

Транспортные свойства композитов ВТСП + $\text{Ba}(\text{Pb}, \text{Met})\text{O}_3$ в зависимости от электрических и магнитных свойств несверхпроводящих ингредиентов

© М.И. Петров, Д.А. Балаев, С.В. Оспищев, К.С. Александров

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, 660036 Красноярск, Россия

E-mail: smp@iph.krasnoyarsk.su

(Поступила в окончательном виде 26 октября 1999 г.)

Приготовлены композиты, моделирующие сеть слабых металлических связей, состоящие из классического ВТСП со структурой 1–2–3 и металлооксида BaPbO_3 с внедренными в него примесями Sn, Ni и Fe. Приведены экспериментальные результаты резистивных, магнитных и мессбауэровских исследований несверхпроводящих компонентов $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$. Исследованы транспортные свойства композитов ВТСП + $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$. Наблюдается подавление сверхпроводящих свойств композитов как при уменьшении длины свободного пробега носителей в несверхпроводящих ингредиентах с примесями олова, так и вследствие дополнительного взаимодействия магнитных моментов примесей (Fe, Ni) со спином носителей сверхтока. Экспериментальные температурные зависимости критического тока композитов проанализированы в рамках теории де Жена для структур сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта молодых ученых Сибирского отделения РАН за 1998–1999 гг.

В работе [1] нами было экспериментально показано, что компоненты ВТСП + BaPbO_3 адекватны сети слабых $S-N-S$ -связей (S — сверхпроводник, N — нормальный металл) в "чистом" пределе. Действительно, длина свободного пробега l в BaPbO_3 существенно больше длины когерентности ξ_0 ВТСП, и этим объясняется успешное описание транспортных свойств этих композитов теорией [2], учитывающей в "чистом" пределе и туннелирование, и эффект близости, и андреевское отражение. Однако степень слабой связи в $S-N-S$ -структуре можно менять варьируя не только эффективную протяженность N -прослойки (что было предметом исследования в [1,3]), но и длину свободного пробега носителей в нормальном металле N .

Для низкотемпературных сверхпроводников в работе [4] детально исследовались зависимости критического тока $S-N-S$ -перехода как в зависимости от протяженности N -прослойки, так и от длины свободного пробега носителей в ней. Длина свободного пробега и характер взаимодействия примесь–куперовская пара изменялись внедрением примесей в N -металл, причем примеси были как немагнитные, так и парамагнитные. Было получено совпадение теории, построенной на базе БКШ с экспериментом, однако не были измерены и, естественно, не анализировались температурные зависимости критического тока.

По аналогии с работой [4] мы предприняли попытку провести подобное исследование в $S-N-S$ -структурах на основе ВТСП. К сожалению, отсутствие надежной технологии изготовления одиночных переходов заставило нас исследовать композиты ВТСП + нормальный металл. Как уже отмечалось, такие композиты адекватны сети слабых связей с некой функцией распределения по

геометрическим параметрам $S-N-S$ -переходов — звеньев этой цепи. Однако, если технология приготовления композитов выдержана с достаточной повторяемостью, логично ожидать воспроизводимости функции распределения и все изменения транспортных свойств связать со взаимодействием носителей сверхтока при туннелировании их через металл с различными примесями.

Специфические трудности, возникающие при синтезе композитов на основе ВТСП, частично рассмотрены в [1,3]. Одна из них — окисление N -металла — преодолена использованием металлооксида BaPbO_3 , который слабо взаимодействует (в химическом смысле) с ВТСП со структурой 1–2–3 [1,3]. В нашей предварительной работе [5] было показано, что внедрение примесей в BaPbO_3 приводит к заметному дополнительному редуцированию сверхпроводящих свойств сети $S-N-S$ -слабых связей в композитах ВТСП + BaPbO_3 .

В настоящей работе приведены подробные результаты экспериментального изучения влияния магнитных (Fe, Ni) и немагнитных (Sn) примесей, внедренных в BaPbO_3 на транспортные свойства композитов ВТСП + $\text{Ba}(\text{Pb}, \text{Met})\text{O}_3$.

1. Синтез и физические свойства несверхпроводящих ингредиентов

Несверхпроводящие компоненты композитов готовились из окислов BaO_2 , PbO , NiO , $\text{Fe}_2^{57}\text{O}_3$, $\text{Sn}^{119}\text{O}_2$ при 880°C по керамической технологии. Использование гематита, обогащенного по изотопу Fe^{57} на 90%, позволило контролировать растворимость железа в BaPbO_3 с помощью мессбауэровской спектроскопии (рис. 1). Видно, что после двухнедельного отжига с промежуточными по-

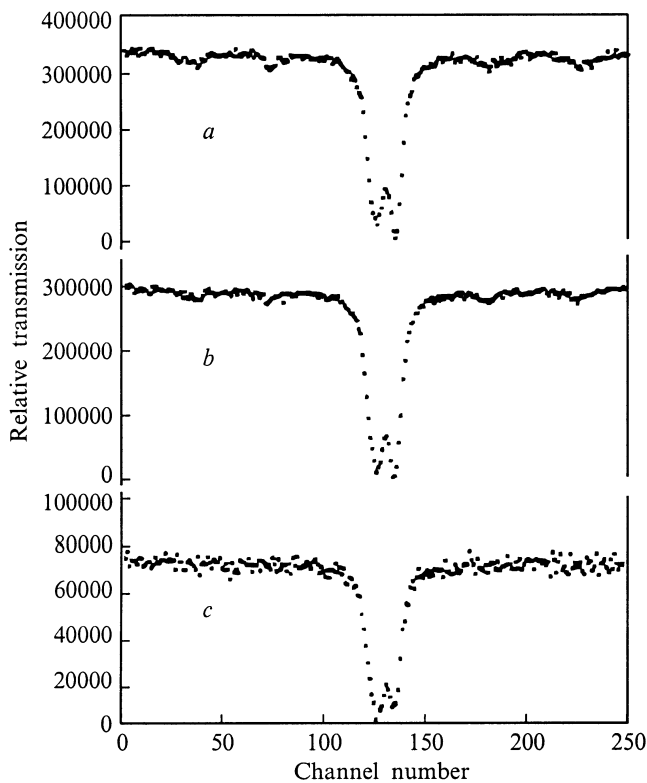


Рис. 1. Мессбауэровские спектры $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}^{57}\text{O}_3$. *a* — после первой недели синтеза, *b* — после второй недели синтеза, *c* — после третьей недели синтеза.

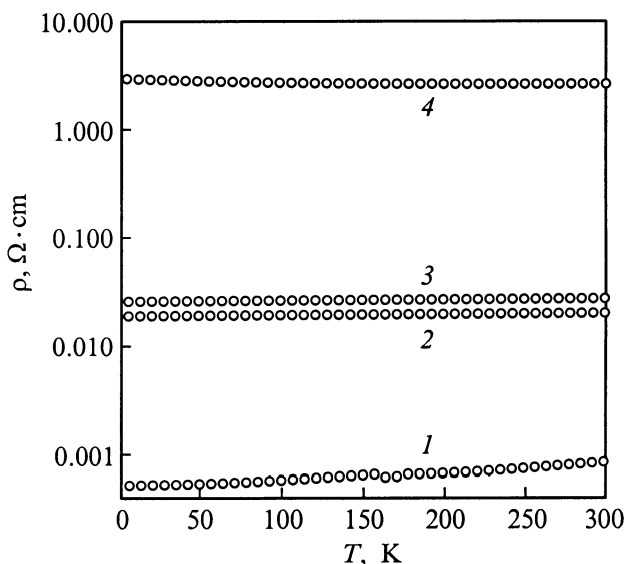


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\rho(T)$ несверхпроводящих компонентов композитов в полулогарифмическом масштабе. 1 — BaPbO_3 , 2 — $\text{BaPb}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_3$, 3 — $\text{BaPb}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$, 4 — $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$.

молами исчез шестилинейчатый спектр гематита $\text{Fe}_2^{57}\text{O}_3$, что указывает на его "растворение" в BaPbO_3 . Для надежности синтез был продлен еще на неделю. Синтез $\text{BaPb}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$ и $\text{BaPb}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_3$ был идентичен синтезу железосодержащего BaPbO_3 . "Растворение" олова в BaPbO_3 также контролировалось с помощью эффекта Мессбауэра по изотопу Sn^{119} . Отсутствие спектра, характерного для SnO_2 , свидетельствует о полном "растворении" олова в BaPbO_3 . Этот результат неудивителен, так как Sn^{4+} является электронным аналогом Pb^{4+} . Рентгеноструктурный анализ, проведенный на образцах $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$, показал фазу BaPbO_3 со структурой перовскита; никаких посторонних рефлексов в пределах точности рентгеноструктурного анализа обнаружено не было.

На рис. 2 приведены температурные зависимости удельного электросопротивления $\rho(T)$ образцов $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$ и BaPbO_3 , измеренные четырехзондовым методом. При частичном замещении свинца кривые $\rho(T)$ становятся слабозависящими от температуры (а для образца $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ наблюдается некоторое увеличение ρ при понижении T), а абсолютные значения ρ увеличиваются, в наибольшем случае — для примесей железа (см. таблицу). Это не противоречит классическому механизму взаимодействия носителей заряда с магнитными и немагнитными примесями [6].

Некоторые параметры несверхпроводящих ингредиентов композитов

| <i>N</i> -металл | μ, μ_0 | $\rho(5\text{K}), \Omega \cdot \text{cm}$ | $R_N, \Omega \cdot \text{cm}$ | $l, \text{Å}$ | T_{pb}, K |
|--|--------------|---|-------------------------------|---------------|--------------------|
| BaPbO_3 | — | 0.0005 | 0.0022 | > 100 | 0 |
| $\text{BaPb}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_3$ | — | 0.019 | 0.0089 | 4.4 ± 1.0 | 0 |
| $\text{BaPb}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$ | 0.13 | 0.026 | 0.0098 | 4.0 ± 0.5 | 20 ± 5 |
| $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ | 3.6 | 3.0 | 0.0524 | 4.0 ± 0.5 | 50 ± 5 |

Примечание. μ — магнитный момент, приходящийся на атом примеси, ρ — удельное электросопротивление, R_N — нормальное сопротивление композитов с соответствующими ингредиентами при $T = 4.2\text{K}$. Значения l и T_{pb} получены из условия наилучшего описания экспериментальных $J_C(T)$ композитов в рамках теории де Жена, см. п. 3.

На рис. 3 приведены результаты магнитных измерений образцов с примесями Ni и Fe. Измерения проводились на вибрационном магнетометре [7]. Сопоставлением экспериментальной кривой намагничивания $M(H)$ с функцией Бриллюэна были определены магнитные моменты, приходящиеся на один атом примеси. Наилучшая подгонка дает значения $3.6 \mu_B$ для ионов Fe и $0.13 \mu_B$ для ионов Ni (μ_B — магнетон Бора). Для ионов железа такое значение несколько ниже номинального для Fe^{4+} [8] в предположении, что катионы железа замещают катионы свинца в структуре BaPbO_3 . Что касается никеля, то можно предположить, что Ni также занимает позиции свинца в BaPbO_3 и его формальная валентность будет равна +4. В этом случае электронная конфигурация катиона Ni^{4+} была бы $3d^6$. При такой электронной

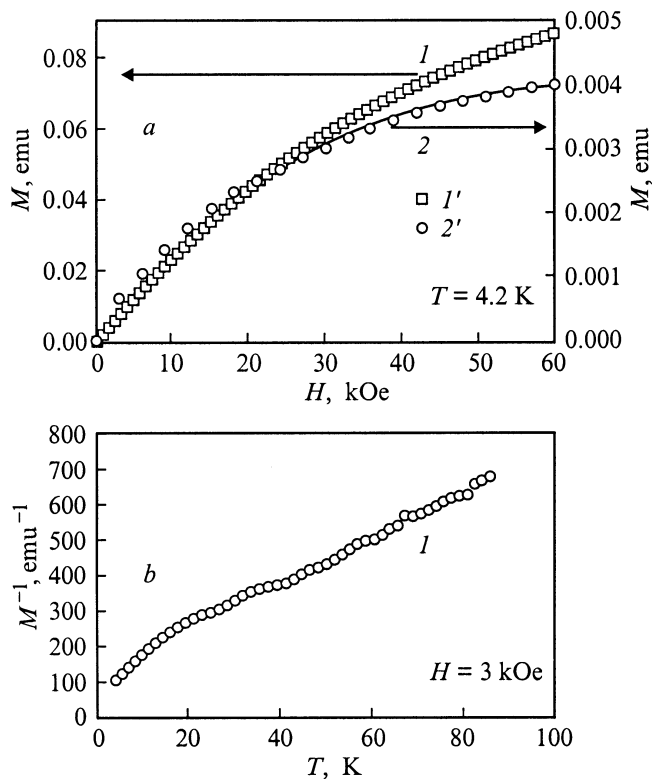


Рис. 3. Магнитные изменения несверхпроводящих компонентов композитов $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ ($m = 96$ mg) (1') и $\text{BaPb}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$ ($m = 112$ mg) (2'). *a* — полевые при $T = 4.2$ K, *b* — температурные (при $H = 3$ kOe) зависимости намагниченности M . Сплошные кривые — расчет по функции Бриллюэна при $J = 1$ для $\text{BaPb}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_3$ (1) и $J = 2$ для $\text{BaPb}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}\text{O}_3$ (2).

конфигурации низкоспиновое состояние (высокоспиновое состояние Ni^{4+} , судя по литературе [9], никем не наблюдалось) дает нулевое значение спинового магнитного момента. Однако экспериментальное значение равно $0.13 \mu_B$. Возможной причиной ненулевого магнитного момента Ni может быть ковалентное подмешивание в $3d$ -уровни никеля. Таким образом, и для железа, и для никеля, находящихся в металлооксиде, наблюдается отклонение магнитного момента от номинального, что контрастирует с магнитодиэлектриками, для которых это согласие гораздо лучше [8].

Намагниченность образцов падает с ростом температуры практически по закону $1/T$, что указывает на парамагнетизм соединений (рис. 3). Отсутствие гистерезиса на полевых зависимостях свидетельствует в пользу этого утверждения. Отклонение от линейного закона в области низких температур на зависимости $M^{-1} = f(T)$ приводит к необходимости учета парных обменных взаимодействий, однако настоящая работа посвящена изучению не деталей магнетизма этих соединений, а влиянию магнитных центров рассеяния на транспортные свойства композитов с этими соединениями.

2. Приготовление и транспортные свойства композитов ВТСП + Ва(Pb, Met)O₃

Синтез сверхпроводящего ингредиента композитов — $\text{Y}_{0.75}\text{Lu}_{0.25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ — был проведен по стандартной керамической технологии. Композиты были приготовлены методом быстрого спекания [1,3]. Тщательно перемешанные ингредиенты будущих композитов в пропорции 85 vol.% ВТСП и 15 vol.% $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$ (Met = Sn, Ni, Fe) прессовались в виде таблеток, помещались на предварительно разогретые лодочки и вносились в печь, разогретую до температуры 950°C , на 5 min. Поскольку при такой температуре ВТСП со структурой 1–2–3 неизбежно теряет кислород, для восстановления стехиометрии по кислороду композитные образцы переносились из "высокотемпературной" печи в другую печь с температурой 400°C , где они выдерживались в течение 6 h, что достаточно для насыщения кислородом [1].

Для выяснения влияния примесей различного сорта, находящихся в несверхпроводящем компоненте, на транспортные свойства композитов полученные результаты сопоставлялись с данными, измеренными на "реперном" композите без примесей в BaPbO_2 .

Рентгеноструктурный анализ, проведенный на композитах, показал наличие только двух фаз — ВТСП со структурой 1–2–3 и перовскита. Посторонних рефлексов в пределах точности рентгеноструктурного анализа обнаружено не было.

Обозначим композитные образцы как $S + 15N$, $S + 15N(\text{Sn}10)$, $S + 15N(\text{Ni}10)$, $S + 15N(\text{Fe}10)$. Здесь S — сверхпроводник, N — BaPbO_3 без примесей, $N(\text{Sn}10)$, $N(\text{Ni}10)$, $N(\text{Fe}10)$ — $\text{BaPb}_{0.9}\text{Met}_{0.1}\text{O}_3$ при Met = Sn, Ni, Fe соответственно.

Зависимости намагниченности от температуры $M(T)$ композитов, измеренные в поле 200 Oe, показали нали-

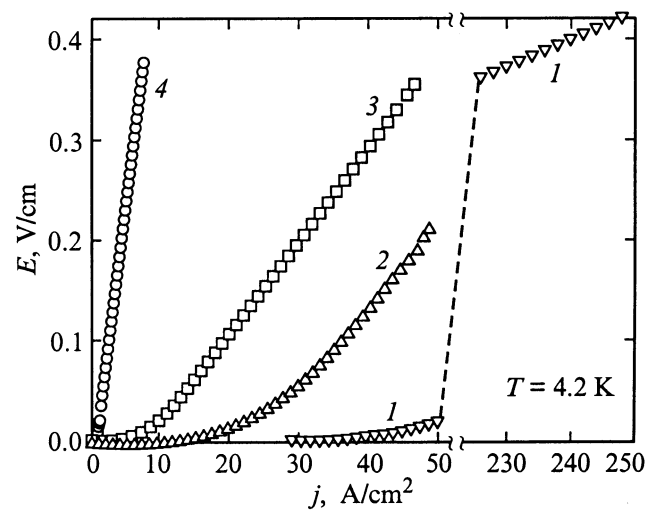


Рис. 4. Экспериментальные ВАХ композитных образцов при $T = 4.2$ K. 1 — $S + 15N$, 2 — $S + 15N(\text{Sn}10)$, 3 — $S + 15N(\text{Ni}10)$, 4 — $S + 15N(\text{Fe}10)$.

чие одной сверхпроводящей фазы при температуре ниже 93.5 К. Вид зависимостей $M(T)$ подобен приведенным в работе [10] $M(T)$ композитов ВТСП + ВаРbO₂.

Рис. 4 иллюстрирует влияние различного сорта примесей в ВаРbO₃ на вольт-амперные характеристики (ВАХ) композитов при $T = 4.2$ К. ВАХ измерялись четырехзондовым методом, для эффективного отвода тепла образец помещался непосредственно в гелиевую ванну (подробнее см. в [11,12]). ВАХ на рис. 4 характеризуются избыточным током, что характерно для $S-N-S$ -структур [13]. В таблице приведены значения нормального сопротивления композитов R_N , определенные из линейного участка ВАХ при $T = 4.2$ К. Корреляция значений ρ ингредиентов и R_N очевидна.

Температурные зависимости электросопротивления $R(T)$ композитов, измеренные четырехзондовым методом при транспортном токе $\sim 0.01 \times J_c(5 \text{ К})$ ($J_c(5 \text{ К})$ — критический ток при 5 К), приведены на рис. 5 в нормированном виде. Резкий скачок электросопротивления при 93.5 К соответствует переходу в сверхпроводящее состояние ВТСП-гранул в композите. Незменность этой температуры для всех композитных образцов указывает на отсутствие диффузии химических элементов из несверхпроводящих ингредиентов в ВТСП-кристаллиты. Плавный "хвост" зависимостей $R(T)$ ниже 93.5 К определяется наличием слабых связей [1,3,10,14–16]. Характерная температура, при которой сопротивление композитного образца становится равным нулю, зависит от характера примеси, внедренной в ВаРbO₃ (рис. 5). На кривой $R(T)$ композитов с магнитными примесями имеется протяженный по температуре участок ниже T_c ВТСП-гранул, в котором сопротивление слабо изменяется с последующим переходом в сверхпроводящее состояние. Подобное поведение $R(T)$ на-

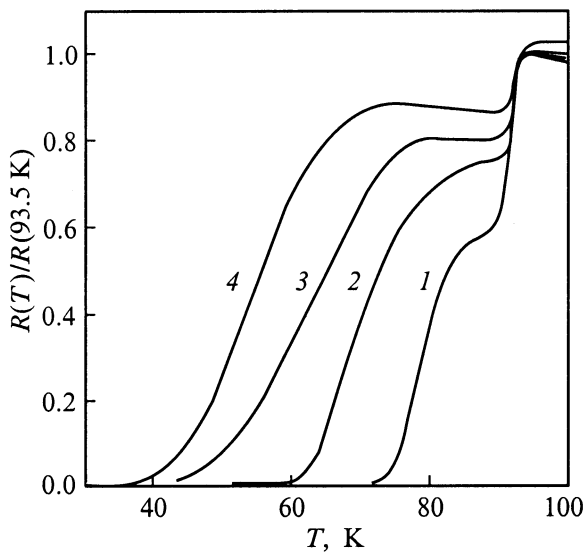


Рис. 5. Экспериментальные температурные зависимости электросопротивления образцов. 1 — $S + 15N$, 2 — $S + 15N(\text{Sn}10)$, 3 — $S + 15N(\text{Ni}10)$, 4 — $S + 15N(\text{Fe}10)$.

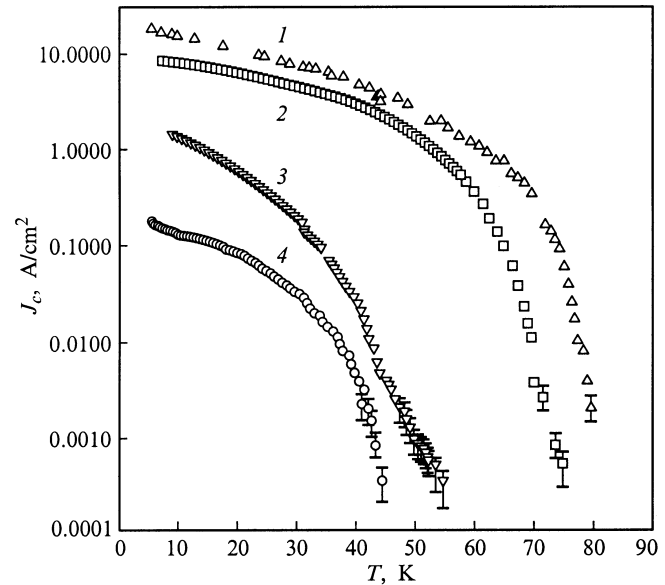


Рис. 6. Экспериментальные температурные зависимости плотности критического тока композитов в полулогарифмическом масштабе. 1 — $S + 15N$, 2 — $S + 15N(\text{Sn}10)$, 3 — $S + 15N(\text{Ni}10)$, 4 — $S + 15N(\text{Fe}10)$.

блюдалось на сэндвичах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Ag}$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с ферромагнитной прослойкой [14] и также на композитах ВТСП + диэлектрик CuO с магнитными центрами рассеяния (Ni) [15]. По-видимому, взаимодействие пар носителей с магнитными моментами в прослойках ответственно за такое поведение.

Температурные зависимости критической плотности тока $J_c(T)$ композитов, измеренные четырехзондовым методом по стандартному критерию $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ [17] (методика подробно описана в работах [1,10]), приведены на рис. 6. Отметим некоторые особенности экспериментальных зависимостей $J_c(T)$. Хотя вид кривых остается примерно одинаковым для всех образцов, абсолютные значения $J_c(5 \text{ К})$ композитов сильно зависят от характера примеси (Sn, Ni, Fe), коррелируя с данными по электросопротивлению. При высоких температурах экспериментальные значения $J_c(T)$ становятся исчезающе малыми и при конечной плотности измерительного тока ($\sim 0.01 \times J_c(5 \text{ К})$) появляется ненулевое падение напряжения (рис. 5, 6).

3. Анализ температурных зависимостей критического тока композитов ВТСП + Ва(Pb, Met)O₃

Анализ зависимостей $J_c(T)$ композитов ВТСП + ВаРbO₃ [1,10] показал, что композитный образец можно охарактеризовать некой средней геометрической протяженностью слабой связи d . Для образцов с 15 vol.% ВаРbO₃ эта величина, оцененная по теории [2],

составила $\sim 100 \text{ \AA}$. Естественно ожидать, что для композитов с примесями в ВаРbO₃, приготовленных по такой же технологии и с тем же содержанием несверхпроводящего ингредиента, величина d будет той же.

К сожалению, в настоящее время еще не существует микроскопической теории применительно к температурной зависимости критического тока для перехода от "чистого" ($l > d_{\text{eff}}$, где d_{eff} — эффективная протяженность слабой связи [18]) предела к "грязному" ($l \ll d_{\text{eff}}$ [18]), подобно тому, как это было сделано для ВАХ $S-N-S$ -контактов [19,20]. Поэтому мы приведем результаты обработки экспериментальных кривых $J_c(T)$ в рамках теории эффекта близости де Жена [21].

При температурах, не слишком далеких от T_c , критический ток $S-N-S$ -контакта в теории де Жена, согласно [17,22,23], определяется выражением

$$J_c(T) = C(1 - T/T_c)^2 \frac{d/\xi_N}{\sinh(d/\xi_N)}, \quad (1)$$

где C — константа, которая зависит от геометрии контакта, а в случае трехмерной сети джозефсоновских контактов с некой функцией распределения геометрических параметров играет роль нормировочного множителя; d — геометрическая протяженность N -прослойки, в случае композитов эта величина является эффективной; ξ_N — длина когерентности в N -металле или глубина проникновения пар в N -металл, определяющаяся для "грязного" N -металла как [17,22]

$$\xi_N = (\hbar V_f l / 6\pi k_B T)^{1/2}, \quad (2)$$

где \hbar — постоянная Планка, k_B — константа Больцмана, V_f — фермиевская скорость в N -металле. Если N -прослойка является "чистым" металлом, то ξ_N не зависит от длины свободного пробега и определяется как [22]

$$\xi_N = \hbar V_f / 2\pi k_B T. \quad (3)$$

При описании экспериментальных $J_c(T)$ подгоночными параметрами являются d и l ; кроме того, необходимо знать V_f . Лучшее согласие эксперимента с теорией было достигнуто при значении $V_f \approx 1.8 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, полученном из соотношения $V_f = \hbar 3^{1/3} \pi^{2/3} n^{1/3} m^{-1}$ (m — масса электрона) при $n = 1.4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ для ВаРbO₃ по данным работы [24]¹.

Кривая, удовлетворительно описавшая экспериментальную зависимость $J_c(T)$ образца $S + 15N$ (кривая 1 на рис. 7) в области температур 55–80 К, вычислена по формулам (3) и (1) при $d = 100 \text{ \AA}$.

В случае немагнитных примесей расчетная зависимость вычислена по выражениям (2) и (1). Мы добились наилучшего согласия эксперимента для образца

¹ В случае замещения Sn → Pb из-за того что внешняя электронная конфигурация олова та же, что у свинца, для изменения n мало оснований. Изменение n при замещении никелем и железом, видимо, будет не больше, чем для ВаРb_{1-x}BiO₃ [24-26] и (ввиду слабости зависимости $V_f(n) \sim n^{1/3}$) незначительно скажется на результатах подгонки в таблице.

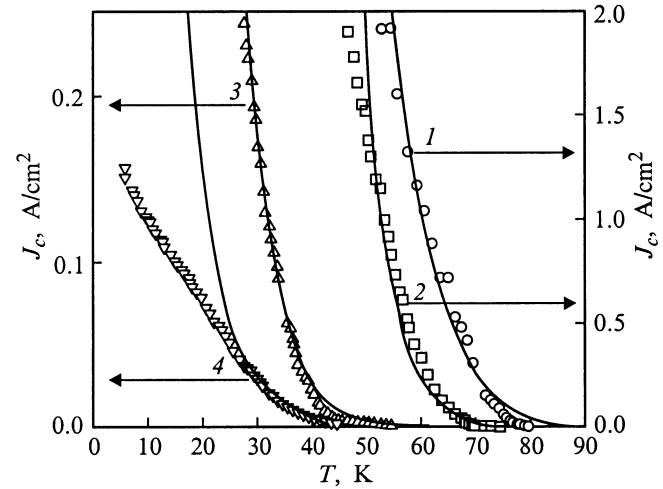


Рис. 7. Температурные зависимости критического тока. 1 — $S + 15N$, 2 — $S + 15N(\text{Sn}10)$, 3 — $S + 15N(\text{Ni}10)$, 4 — $S + 15N(\text{Fe}10)$. Сплошные кривые — подгоночные, построены по теории де Жена, см. текст и таблицу.

$S + 15N(\text{Sn}10)$ (кривая 2, рис. 7) и теории в области высоких температур (15–20 К ниже температуры, при которой значения $J_c(T)$ становятся практически равными нулю), варьируя величину длины свободного пробега в выражении (2). Наилучшее согласие было достигнуто при удивительно малом значении $4.4 \pm 1 \text{ \AA}$. Но простой расчет показывает, что при концентрации олова $x = 0.125$ наиболее вероятное расстояние между центрами рассеяния (атомами Sn) в ВаРb_{1-x}Sn_xO₃ будет равно постоянной решетки — 4.268 \AA , а при $x = 0.1$ это расстояние составит $4,6 \text{ \AA}$, что близко к полученной оценке l .

Формально можно воспользоваться теорией де Жена и для обработки $J_c(T)$ образцов с магнитными примесями в ВаРbO₃, но очевидно (на рис. 7 эти зависимости находятся в области более низких температур), что получатся величины длин свободного пробега, существенно меньшие постоянной решетки, что нефизично. Это — следствие того, что в стандартной теории де Жена нет механизма взаимодействия куперовских пар с магнитными моментами N -прослойки. Авторы работы [22] предложили, на наш взгляд, оригинальный выход, а именно среднее время жизни пары внутри N -прослойки τ модифицируется и, согласно [22], будет равно

$$\tau = \tau + \tau_{pb} = (\hbar / 2\pi k_B)(1/T + 1/T_{pb}). \quad (4)$$

(Обозначения соответствуют работе [22]). Влияние этого механизма на критический ток заключается в подстановке $T + T_{pb}$ вместо T в формулу (3). Кривые 3 и 4 на рис. 7, являющиеся наилучшей подгонкой к $J_c(T)$ образцов $S + 15N(\text{Ni}10)$ и $S + 15N(\text{Fe}10)$ соответственно, рассчитаны по выражениям (1), (2), (4) при параметрах, указанных в таблице.

При низких температурах наблюдается значительное расхождение эксперимента и теории де Жена, проиллюстрированное на рис. 7 для образца $S + 15N(Fe_{10})$. Это наблюдалось и другими авторами [22,23], что неудивительно, поскольку, как уже отмечалось выше, теория эффекта близости развита для области высоких температур [21,22].

Обобщая результаты, полученные в данной работе, отметим, что магнитные примеси ухудшают транспортные свойства композитов в большей степени, чем немагнитные. Причем это подавление сильнее в случае, когда примесями являются атомы железа с гораздо большим, чем у атомов никеля, магнитным моментом. Для композитов с примесью олова в $BaPbO_3$ ухудшение сверхпроводящих свойств можно связать только с уменьшением длины свободного пробега носителей в N -слое. В случае композитов с магнитными примесями в $BaPbO_3$ такое редуцирование сверхпроводящих свойств связано с наличием еще одного добавочного механизма разрушения куперовских пар на магнитных моментах примесей вследствие обменного взаимодействия [4].

Этот эффект разрушения куперовских пар примесями может быть связан с неупругими процессами, такими, как магнитное рассеяние в обычных сверхпроводниках s -типа. Однако в сверхпроводниках d -типа сильное упругое рассеяние может также приводить к эффекту разрушения пар, как указано в работе [23].

Авторы благодарны А.Д. Балаеву за помощь в проведении магнитных измерений и обсуждение результатов работы, О.А. Баякову за мессбауэровские измерения, А.Д. Васильеву за рентгеноструктурный анализ. Мы также благодарим проф. Кюммеля (Prof. Kümmel, Universität Würzburg, Germany) за интерес к работе. Одни из авторов (Д.А. Балаев) благодарен проф. Никольскому (Prof. Nicolisky, Instituto de Fisica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil) за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] M.I. Petrov, D.A. Balaev, S.V. Ospishchev, K.A. Sgaihutdinov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Phys. Lett. **A237**, 85 (1997).
- [2] U. Gunsenheimer, U. Schüssler, R. Kümmel. Phys. Rev. **B49**, 6111 (1994).
- [3] М.И. Петров, Д.А. Балаев, С.В. Оспищев, К.А. Шийхутдинов, Б.П. Хрусталеv, К.С. Александров. ФТТ **39**, 3, 418 (1997).
- [4] J. Neimeyer, G. von Minngerode. Z. Phisic **B36**, 57 (1979).
- [5] M.I. Petrov, D.A. Balaev, S.V. Ospishchev, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Physica **C282–287**, 2447 (1997).
- [6] А.А. Абрикосов. Введение в теорию нормальных металлов. Наука, М. (1972). 432 с.
- [7] А.Д. Балаев, Ю.В. Бояршинов, М.М. Карпенко, Б.П. Хрусталеv. ПТЭ **3**, 167 (1985).
- [8] С. Крупичка. Физика ферритов и родственных им окислов. Т. 1. Мир, М. (1976). 353 с.
- [9] F.A. Cotton, G. Wilkinson. Advanced Inorganic Chemistry. Vol. 1–3. Jonh Wiley & Song, N. Y.–London–Sidney (1966).
- [10] М.И. Петров, Д.А. Балаев, Б.П. Хрусталеv, К.С. Александров. СФХТ **8**, 1, 53 (1995).
- [11] M.I. Petrov, S.N. Krivomasov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Solid Stat. Commun. **82**, 453 (1992).
- [12] M.I. Petrov, D.A. Balaev, D.M. Gohfeld, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihudtinov, K.S. Aleksandrov. Physica **C314**, 51 (1999).
- [13] G.E. Blonder, M. Tinkham, T.M. Klapwijk. Phys. Rev. **B25**, 4515 (1982).
- [14] G.C. Xiong, G.J. Lian, J.F. Kang, Y.F. Hu, Y. Zhang, Z.Z. Gan. Physica **C282–287**, 693 (1997).
- [15] М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, С.Г. Овчинников. ФТТ **40**, 8, 1599 (1998).
- [16] A. Gerber, T. Grenet, M. Cyrot, J. Beille. Phys. Rev. Lett. **65**, 3201 (1990).
- [17] А. Бароне, Дж. Патерно. Физики и применение эффекта Джозефсона. Мир, М. (1984). 639 с.
- [18] К.К. Likharev. Rev. Mod. Phys. **51**, 1, 101 (1979).
- [19] R. Kümmel, B. Huckestein, R. Nicolisky. Solid Stat. Commun. **65**, 1567 (1988).
- [20] R. Kümmel, U. Gunsenheimer, R. Nicilsky. Phys. Rev. **B42**, 3932 (1990).
- [21] P.G. De Gennes. Rev. Mod. Phys. **36**, 225 (1964).
- [22] L. Antogonazza, S.J. Berkowitz, T.H. Geballe, K. Char. Phys. Rev. **B51**, 13, 8560 (1995).
- [23] K. Char. Physica **C282–287**, 419 (1997).
- [24] K. Kitazawa, A. Katsui, A. Toriumi, S. Tanaka. Solid Stat. Commun. **52**, 459 (1984).
- [25] T.D. Thanh, A. Koma, S. Tanaka. Appl. Phys. **22**, 205 (1980).
- [26] Д.П. Моисеев, С.К. Уварова, М.Б. Феник. ФТТ **23**, 8, 2347 (1981).