

Транспортные и магнитные свойства композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3Fe_5O_{12}$, представляющих сеть слабых связей джозефсоновского типа сверхпроводник–ферритмагнетик–сверхпроводник

© К.А. Шайхутдинов, Д.А. Балаев, С.И. Попков, М.И. Петров

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

E-mail: smp@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 25 февраля 2003 г.)

Синтезированы композиты $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3Fe_5O_{12}$ с различным объемным соотношением исходных ингредиентов, моделирующие сеть джозефсоновских переходов $S-F-S$, где S — сверхпроводник, F — ферритмагнетик. Исследованы транспортные характеристики композитов и обнаружено, что ниже температуры сверхпроводящего перехода T_C температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ делятся на два участка некоторой температурой T_m . Ниже T_m вольт-амперные характеристики композитов нелинейны, а в интервале $T_C - T_m$ значения $\rho(T)$ не зависят от величины транспортного тока j и магнитного поля H . Такой вид $\rho(T, j)$, $\rho(T, H)$ объяснен особенностями туннелирования носителей сверхпроводящего тока через ферритмагнитные прослойки, разделяющие гранулы ВТСП в композите. С помощью магнитных измерений обнаружено уменьшение диамагнитного отклика от гранул ВТСП в композитах с ферритмагнетиком.

Работа поддержана совместным грантом ККФН-РФФИ „Енисей“ № 02-02-97711 и грантом Лаврентьевского конкурса молодежных проектов СО РАН за 2002 г.

Двухфазные композитные материалы на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) представляют интерес как с практической [1–8], так и с научной точки зрения [2,3,5,6,9–14]. Последнее связано с рассмотрением таких объектов, как сети слабых связей джозефсоновского типа. Второй, несверхпроводящий, компонент композита (диэлектрик, полупроводник, нормальный металл) выполняет роль искусственно созданной слабой связи между гранулами ВТСП. Изменяя соотношение объемных концентраций исходных ингредиентов в таких композитах, можно в широких пределах варьировать эффективную протяженность (или „силу“) слабой связи.

Очевидно, что одиночный джозефсоновский контакт был бы идеальным объектом для исследования, однако малая длина когерентности и сильная химическая активность высокотемпературных сверхпроводников затрудняют изготовление и изучение таких структур. Однако, как было показано ранее [10,11,14,15], транспортные характеристики (температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ и критического тока $j_C(T)$, вольт-амперные характеристики (ВАХ)) двухфазных композитных материалов на основе ВТСП отражают основные особенности протекания носителей сверхтока по одиночному джозефсоновскому контакту с некоторой эффективной протяженностью, а относительная простота приготовления таких материалов делает их привлекательными объектами для исследования и возможного практического применения [7,8].

Недавно нами были изучены транспортные свойства композитов с магнитными примесями в несверхпроводящем компоненте (ВТСП + $Cu_{1-x}Ni_xO$ ($0 < x < 0.06$)) [15],

ВТСП + $BaPb_{0.9}Fe_{0.1}O_3$, ВТСП + $BaPb_{0.9}Ni_{0.1}O_3$ [16]) и обнаружено сильное подавление сверхпроводящих свойств таких композитов из-за взаимодействия спинов носителей сверхтока с магнитными моментами при их переносе через несверхпроводящую прослойку. При изучении транспортных свойств композитов ВТСП + парамагнитный диэлектрик ($NiTiO_3$) [17,18] помимо сильного подавления сверхпроводящих свойств было также обнаружено аномальное поведение температурных зависимостей электросопротивления. В диапазоне от температуры начала сверхпроводящего перехода ВТСП-гранул T_C до некоторой температуры T_m значения электросопротивления не зависят от величины транспортного тока и приложенного магнитного поля (ВАХ линейны), и только ниже T_m являются функцией этих величин, что характерно для слабых связей джозефсоновского типа. Такое аномальное поведение температурных зависимостей электросопротивления композитов ВТСП + $NiTiO_3$ объяснялось обменным взаимодействием спинов носителей сверхтока с магнитными моментами никеля в парамагнитной фазе. Это приводит к аномалии температурных зависимостей электросопротивления при температуре плавления решетки абрикосовских вихрей в гранулах ВТСП [17,18].

Следующим шагом в изучении композитов с магнитоактивными несверхпроводящими компонентами стало изучение композитов ВТСП + ферритмагнетик. В настоящее время одиночные структуры $S-F-S$ (S — сверхпроводник, F — ферро- или ферритмагнетик) интенсивно изучаются как теоретически [19–26], так и экспериментально [27–29], поскольку в них наблюдаются интересные эффекты, такие как немонотонная зависи-

мость критического тока от температуры [25], проявление π -связей [19,24,25], редуцирование сверхпроводящих свойств и характерные зависимости магнитосопротивления [27]. Из ряда ферро- и ферромагнитных веществ нами было выбрано соединение $Y_3Fe_5O_{12}$ (классический железо-иттриевый гранат), которое является диэлектриком, достаточно слабо взаимодействующим с ВТСП-структурой 1-2-3. Для выяснения влияния ферромагнитного упорядочения диэлектрической прослойки на транспортные свойства композитов нами также синтезированы и изучены „реперные“ композиты ВТСП + $Y_3Al_5O_{12}$, поскольку соединение $Y_3Al_5O_{12}$ структурно с $Y_3Fe_5O_{12}$ и немагнитно.

1. Эксперимент

Поликристаллический ВТСП состава $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ готовился по стандартной керамической технологии. Несверхпроводящие компоненты композитов — $Y_3Fe_5O_{12}$ и $Y_3Al_5O_{12}$ — были синтезированы из Y_2O_3 и Fe_3O_4 , $Al(OH)_3$ соответственно при температуре $1250^\circ C$ в течение 48 h с тремя промежуточными помолками. Далее исходные компоненты будущих композитов, взятые в нужной пропорции, тщательно перетирались в агатовой ступке, а затем прессовались в таблетки. Таблетки помещались на предварительно разогретые лодочки и вносились в печь, разогретую до $910^\circ C$ на 2 min. Затем они помещались в другую печь при $t = 350^\circ C$ на 3 h и охлаждались вместе с печью. Таким методом быстрого спекания [11] были приготовлены композитные образцы с различным объемным содержанием ВТСП и несверхпроводящих компонентов $Y_3Fe_5O_{12}$ и $Y_3Al_5O_{12}$. Обозначим наши композитные материалы следующим образом: $S + V YIG$ и $S + V YAIG$, где S — ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$, V — объемная концентрация $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) или $Y_3Al_5O_{12}$ (YAIG).

Измерения транспортных характеристик ($\rho(T)$, ВАХ) проводились стандартным четырехзондовым методом. Значение критического тока определялось из начального участка ВАХ по стандартному критерию $1 \mu V/cm$ [30]. При измерениях транспортных характеристик в магнитных полях до 500 Oe использовался медный соленоид, в полях, больших 500 Oe, — сверхпроводящий соленоид. Транспортный ток через образец j был перпендикулярен магнитному полю H . Магнитные измерения проводились на автоматизированном вибрационном магнитометре [31].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Тестирование композитов. Рентгеноструктурные измерения приготовленных композитных образцов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3Fe_5O_{12}$, $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3Al_5O_{12}$ показали наличие только двух фаз: со структурой 1-2-3 и структурой граната; посторонних рефлексов обнаружено не было

(в пределах точности рентгеноструктурного анализа). Относительные интенсивности рефлексов от фаз $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ и $Y_3Fe_5O_{12}$, $Y_3Al_5O_{12}$ соответствовали объемному содержанию исходных ингредиентов в композитах. Измерения температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ композитов показали, что температура начала сверхпроводящего перехода T_C для всех образцов одинакова и составляет $93.5 K$, что совпадает с T_C исходного ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$. Величина диамагнитного отклика уменьшается по мере увеличения объемного содержания несверхпроводящего компонента ($Y_3Fe_5O_{12}$, $Y_3Al_5O_{12}$) в композите. Таким образом, на основании рентгеноструктурных и магнитных измерений можно заключить, что композитные материалы на основе ВТСП, приготовленные методом быстрого спекания, действительно представляют собой двухфазные материалы, в которых отсутствуют фазы посторонних соединений.

2.2. Транспортные свойства композитов. На рис. 1 представлены зависимости электросопротивления $\rho(T)$ композитных образцов в температурном интервале $4.2-300 K$. Скачкообразное уменьшение сопротивления при $T_C = 93.5 K$ соответствует переходу в сверхпроводящее состояние гранул ВТСП. Выше температуры перехода зависимости $\rho(T)$ имеют квазиполупроводниковый характер. Отношение $\rho(93.5 K)/\rho(300 K)$ увеличивается по мере роста объемного содержания несверхпроводящего компонента в композитах. Такое поведение зависимостей $\rho(T)$ указывает на то, что транспортный ток протекает как по гранулам ВТСП, так и по несверхпроводящим гранулам.

Ниже T_C вид зависимостей $\rho(T)$ определяется переходом в сверхпроводящее состояние сети слабых связей джозефсоновского типа [10,11,14–18]. Для „реперных“ композитов ВТСП + $Y_3Al_5O_{12}$ эта часть $\rho(T)$ характеризуется сильной зависимостью от транспортного тока j и внешнего магнитного поля H . На рис. 2 показаны зависимости $\rho(T, j)$ (рис. 2, а) и $\rho(T, H)$ (рис. 2, б) для образца $S + 15 YAIG$. Из рис. 2 видно, что температура T_{C0} , при которой удельное сопротивление ρ становится исчезающе малым ($< 10^{-6} \Omega \cdot cm$), уменьшается по мере увеличения транспортного тока j и магнитного поля H . Такой характер зависимостей $\rho(T, j)$, $\rho(T, H)$ является типичным для сети слабых связей джозефсоновского типа сверхпроводник–диэлектрик–сверхпроводник ($S-I-S$) и наблюдался ранее на композитных образцах ВТСП + CuO [10], ВТСП + $MgTiO_3$ [17], при этом он объяснялся в рамках механизма термоактивационного проскальзывания фазы (TAPS) [32] и механизма термоактивационного течения вихрей [33]. Вид $\rho(T, j)$ для изучаемых композитов ВТСП + диэлектрик $Y_3Al_5O_{12}$ также описывается в рамках указанного механизма TAPS [32], однако такой анализ выходит за рамки данной работы.

Ширина резистивного перехода ΔT_{C0} джозефсоновских слабых связей $S-I-S$ -типа в зависимости от приложенного магнитного поля H , согласно модели

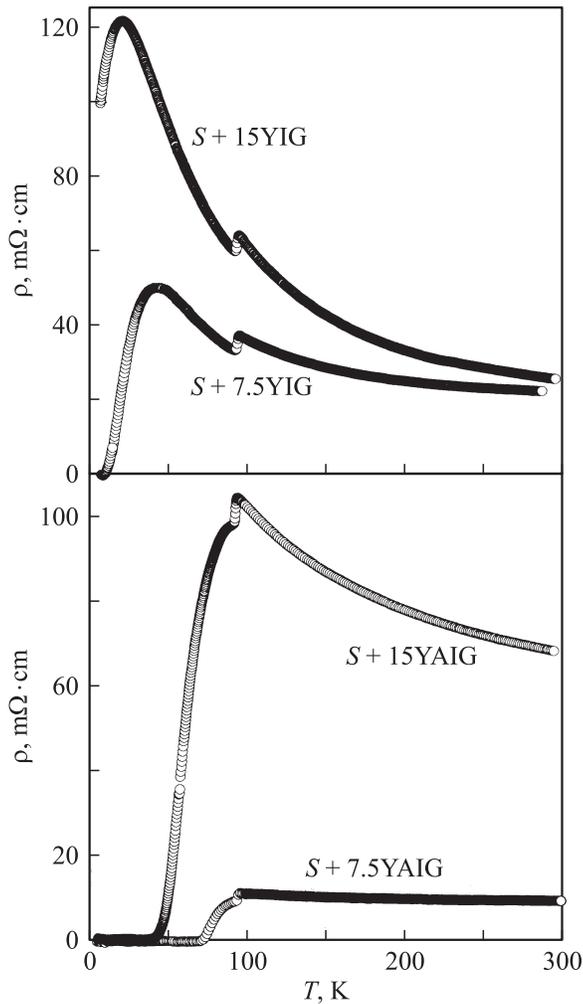


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности $\rho(T)$ образцов ВТСП + $Y_3Fe_5O_{12}$ и ВТСП + $Y_3Al_5O_{12}$ в интервале 4.2–300 К.

термоактивационного течения вихрей [33], определяется как $\Delta T_{C0} = T_{C0}(H = 0, R = 0) - T_{C0}(H, R = 0)$ и пропорциональна $H^{2/3}$. Такая зависимость наблюдалась экспериментально на поликристаллических ВТСП [33] и композитных материалах ВТСП + CuO [10]. На вставке к рис. 2 представлена зависимость $\Delta T_{C0} = T_{C0}(H = 0, R = 0) - T_{C0}(H, R = 0)$ от $H^{2/3}$ для образцов $S + 7.5YAIG$ и $S + 15YAIG$. Видно, что данные зависимости близки к линейным в области полей до 300 Ое. Таким образом, магниторезистивные свойства „реперных“ композитов ВТСП + $Y_3Al_5O_{12}$ имеют такой же характер, как и свойства композитов ВТСП + диэлектрик [10] и поликристаллических ВТСП [33].

Совершенно иная картина транспортных свойств наблюдается для композитов ВТСП + ферритмагнетик (рис. 3,4). Ниже температуры сверхпроводящего перехода T_C гранул $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ (93.5 К) существует температурный интервал, в котором зависимо-

сти электропроводности имеют полупроводниковый характер, продолжающий ход $\rho(T)$ выше T_C . Сильная зависимость электропроводности ρ от транспортного тока j и от магнитного поля H , характерная для сети слабых связей джозефсоновского типа, наблюдается только ниже некоторой температуры T_m . Величина T_m зависит от объема концентрации ферритмагнетика в композите, т.е. от эффективной протяженности слабой связи в композитах [10,11]. Для образца $S + 15YIG$ значение $T_m \approx 40$ К, для $S + 7.5YIG$ $T_m \approx 55$ К, для $S + 3.75YIG$ $T_m \approx 65$ К. ВАХ образцов линейны в области $T_C - T_m$ (рис. 5). Образец $S + 15YIG$ не имеет критического тока j_C при $T = 4.2$ К. Для образца $S + 7.5YIG$ $j_C(4.2 \text{ К}) = 0.025 \text{ A/cm}^2$, для $S + 3.75YIG$ $j_C(4.2 \text{ К}) = 1.12 \text{ A/cm}^2$. Сверхпроводящие свойства композитов ВТСП + ферритмагнетик сильно подавляются относительно малыми значениями транспортного тока и магнитного поля. Так, температурные зависимости электропроводности $\rho(T)$ образца $S + 15YIG$ (рис. 4) при некотором пороговом значении транспортного тока $j_{cr} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ ($H = 0$) либо порого-

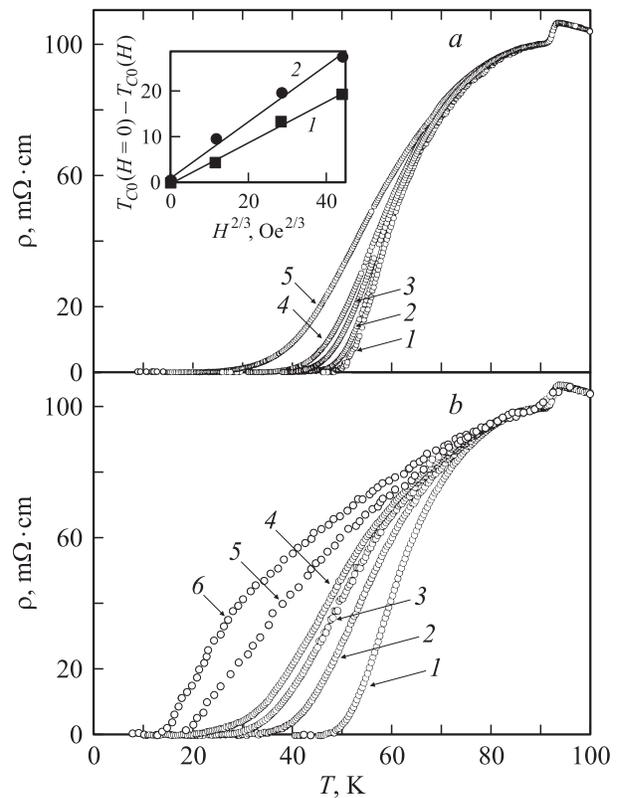


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности $\rho(T)$ образцов ВТСП + 15 vol.% $Y_3Al_5O_{12}$ ($S + 15YAIG$) при различных значениях транспортного тока j (a) и приложенного магнитного поля H (b). a) $j, \text{ mA/cm}^2$: 1 — 3.4, 2 — 34, 3 — 170, 4 — 340, 5 — 1000. b) $H, \text{ Oe}$: 1 — 0, 2 — 37, 3 — 150, 4 — 292, 5 — 2000, 6 — 60000; измерительный ток $j = 3.4 \text{ mA/cm}^2$. На вставке — зависимости $\Delta T_{C0} = T_{C0}(H = 0) - T_{C0}(H)$ при $R = 0$ от $H^{2/3}$ для образцов $S + 7.5YAIG$ (1) и $S + 15YAIG$ (2).

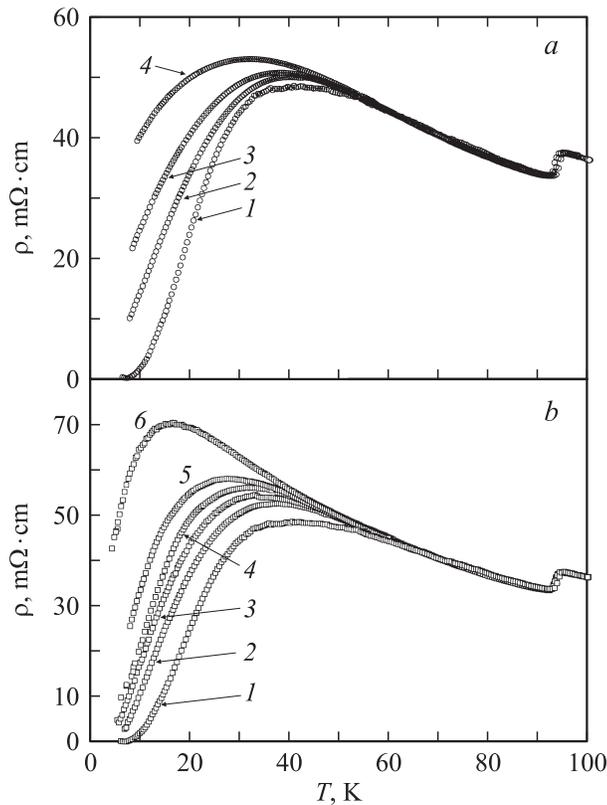


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ образца ВТСП + 7.5 vol.% $Y_3Fe_5O_{12}$ ($S + 7.5$ YIG) при различных значениях транспортного тока j (a) и приложенного магнитного поля H (b). a) $j, mA/cm^2$: 1 — 10, 2 — 50, 3 — 130, 4 — 510. b) H, Oe : 1 — 0, 2 — 40, 3 — 80, 4 — 150, 5 — 290, 6 — 2100; измерительный ток $j = 10 mA/cm^2$.

вом значении внешнего магнитного поля $H_{cr} = 1900$ Oe (плотность измерительного тока $j = 0.015 A/cm^2$) продолжают полупроводниковый ход, наблюдающийся в интервале $T_m - T_C$.

Таким образом, композиты ВТСП + ферромагнетик имеют совершенно иные транспортные свойства, чем „реперные“ композиты ВТСП + немагнитный диэлектрик $Y_3Al_5O_{12}$. Данные, приведенные на рис. 1, 3, 4, указывают на то, что в сети джозефсоновских переходов ВТСП + ферромагнетик нелинейность ВАХ наблюдается только в температурном интервале ниже температуры T_m , тогда как для „реперных“ композитов ВТСП + $Y_3Al_5O_{12}$ ВАХ остаются нелинейными вплоть до T_C .

Данный эффект, по мнению авторов, не может возникнуть из-за влияния функции распределения по толщине несверхпроводящих границ и технологии приготовления композитов, поскольку магниторезистивные свойства „реперных“ композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + Y_3Al_5O_{12}$ успешно описываются в рамках механизмов TAPS [32] и термоактивационного течения вихрей [33]. Кроме того, можно отметить, сходство полученных нами результатов с данными работы [27] по изучению одиночных джозеф-

соновских переходов сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник, где в качестве сверхпроводника выступал ниобий, а в качестве ферромагнетика — гадолиний. Зависимости $\rho(T)$ одиночного джозефсоновского перехода Nb/Al/Gd/Al/Nb, полученные в [27], также имеют два различных участка ниже T_C ниобия (≈ 7.6 K), разделенных некоторой температурой T_m . При температурах ниже T_m ВАХ нелинейны, в интервале $T_C - T_m$ значения $\rho(T)$ не зависят от величины приложенного транспортного тока j . Значения температуры T_m составляют ≈ 5.2 K при толщине Gd 4 nm и ≈ 4 K при толщине Gd 8 nm.

В настоящей работе мы предлагаем два возможных объяснения необычных транспортных свойства композитов ВТСП + ферромагнетик.

В недавних работах [17,18] необычный вид зависимостей $\rho(T, j)$, $\rho(T, H)$ композитов ВТСП + парамагнитный диэлектрик $NiTiO_3$ был качественно объяснен на основе гипотезы о формировании решетки абрикосовских вихрей в гранулах ВТСП. Действительно, магнитоактивный компонент композита индуцирует некоторое эффективное поле, которое проникает в виде абрикосовских вихрей в гранулы ВТСП на джозефсоновскую

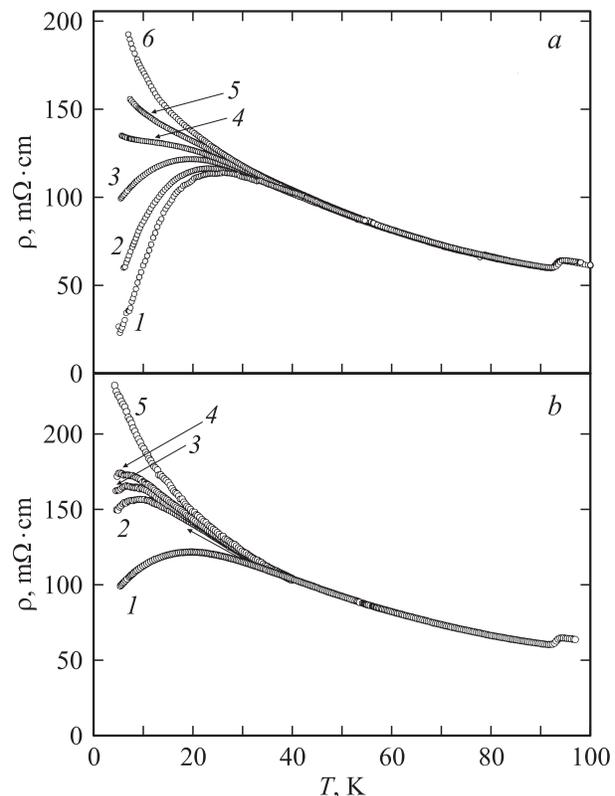


Рис. 4. Температурные зависимости электросопротивления $\rho(T)$ образца ВТСП + 15 vol.% $Y_3Fe_5O_{12}$ ($S + 15$ YIG) при различных значениях транспортного тока j (a) и приложенного магнитного поля H (b). a) $j, mA/cm^2$: 1 — 1.5, 2 — 7.7, 3 — 15, 4 — 77, 5 — 150, 6 — 600. b) H, Oe : 1 — 0, 2 — 40, 3 — 80, 4 — 150, 5 — 1900; измерительный ток $j = 15 mA/cm^2$.

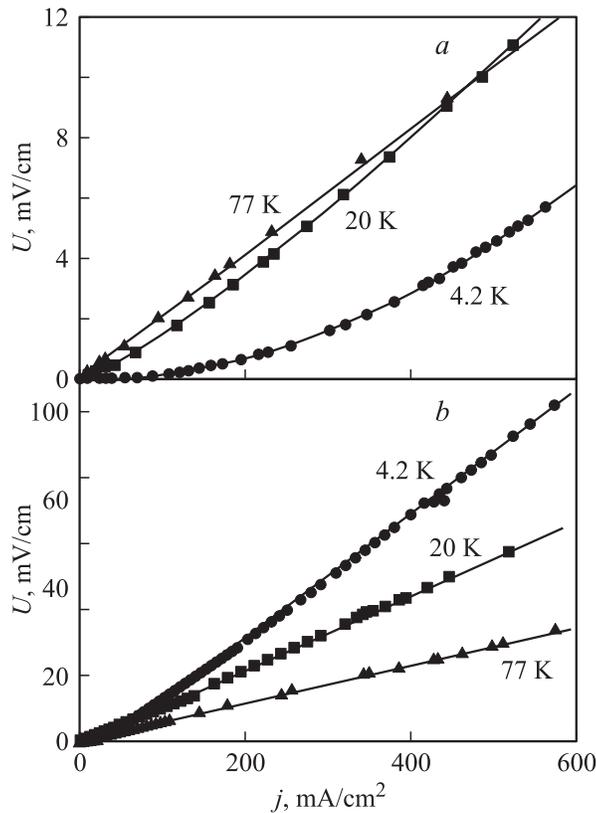


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики образцов $S + 7.5 \text{ YIG}$ (a) и $S + 15 \text{ YIG}$ (b) при различных температурах.

глубину проникновения ($\sim 1000 \text{ \AA}$ [34]). Величина этого поля на интерфейсе ВТСП/ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ приблизительно равна эффективному полю (10^6 Oe для $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [35]). Транспортный ток, протекая по композиту, с неизбежностью течет как по гранулам ВТСП, так и по ферритмагнетика. Соответственно ток будет протекать также по области ВТСП-гранул, в которых образовались абрикосовские вихри. Если предположить, что наблюдаемая нами температура T_m есть температура плавления решетки абрикосовских вихрей, данная гипотеза может объяснить необычный характер зависимостей $\rho(T)$ композитов ВТСП + ферритмагнетик. В температурном интервале $T_C - T_m$ вихри двигаются без пиннинга, сопротивление не зависит от величины транспортного тока и магнитного поля. При температурах ниже T_m вихри пиннинуются внутри гранул ВТСП, что приводит к нелинейному виду ВАХ [36]. Увеличение объемной концентрации ферритмагнетика в композите соответствует увеличению площади границ ВТСП/ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, что приводит к росту числа абрикосовских вихрей и понижению температуры T_m .

Второе возможное объяснение полученных результатов заключается в следующем. В работе [21] теоретически изучался стационарный эффект Джозефсона с упорядоченными магнитными моментами, локализованными в барьере. Согласно [21], при некоторой критической толщине барьера джозефсоновский сверхток

становится равным нулю из-за рассеяния куперовских пар на магнитных моментах в барьере. С другой стороны, механизм TAPS [32] объясняет экспериментально наблюдаемое исчезновение критического тока для $S-I-S$ -структуры при температурах, близких к температуре перехода сверхпроводящих берегов, из-за температурных флуктуаций напряжения на контакте. Подстановка $I_1 = 0$ (I_1 — критический ток $S-I-S$ -контакта в отсутствие тепловых флуктуаций) в выражение для ВАХ из модели TAPS [32] приводит к линейной зависимости $U(I)$. Исчезновение критического тока I_1 в сети $S-F-S$ -джозефсоновских контактов, предсказанное теоретически [21] для одиночного контакта, приводит к трансформации ВАХ от линейных к нелинейным при температуре T_m . Таким образом, теория [21] и механизм TAPS [32] могут качественно объяснить вид зависимостей $\rho(T)$ композитов ВТСП + ферритмагнетик. К сожалению, оценка T_m из теории [21] дает слишком грубое значение, поскольку случай ферритмагнитного упорядочения там не рассматривался. Более того, результаты для ВТСП и низкотемпературных сверхпроводников могут отличаться, на что указывалось в работе [25].

2.3 Магнитные свойства композитов ВТСП + ферритмагнетик. На рис. 6 приведены полевые зависимости намагниченности $M(H)$ образцов с одинаковым объемным содержанием несверхпроводящих компонентов — $S + 15 \text{ YIG}$ (справа) и $S + 15 \text{ YAlG}$ (слева) — в температурном интервале 4.2–100 К. Петли гистерезиса образца с $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ являются типичными для ВТСП [34]. Зависимости $M(H)$ образца с $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ представляют собой суперпозицию петель гистерезиса от сверхпроводника и ферритмагнетика, что хорошо видно для зависимостей $M(H)$ при $T = 61$ и 100 K (рис. 6). Таким образом, магнитные измерения дополнительно указывают на наличие в композите только двух фаз: $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ и $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$.

На рис. 7 выделены зависимости диамагнитного отклика $M(H)$ при $T = 4.2 \text{ K}$ только от фазы ВТСП в композитах $S + 15 \text{ YIG}$ и $S + 15 \text{ YAlG}$. Для того чтобы получить диамагнитный отклик от фазы ВТСП в композите с ферритмагнетиком, из интегральной кривой $M(H)$ (рис. 6, $T = 4.2 \text{ K}$) вычитался отклик от фазы ферритмагнетика $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с учетом от температурной зависимости $M(T)$. Из рис. 7 видно, что диамагнитный отклик от ВТСП-фазы в композите с ферритмагнитным диэлектриком ($S + 15 \text{ YIG}$) оказался меньше такового от ВТСП-фазы в композите с немагнитным диэлектриком ($S + 15 \text{ YAlG}$). Поскольку технология приготовления и объемные концентрации ингредиентов композитов в обоих случаях одинаковы, такое уменьшение диамагнитного отклика можно объяснить подавлением сверхпроводящих свойств в приповерхностном слое ВТСП-гранул из-за влияния ферритмагнетика. Действительно, магнитоактивный компонент композита $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ индуцирует некоторое магнитное поле, проникающее внутрь ВТСП-гранул и редуцирующее их свойства.

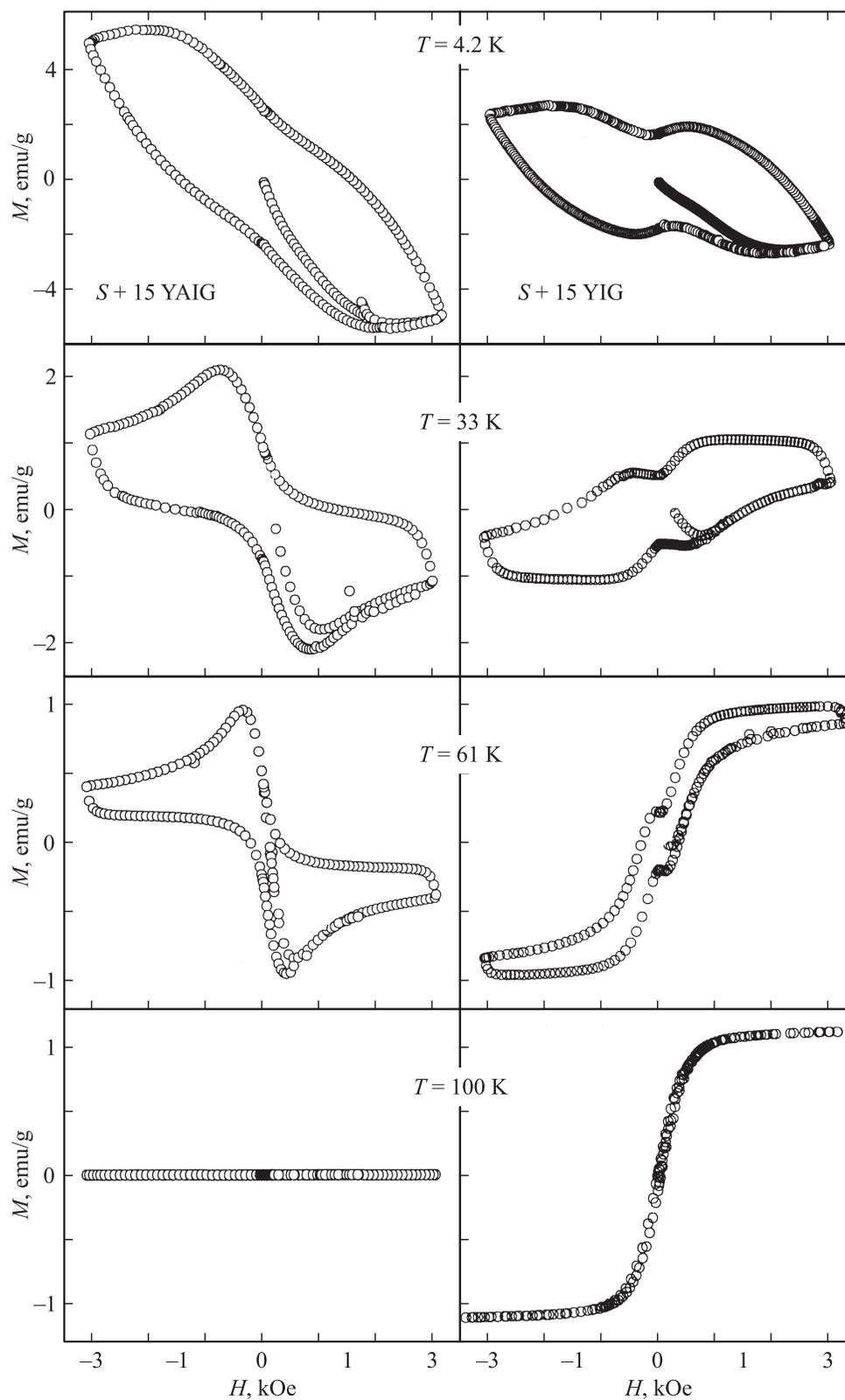


Рис. 6. Зависимости $M(H)$ образцов $S + 15$ YAIG и $S + 15$ YIG при различных температурах.

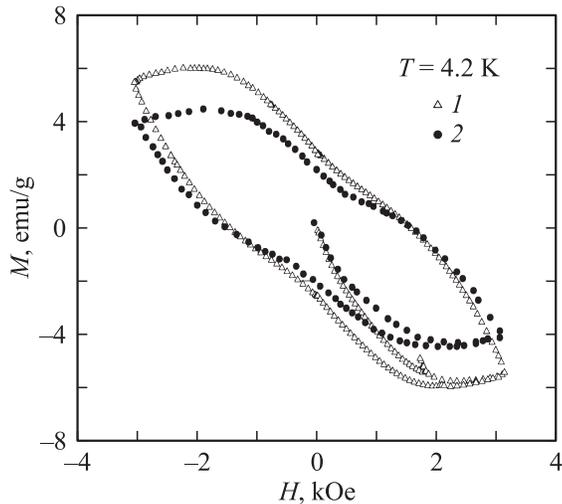


Рис. 7. Зависимости диамагнитного отклика $M(H)$ от фазы ВТСП в композитах при 4.2 К. 1 — в „реперных“ композитах $S + 15 \text{ YAlG}$, 2 — в композитах $S + 15 \text{ YIG}$.

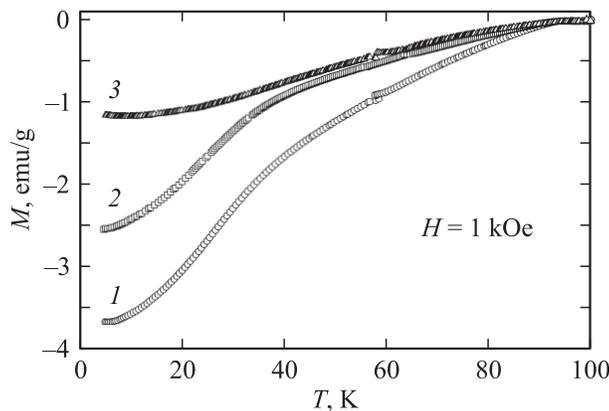


Рис. 8. Зависимости диамагнитного отклика $M(T)$ от фазы ВТСП в композитах, измеренные при $H = 1 \text{ kOe}$. 1 — в „реперных“ композитах $S + 15 \text{ YAlG}$, 2 — в композитах $S + 15 \text{ YIG}$, 3 — разность между зависимостями 1 и 2.

Из рис. 7 следует, что объем сверхпроводника с „редуцированными“ свойствами составляет 30%. Если предположить, что гранулы ВТСП в композите имеют сферическую форму со средним диаметром $1.5 \mu\text{m}$ (по данным сканирующей электронной микроскопии), то оценка слоя ВТСП, „редуцированно-го“ из-за близости с ферромагнетиком, дает значение $\approx 800 \text{ \AA}$, что коррелирует с глубиной проникновения для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 \sim 1000 \text{ \AA}$ [34]. Такая же оценка ($\approx 800 \text{ \AA}$) получается из данных температурных зависимостей намагниченности $M(T)$ (рис. 8). На этом рисунке приведены зависимости диамагнитного отклика $M(T)$ от фаз ВТСП в композитах $S + 15 \text{ YIG}$ и $S + 15 \text{ YAlG}$, а также разность между этими кривыми.

Таким образом, в данной работе исследованы транспортные и магнитные свойства композитов

$\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + \text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, представляющих собой сеть джозефсоновских контактов сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник. Помимо сильного подавления транспортных свойств (по сравнению с „реперными“ композитами ВТСП + немагнитный диэлектрик $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) для композитов ВТСП + ферромагнетик совершенно иным оказался вид температурных зависимостей электросопротивления. Зависимость $\rho(T)$ ниже температуры перехода ВТСП-гранул разделена на два участка некоторой температурой T_m . При температурах ниже T_m ВАХ композитов ВТСП + ферромагнетик нелинейны, что характерно для слабых связей джозефсоновского типа, тогда как в интервале $T_C - T_m$ вид зависимостей $\rho(T)$ не зависит от величины транспортного тока и магнитного поля. Резистивное состояние „реперных“ композитов ВТСП + $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ успешно объясняется механизмом термоактивационного проскальзывания фазы (TAPS) [32] в сети джозефсоновских $S-I-S$ -переходов.

Магнитные измерения композитов показали, что диамагнитный отклик от ВТСП-фазы в композитах с ферромагнитным диэлектриком меньше такового от ВТСП-фазы в композитах с немагнитным диэлектриком. Такое уменьшение диамагнитного отклика можно объяснить подавлением сверхпроводящих свойств ВТСП-гранул в слое, равном величине глубины проникновения магнитного поля из ферромагнитного компонента композита.

Авторы выражают благодарность А.Д. Балаеву за помощь в проведении магнитных измерений, А.Ф. Бовиной за рентгеноструктурный анализ образцов.

Список литературы

- [1] G. Xiao, F.H. Stretz, M.Z. Cieplak, A. Bakhshai, A. Garvin, C.L. Chen. *Phys. Rev. B* **38**, 1, 776 (1988).
- [2] B.R. Weinberger, L. Lynds, D.M. Potrepka, D.B. Show, C.T. Burila, H.E. Eaton, Jr.R. Cipolli, Z. Tan, J.I. Budnick. *Physica C* **161**, 91 (1989).
- [3] J. Koshi, K.V. Pausole, M.K. Jayaraj, A.D. Damodaran. *Phys. Rev. B* **47**, 22, 15 304 (1993).
- [4] E. Bruneel, S. Hoste. *Int. J. Inorganic Mater.* **1**, 385 (1999).
- [5] D. Berling, B. Loegel, A. Mehdaoui, S. Regnier, C. Cananoni, J. Marfaing. *Supercond. Sci. Technol.* **11**, 11, 1292 (1998).
- [6] M.I. Petrov, D.A. Balaev, D.M. Gohfeld, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihtudinov, K.S. Aleksandrov. *Physica C* **314**, 51 (1999).
- [7] Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, М.И. Петров. *Письма в ЖТФ* **27**, 22, 45 (2001).
- [8] A.G. Mamalis, S.G. Ovchinnikov, M.I. Petrov, D.A. Balaev, K.A. Shaihtudinov, D.M. Gohfeld, S.A. Kharlamova, I.N. Vottea. *Physica C* **364–365**, 174 (2001).
- [9] J.J. Calabrese, M.A. Dubson, J.C. Garland. *J. Appl. Phys.* **72**, 7, 2958 (1999).
- [10] М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, К.С. Александров. *ФТТ* **41**, 6, 969 (1999).
- [11] M.I. Petrov, D.A. Balaev, K.A. Shaihtudinov, K.S. Aleksandrov. *Supercond. Sci. Technol.* **14**, 9, 798 (2001).

- [12] J. Jung, M.A.-K. Mohamed, I. Isaak, L. Friedrich. Phys. Rev. B **49**, 17, 12 188 (1994).
- [13] Б.И. Смирнов, Т.С. Орлова. ФТТ **12**, 3542 (1994).
- [14] M.I. Petrov, D.A. Balaev, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihtudinov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Phys. Lett. A **237**, 1–2, 85 (1997).
- [15] М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, С.Г. Овчинников. ФТТ **40**, 9, 1599 (1998).
- [16] М.И. Петров, Д.А. Балаев, С.В. Оспищев, К.С. Александров. ФТТ **42**, 5, 791 (2000).
- [17] М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, С.И. Попков. Письма в ЖЭТФ **75**, 3, 166 (2002).
- [18] M.I. Petrov, D.A. Balaev, K.A. Shaihtudinov. Physica C **361**, 45 (2001).
- [19] Л.Н. Булаевский, В.В. Кузий, А.А. Собянин. Письма в ЖЭТФ **25**, 7, 314 (1977).
- [20] L.N. Bulaevskii, V.V. Kuzii, S.V. Panyukov. Solid State Commun. **44**, 4, 539 (1982).
- [21] С.В. Куплевацкий, И.И. Фалько. ФНТ **10**, 691 (1984).
- [22] С.В. Куплевацкий, И.И. Фалько. ФММ **62**, 1, 13 (1986).
- [23] А.С. Борухович. УФН **169**, 7, 737 (1999).
- [24] M. Fogelstrom. Phys. Rev. B **62**, 17, 11 812 (2000).
- [25] Y. Tanaka, S. Kashiyaya. J. Phys. Soc. Jap. **69**, 1152 (2000).
- [26] Ю. Изюмов, Ю. Прошин, М.Г. Хусаинов. УФН **172**, 2, 113 (2002).
- [27] O. Bourgeois, P. Gandit, A. Sulpice, J. Chaussy, J. Lesueur, X. Grison. Phys. Rev. B **63**, 064 517 (2002).
- [28] M. Schock, C. Surgers, H.v. Lohneysen. Eur. Phys. J. **14**, 1 (2000).
- [29] V.V. Ryazanov, V.A. Oboznov, A.Yu. Rusanov, A.V. Veretennikov, A.A. Golubov, A.A. Aarts. Phys. Rev. Lett. **86**, 11, 2427 (2001).
- [30] А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона. Мир, М. (1982). 640 с.
- [31] А.Д. Балаев, Ю.В. Бояршинов, М.М. Карпенко, Б.П. Хрусталева. ПТЭ **3**, 167 (1985).
- [32] V. Ambegaokar, B. Halperin. Phys. Rev. Lett. **22**, 1364 (1969).
- [33] M. Tinkham. Phys. Rev. Lett. **61**, 14, 1658 (1988).
- [34] Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Д.М. Гинзберга. Пер. с англ. Мир, М. (1990). 545 с.
- [35] С. Крупичка. Физика ферритов и родственных им окислов. Мир, М. (1976). Т. 1. 353 с.
- [36] M. Charalambous, J. Chaussy, P. Lejay. Phys. Rev. B **45**, 9, 5091 (1992).