0.5}Cu_3O_{6.9}$  представлены на нижней вставке к рис. 4. Для гранул экспериментальные точки  $H_{c1}^g$  при 40 и 75 K находятся существенно ниже стандартной кривой, рассчитанной по уравнению  $H_c(T) = H_{c1}(0) [1 - (T/T_c)^2]$ , и значительно лучше согласуются с линейной зависимостью. Такое же поведение  $H_{c1}^g(T)$  имело место и для керамических образцов  $GdBaCu_3O_{7-\delta}$  [25]. Что касается критического поля межзеренной среды  $H_{c1}^j$ , то здесь наблюдается хорошее согласие с расчетной кривой.

Экспериментальные результаты по исследованию поведения  $H_{c1}^g$  в монокристаллах  $YBaSrCu_3O_{7-\delta}$  [26–28] свидетельствуют о том, что  $H_{c1}^{||c}$  следует линейному закону, что трудно объяснить, считая не зависящей от температуры лондоновскую глубину проникновения  $\lambda(T)$  в ВТСП типа 123 при  $T \leq 50$  K. Как обсуждалось в [28,29], для слоистых систем учет эффекта близости приводит к соотношению  $H_{c1} \sim \Phi_0/\lambda\epsilon_p$  (вместо обычного  $H_{c1} \sim \Phi/\lambda^2$ ), где параметр  $\epsilon_p$ , характеризующий наведенную межслоевую сверхпроводимость, имеет сильный температурный ход в области низких температур.

С ростом содержания стронция увеличивается разность наклонов зависимости  $M(H)$  ниже  $H_{c1}^j$  и ниже  $H_{c1}^g$ . Это может свидетельствовать о том, что по мере замещения бария стронцием возрастает объем между гранулами (содержащий межгранульный материал и пустоты).

Действительно, используя данные о параметрах кристаллической решетки  $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  [18,19] и  $DyBaSrCu_3O_{7-\delta}$  [15] и значения плотности наших образцов (для первого  $\rho \approx 6.0$  г/см<sup>-3</sup>, для второго  $\rho \approx 4.56$  г/см<sup>-3</sup>), мы получили отношение плотности образцов относительно расчетной. Для  $DyBa_2Cu_3O_{6.9}$  это отношение равно  $\approx 0.85$ , а для  $DyBaSrCu_3O_{6.9} \approx 0.67$ . Возможно, что для улучшения этого соотношения в образцах со стронцием возникает необходимость опреде-



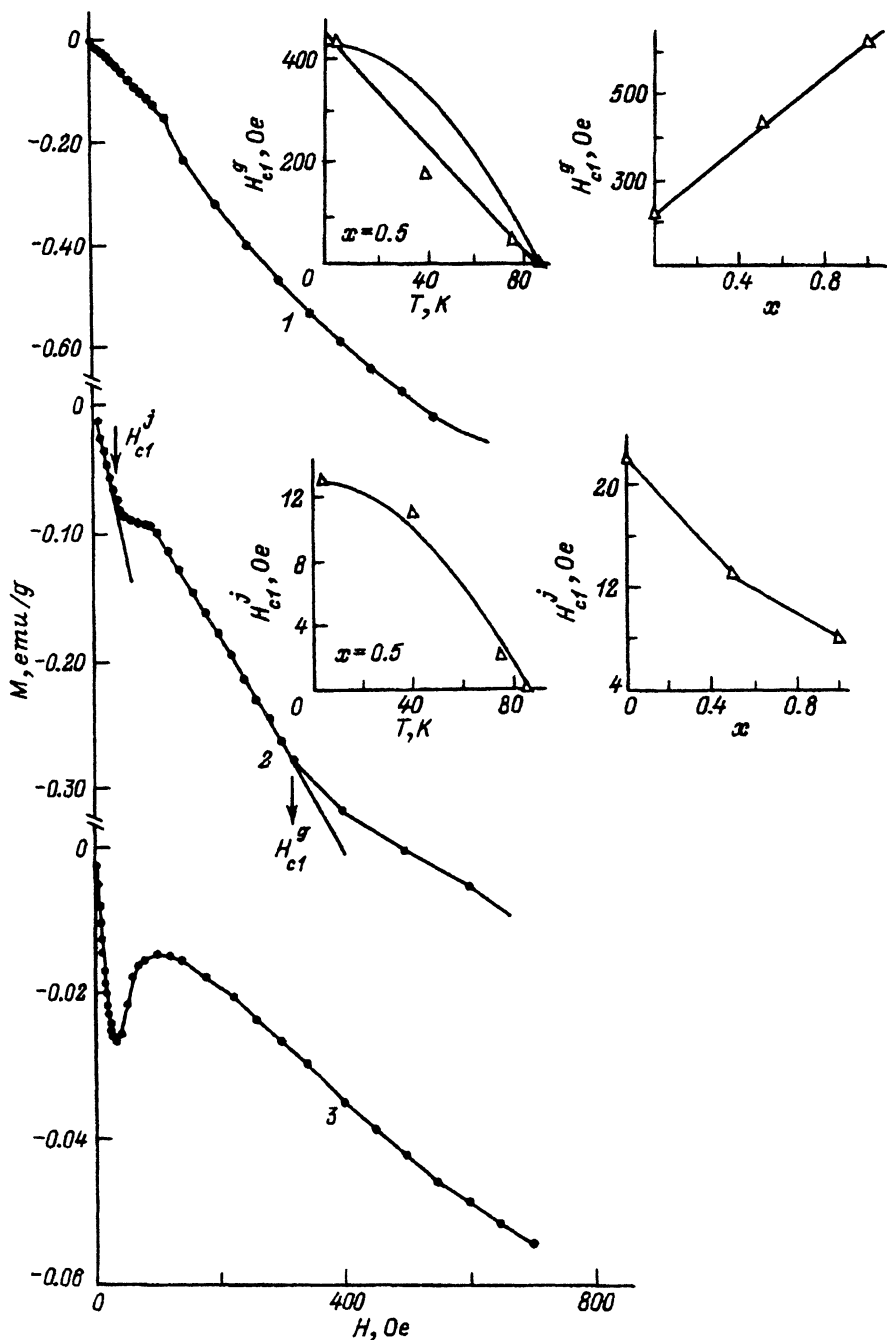


Рис. 4. Поведение магнитного момента системы  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  в слабом магнитном поле при различном содержании стронция. Температурные и концентрационные зависимости критических полей межзеренных связей  $H_{c1}^j$  (нижняя вставка) и гранул  $H_{c1}^g$  (верхняя вставка).

Точки — экспериментальные значения для  $\text{DyBa}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ , сплошная линия — расчет температурных зависимостей критических полей по формуле  $H_{c1}(T) = H_{c1}(0) [1 - (T/T_c)^2]$ .  $x = 0$  (1), 0.5 (2), 1 (3).

ления зависимости оптимальной температуры синтеза от содержания стронция, как это было сделано для системы  $\text{YBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  в [4].

Увеличение объема межгранульного пространства при росте содержания стронция может сказываться на слабых связях в ВТСП поликристаллических образцах и снижать величину критических токов.

Частичная подстановка стронция вместо бария приводит к нескольким взаимно связанным эффектам. Кроме уменьшения параметров кристаллической решетки (в большей степени вдоль  $c$ , чем по  $a$  и  $b$ ), ослабляется взаимодействие щелочноземельного металла и атомов кислорода  $\text{O}$  (2,3) [6]. В базисной плоскости возникает разупорядочение по кислороду из-за структурных деформаций, вызванных как подстановкой стронция вместо бария, так и перемешиванием между состояниями диспрозия и стронция, как это имело место в  $\text{GdBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  [14]. Частичное заселение бариевых состояний редкой землей, кроме дополнительных структурных деформаций, делает часть  $\text{Cu}$  (1) координированной более чем четырьмя ионами кислорода. Естественно, такое многоплановое воздействие на кислородно-медную систему сильно сказывается на сверхпроводящих свойствах — величине  $T_c$ , диамагнетизме, критическом токе.

Авторы выражают благодарность Н.А.Дорошенко за приготовление серии образцов  $\text{DyBa}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и Я.И.Южелевскому за проведение измерений электросопротивления на этих образцах.

#### Список литературы

- [1] Liang J.M., Chang L., Sung H.M., Wu P.T., Chen L.J. // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. N 7. P. 3593–3597.
- [2] Takeda Y., Kanno R., Yamamoto O., Takano M., Hiroi Z., Bando Y., Shimada M., Akinaga H., Takita K. // *Physica C*. 1989. V. 157. N 2. P. 358–364.
- [3] Wada T., Sakurai T., Suzuki N., Koryama S., Yamaguchi H., Tanaka S. // *Phys. Rev. B*. 1990. V. 41. N 16. P. 11209–11213.
- [4] Colben I., Vlasse M. // *Supercond. Sci. Technol.* 1992. V. 5. P. 231–235.
- [5] Пашин С.Ф., Антипов Е.В., Ковба Л.М. // *Сверхпроводимость*. 1990. Т. 3. № 10. С. 2386–2389.
- [6] Колесов Б.А., Алферова Н.И., Веснин Ю.И., Шубин Ю.В., Стариков М.А. // *Сверхпроводимость*. 1992. Т. 5. № 2. С. 314–318.
- [7] Veal B.W., Kwok W.K., Umezawa A., Grabtree G.W., Jorgensen J.D., Downey J.W., Nowicki L.I., Mitchell A.W., Paulikas A.P., Sowers C.H. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V 51. N 4. P. 279–281.
- [8] Worderweber R., Heinemann K., Freyhardt H.C. // *Physica C*. 1988. V. 153–155. P. 870–871.
- [9] Jorgensen J.D., Veal B.W., Kwok W.K., Grabtree G.W., Umezawa A., Nowicki L.J., Paulikas A.P. // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 36. N 10. P. 5731–5734.
- [10] Bewo M.A., Soderholm L., Capone D.W., Hinks D.G., Jorgensen J.D., Grace J.D., Shuller I.K., Segre C.U., Zhang K. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. N 1. P. 57–59.
- [11] Hor P.H., Meng R.L., Wang Y.Q., Gao L., Huang Z.J., Forster J.B.K., Chu C.W. // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. N 18. P. 1891–1894.
- [12] Currie D.B., Forrest A.M. // *Solid State Commun.* 1988. V. 66. P. 715–718.
- [13] Девятых Г.Г., Алексеевский Н.Е., Гусев А.В., Кабанов А.В., Митин А.В., Хлыбов Е.П.К. // *ДАН СССР*. 1990. Т. 313. № 2. С. 365–367.
- [14] Wang X.Z., Bauerle D. // *Physica C*. 1991. V. 176. P. 507–510.
- [15] Wang X.Z., Steger P.L., Reissner M., Steiner W. // *Physica C*. 1992. V. 196. P. 247–251.
- [16] Wang X.Z., Hellerbrand B., Bauerle D. // *Physica C*. 1992. V. 200. P. 12–16.
- [17] Yamaya K., Okajima Y., Yagi T., Domon M., Itoh F. // *Physica C*. 1991. V. 185–189. P. 1237–1238.
- [18] Nakazawa Y., Ishikawa M., Takabatane T. // *Physica B*. 1987. V. 148. N 1–3. P. 404–407.

- [19] Fisher P., Kakurai K., Steiner M., Clausen K.N., Lebeck B., Hulliger F., Ott H.R., Bruesch P., Unternahrer P. // *Physica C*. 1988. V. 152. N 1. P. 145-153.
- [20] Маркович В.И., Дорошенко Н.А., Дьяконов В.П., Левченко Г.Г., Фита И.М., Южелевский Ю.И. // *ФТТ*. 1993. Т. 35. № 3. С. 677-684.
- [21] Маркович В.И., Дьяконов В.П., Бойко Ф.А., Левченко Г.Г., Фита И.М. // *ФТТ*. 1994. Т. 36. № 6. С. 1672-1678.
- [22] Rosel J.M., Book G.W., Cunningham I., Glorioso C., Vlasse M., Golben J.P. // *Physica C*. 1993. V. 204. P. 384-388.
- [23] Веркин Б.И., Дмитриев В.М., Дикин Л.А., Космуна М.Б., Мицкевич В.В., Приходько О.Р., Прокопович С.Ф., Светлов В.Н., Семиноженко В.П., Христенко Е.В., Чурилов Г.Е. // *ФНТ*. 1988. Т. 14. № 2. С. 218-221.
- [24] Noguchi S., Okuda K., Sugiyama K., Vamagishi A., Date M. // *Physica B*. 1989. V. 155. P. 182-185.
- [25] Rogacki K., Sulkowski C. // *Modern Physics Letters*. 1992. V. 6. N 1. P. 41-48.
- [26] Ishikawa Y., Mori K., Kobayashi K., Sato K. // *Physica C*. 1988. V. 153-155. Pt II. P. 1471-1472.
- [27] Umezawa A., Grabtre G.W., Vandervoort K.G., Welp V., Kwok W.K., Lin J.Z. // *Physica C*. 1989. V. 162-164. P. 733-734.
- [28] Мошляков В.В., Марин С., Генри И.Ю., Россат-Минье Ж., Жаку Ж.Ф. // *Письма в ЖЭТФ*. 1991. Т. 53. № 3. С. 157-161.
- [29] Koyama T., Takezawa N., Tachiki M. // *Physica C*. 1990. V. 168. N 1/2. P. 69-78.

Донецкий физико-технический  
институт АН Украины

Поступило в Редакцию  
4 апреля 1994 г.