

05.4

Управляемый по величине магниторезистивный эффект в композитах $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$ при 77 К

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

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

E-mail:smp@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 28 января 2003 г.

Исследован магниторезистивный эффект в композитах $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + CuO$, приготовленных методом быстрого спекания. Установлена зависимость между отношением величин измерительного тока j к критическому j/j_c и видом характеристики $\rho(H)$. При $j/j_c < 1$ электросопротивление возникает при пороговом значении магнитного поля H_c . При $j/j_c \geq 1$ путем варьирования содержания CuO в композите (15 ÷ 30 vol.%) и значений j (0.003 ÷ 0.2 А/см²) можно получить линейную зависимость $\rho(H)$ в диапазоне 0 ÷ 14 Ое при 77 К. Чувствительность электросопротивления композитов по магнитному полю $d\rho/dH$ в этом диапазоне составляет $\sim 1 \div 20$ мΩ · см/Ое. Величина $\rho_0 = (\rho(H) - \rho(H = 0))/\rho(H = 0)$ составляет 1320% при $H = 200$ Ое и 685% при $H = 35$ Ое. Такие композиты, обладающие магниторезистивным эффектом, перспективны для использования в качестве активных элементов датчиков магнитных полей, работающих при технически удобной температуре жидкого азота.

В работе [1] были приведены предварительные результаты исследования магниторезистивного (МР) эффекта в композитах на основе ВТСП. Такие материалы представляют собой сеть искусственно созданных джозефсоновских переходов, в качестве барьеров между ВТСП-кристаллитами выступает несверхпроводящий ингредиент. Композиты демонстрируют значительный МР эффект в широком интервале температур и слабых (до 200 Ое) магнитных полях ниже температуры перехода T_c сверхпроводника. Это обстоятельство делает возможным применение ВТСП-композитов в качестве датчиков магнитных полей, работающих при технически удобной температуре жидкого азота.

МР эффект в чистых ВТСП-керамиках исследовался вскоре после открытия высокотемпературной сверхпроводимости [2–10]. Сильная чувствительность электросопротивления ρ ВТСП к слабым магнитным полям наблюдается только в очень узком температурном интервале ниже T_c . Поэтому для получения заметного сигнала при $T = 77$ К необходимо использование больших плотностей транспортного тока ($\sim 10^2 \div 10^3$ А/см², что представляет отдельную техническую задачу из-за выделения тепла на токоподводящих контактах к ВТСП) [3,5], и сильных магнитных полей ($H \sim 10 \div 60$ кОе). Более того, полевой гистерезис сопротивления [4,6,7,9–11], а также нелинейность зависимости $\rho(H)$ [3–7,11] ограничивают круг использования ВТСП-керамик. В данной работе приведены подробные результаты исследования зависимостей $\rho(H)$ при различных плотностях транспортного тока j композитов на основе иттриевой керамики и оксида меди. Полученные параметры МР эффекта в композитах ВТСП + CuO при $T = 77$ К позволяют более оптимистично смотреть на практическое использование этих материалов в качестве датчиков магнитных полей.

Приготовление композитных образцов методом быстрого спекания на основе ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ (ниже для обозначения будет использована маркировка YBCO) и оксида меди CuO описано в работах [1,12]. Температурный режим отжига: 2 min при 910°C, затем 3 h при 350°C. Охлаждение от температуры 350°C — вместе с печью. Отсутствие посторонних фаз в композите было подтверждено рентгеноструктурным анализом. Обозначим композиты согласно объемному содержанию CuO в них: YBCO + 15 vol.% CuO и YBCO + 30 vol.% CuO (содержание ВТСП соответственно 85 и 70 vol.%).

Измерения электросопротивления от температуры $\rho(T)$ и магнитного поля $\rho(H)$ проводились стандартным четырехзондовым методом. Типичные размеры образца — $1 \times 2 \times 12$ mm, расстояние между потенциальными контактами ~ 10 mm. Плотность измерительного тока j выбиралась в диапазоне $0.002 \div 0.2$ А/см² (что соответствует току $\sim 0.1 \div 10$ mA). Сверхпроводящее состояние („R = 0“) регистрировалось с точностью $\sim 10^{-6}$ $\Omega \cdot$ см. Критический ток j_c определялся из начального участка вольт-амперных характеристик (ВАХ) по стандартному критерию 10^{-6} В/см [13]. Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно направлению тока. Специальных мер по экранированию поля Земли не предпринималось. Измерения намагниченности $M(H)$ проводились на вибрационном магнетометре [14].

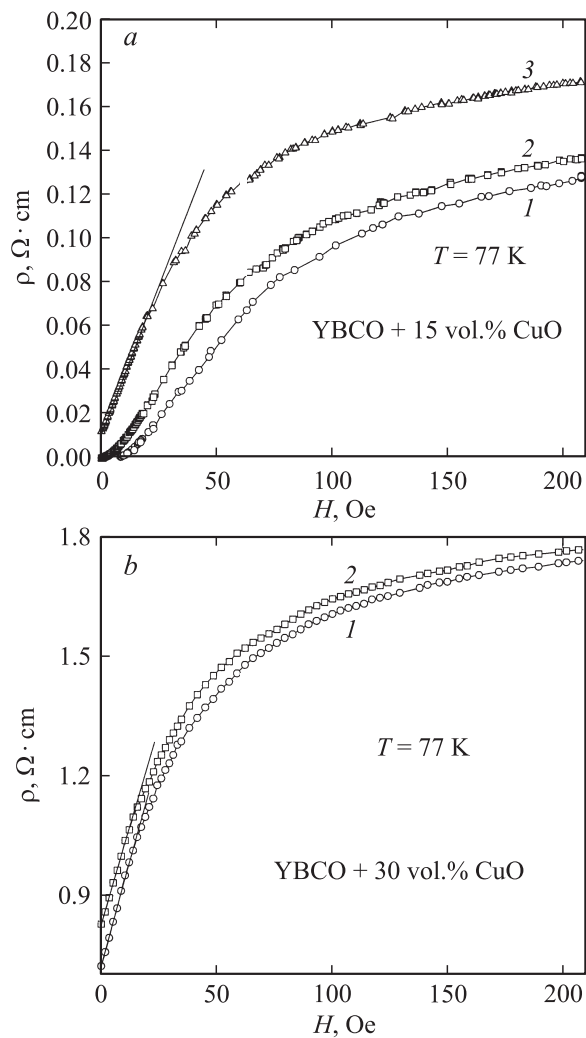


Рис. 1. Зависимости электросопротивления от магнитного поля композитов YBCO + 15 vol.% CuO (a) и YBCO + 30 vol.% CuO (b) при $T = 77 \text{ K}$. a: измерительный ток $j = 0.037 \text{ A/cm}^2$ ($j < j_c$) — зависимость 1, $j = 0.12 \text{ A/cm}^2$ ($j \approx j_c$) — 2, $j = 0.37 \text{ A/cm}^2$ ($j > j_c$) — 3. b: $j = 0.0032 \text{ A/cm}^2$ — 1, $j = 0.032 \text{ A/cm}^2$ — 2.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости $\rho(H)$ композитов YBCO + 15 vol.% CuO и YBCO + 30 vol.% CuO, измеренные при различных значениях транспортного тока j при $T = 77$ К. Все многообразие зависимостей $\rho(H)$ условно можно разделить на три области по величине транспортного тока при данной температуре. Если измерительный ток меньше критического $j < j_c$, то существует участок, на котором $\rho \leq 10^{-6} \Omega \cdot \text{см}$. Только начиная с некоторой величины H_c (для образца YBCO + 15 vol.% CuO $j = 0.12 \text{ A/cm}^2$ и $T = 77 \text{ К}$ $H_c \approx 10 \text{ Oe}$), для которой значение j является критическим, имеет место нелинейная зависимость сопротивления от магнитного поля (кривая 1 на рис. 1, а). В случае $j \approx j_c$ (кривая 2 на рис. 1, а) зависимость $\rho(H)$ начинает возрастать из начала координат. А при $j > j_c$ (кривая 3 на рис. 1, а) магнитосопротивление начинает изменяться с некоторого значения $\rho(H = 0)$, и в диапазоне $0 \div 14 \text{ Oe}$ зависимость $\rho(H)$ линейна с наклоном $d\rho/dH \approx 2.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{см/Oe}$.

Для образца YBCO + 30 vol.% CuO значение $j_c(77 \text{ К})$ составляет менее 0.001 A/cm^2 . По этой причине зависимости $\rho(H)$ для этого образца для всех использованных значений j (см. рис. 1, б) подобны зависимости 3 на рис. 1, а. В диапазоне $0 \div 14 \text{ Oe}$ зависимости $\rho(H)$ линейны с наклоном $d\rho/dH \approx 17.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{см/Oe}$.

Для исследованных композитов наблюдалось совпадение прямого и обратного хода зависимостей $\rho(H)$ для всех использованных плотностей транспортного тока в полях $|H| \leq 37 \text{ Oe}$. Для значений H , больших этой величины, зависимость $\rho(H)$ имеет гистерезис (см. рис. 2), на котором приведены зависимости $\rho(H)$, и для сопоставления $M(H)$, измеренные на одном и том же образце композита YBCO + 30 vol.% CuO в диапазоне $-210 \text{ Oe} \leq H \leq 210 \text{ Oe}$. Отметим, что вид $M(H)$ типичен для ВТСП керамик [11]. Петли $\rho(H)$ композитов надежно повторяются при многократном циклировании поля до постоянной величины. Термомагнитная предыстория снимается нагреванием образца выше T_c и охлаждением его в нулевом поле. Из сопоставления зависимостей $\rho(H)$ и $M(H)$ можно заключить, что сопротивление сложным образом зависит от намагниченности образца.

Измерения $\rho(H, j)$ при других температурах показали результаты, подобные приведенным на рис. 1, 2. Соотношение транспортного тока к его критическому значению является основным параметром и определяет тип зависимости $\rho(H)$. На рис. 3 приведены температурные зависимости плотности критического тока $j_c(T)$ композитов вблизи T_c .

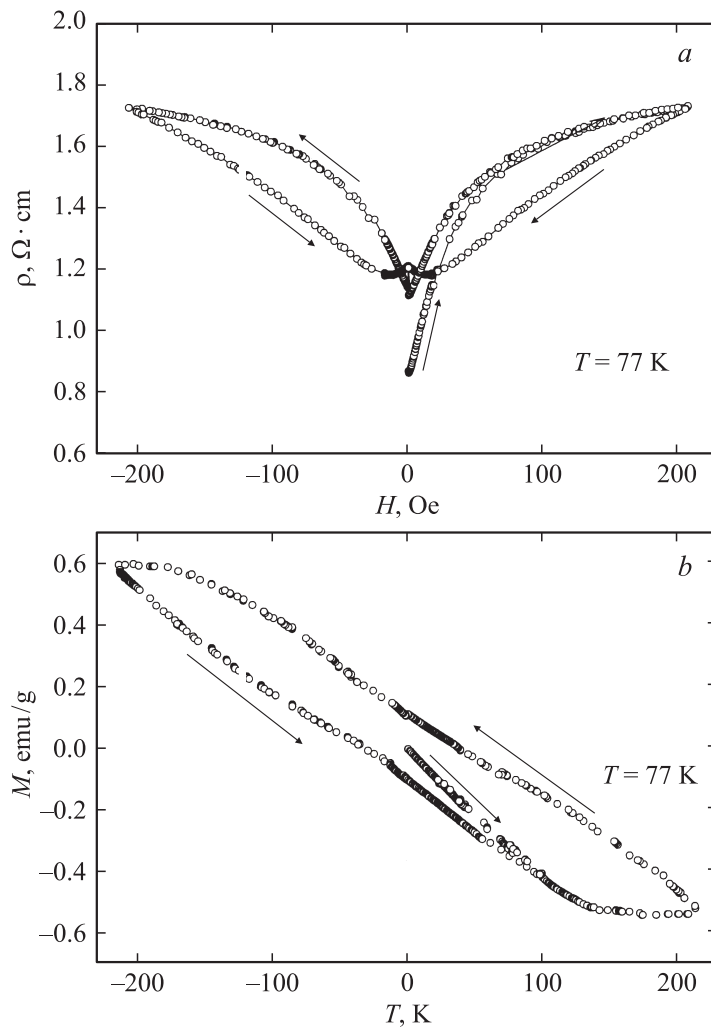


Рис. 2. Зависимости электросопротивления (a) и намагниченности (b) от магнитного поля композита YBCO + 30 vol.% CuO при $T = 77$ K. Стрелки показывают направление изменения поля. a — измерительный ток $j = 0.0032$ A/cm².

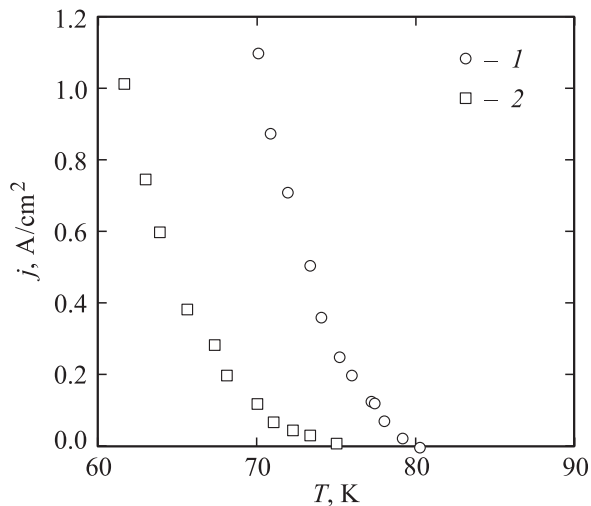


Рис. 3. Зависимости критического тока композитов YBCO + 15 vol.% CuO (1) и YBCO + 30 vol.% CuO (2).

Исходя из данных рис. 3, выбирая значение плотности транспортного тока j , можно качественно предсказать вид зависимости $\rho(H)$ сенсора при каждой температуре. В керамиках с „естественными“ межгранульными границами значения $j_c(77\text{ K})$ достигают $10 \div 250\text{ A/cm}^2$ [5,6,15]. Поэтому все три типа: 1, 2 и 3 из рис. 1,а для чистых керамик экспериментально реализовать при 77 K технически гораздо сложнее, чем в композитах.

Причина МР эффекта в поликристаллических ВТСП (включая композиты) заключается в том, что эти материалы представляют собой сеть переходов джозефсоновского типа. Границы между ВТСП-кристаллитами являются джозефсоновскими слабыми связями, электросопротивление которых очень чувствительно к магнитным полям [13]. Количество слабых связей на единицу длины образца огромно — составляет величину порядка 10^3 на 1 mm (при типичных размерах сверхпроводящих гранул $\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ по данным SEM). Соответственно на эту величину умножается сигнал отклика одного перехода ВТСП–граница–ВТСП. В исследованных композитах оксид меди формирует ди-

электрические прослойки между кристаллитами ВТСП [12]. Объемным содержанием ингредиентов мы можем целенаправленно варьировать „силу“ джозефсоновской связи так, чтобы полный сверхпроводящий переход начинался при заданной температуре (в данном случае ~ 80 К для $\text{YBCO} + 15 \text{ vol.\% CuO}$ и ~ 76 К для $\text{YBCO} + 30 \text{ vol.\% CuO}$). Тогда при температуре 77 К значительный МР эффект достигается в слабых магнитных полях при низких значениях транспортного тока. Кроме того, CuO можно считать диэлектриком в низких (< 100 К) температурах [16], что приводит к росту удельного электросопротивления в нормальном состоянии композитов $\text{YBCO} + \text{CuO}$ по сравнению с чистыми ВТСП керамиками [12]. Поэтому значения чувствительности по магнитному полю $d\rho/dH$, полученные на композитах — $2 \div 20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm/Oe}$, по крайней мере, на два порядка больше, чем для ВТСП поликристаллов $0.01 \div 0.15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm/Oe}$ (оцененным из работ [2,3,5,6]).

Важным параметром, характеризующим МР эффект, является величина $\rho_0 = (\rho(H) - \rho(H = 0))/\rho(H = 0)$, характеризующая, во сколько раз увеличилось электросопротивление в поле H . Ясно, что отсчитанная относительно состояния „ $R = 0$ “ величина ρ_0 будет иметь огромное значение. На практике важен рост электросопротивления относительно некоторого, не слишком низкого значения $\rho(H = 0)$. Для образца $\text{YBCO} + 15 \text{ vol.\% CuO}$ в случае $j > j_c$ (зависимость ρ на рис. 1, *a*), значение ρ_0 составляет 1320% при $H = 200 \text{ Oe}$ и 685% при $H = 35 \text{ Oe}$ (в обратимой области). Величина $\rho(H = 0, T = 77 \text{ K})$ при $j = 0.37 \text{ A/cm}^2$ составляет $8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$. Для композита $\text{YBCO} + 30 \text{ vol.\% CuO}$ при $j = 0.0032 \text{ A/cm}^2$ значение ρ_0 составляет 140% при $H = 200 \text{ Oe}$ и 78% при $H = 35 \text{ Oe}$ соответственно; $\rho(H = 0, T = 77 \text{ K}) = 725 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$.

С другой стороны, поведение $\rho(H)$, подобное зависимости типа 1 на рис. 1, *a*, также может быть полезным в устройствах, в которых нужен отклик на пороговое значение магнитного поля H_c . В работе [5] ВТСП-материал, работающий таким образом, был назван „супермагниторезистор“. В композитах путем варьирования объемной концентрации несверхпроводящего ингредиента и плотности транспортного тока мы можем выбрать необходимое для конкретного применения значение H_c .

Таким образом, зависимость $\rho(H)$ определяется отношением рабочего (транспортного) тока к критическому j/j_c . Если $j/j_c < 1$, у композита появляется сопротивление при пороговом поле H_c , если $j/j_c \geq 1$, можно подобрать рабочий ток, при котором существует участок с

линейной зависимостью $\rho(H)$ и высоким значением чувствительности по магнитному полю $d\rho/dH \sim 1 \div 20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm/Oe}$, а величина ρ_0 будет составлять сотни процентов в обратимой области при $T = 77 \text{ K}$. Отклик электросопротивления композитов $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 + \text{CuO}$ (при сравнительно низких значениях $j \sim 1 \text{ mA/cm}^2$) на 2 порядка больше, чем в чистых ВТСП-поликристаллах. Перечисленные факты говорят о перспективности использования исследованных композитов в качестве активных элементов датчиков магнитных полей, работающих при технически удобной температуре жидкого азота. По крайней мере, в области обратимого МР эффекта ($|H| \leq 37 \text{ Oe}$) их параметры (ρ_0 , $d\rho/dH$, $\rho(H)$) не уступают лучшим образцам оксидов марганца [17].

Авторы благодарят А.Ф. Бовину за рентгеноструктурный анализ композитов, А.Д. Балаева за помощь в проведении магнитных измерений и обсуждение результатов, Д.М. Гохфельда за помощь в работе и обсуждение результатов, С.В. Комогорцева за полезные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке совместной программы Красноярского краевого фонда науки и РФФИ „Енисей“, грант № 02–02–97711, а также частично СО РАН в рамках Лаврентьевского конкурса молодежных проектов 2002 г.

Список литературы

- [1] Балаев Д.А., Гохфельд Д.М., Попков С.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27 (22). С. 45–51.
- [2] Dubson M.A., Herbet S.T., Calabrese J.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 11. P. 1061–1064.
- [3] Ohnuma T., Kuroko T., Ishii M. // Proc. of ISEC-89. Tokyo, 1989. P. 206–209.
- [4] Shifang S., Yong Z., Guoqiayang P. et al. // Europhys. Lett. 1988. V. 6. N 4. P. 359–362.
- [5] Nojima H., Tsuchimoto S., Kataoka S. // Jap. Journ. of Appl. Phys. 1988. V. 27. N 5. P. 746–750.
- [6] Копелевич Я.В., Леманов В.В., Сонин Э.Б. и др. // ФТГ. 1988. Т. 30. В. 8. С. 2432–2436.
- [7] Васютин М.А., Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д. и др. // Препринт 85. Москва, 1990. ФИАН им. П.Н. Лебедева.
- [8] Wright A.C., Zhang K., Erbil A. // Phys. Rev. B. 1991. V. 44. N 2. P. 863–866.
- [9] Mitin A.V. // Physica C. 1994. V. 235–240. P. 3311–3312.
- [10] Митин А.В. // СФХТ. 1994. Т. 7. № 1. С. 62–79.

- [11] Кузьмичев Н.Д. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 74. В. 5. С. 291–295.
- [12] Petrov M.I., Balaev D.A., Shaihtudinov K.A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2001. V. 14. P. 798–805.
- [13] Бароне А., Патерно Дж. // Физика и применение эффекта Джозефсона. М.: Мир, 1984. 639 с.
- [14] Балаев А.Д., Бояришинов Ю.В., Карпенко М.М. и др. // ПТЭ. 1985. Т. 3. С. 167–168.
- [15] Petrov M.I., Balaev D.A., Khrustalev V.P. et al. // Physica C. 1994. V. 235–240. P. 3043–3044.
- [16] Гижевский Б.А., Самохвалов А.А., Чеботаев Н.М. и др. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 4. С. 827–830.
- [17] Нагаев Э.Л. // УФН. 1996. Т. 166. № 8. С. 833–858.