05

Намагниченность и критическая плотность тока сверхпроводящих гранул, допированных наночастицами NiO

© Д.М. Гохфельд, С.В. Семёнов, М.И. Петров

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
E-mail: gokhfeld@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 17 октября 2025 г.
В окончательной редакции 12 ноября 2025 г.
Принято к публикации 17 ноября 2025 г.

Синтезирована серия объемных сверхпроводящих образцов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), допированных антиферромагнитными наночастицами NiO. Образцы подвергались высокотемпературному отжигу в течение 18 h. Для образцов YBCO, допированных наночастицами со средним размером 8, 12 и 23 nm, проведено сравнение характерных величин ΔM петель магнитного гистерезиса и установлен оптимальный размер наночастиц NiO. Исследовано влияние концентрации наночастиц NiO со средним размером 8 nm на петли магнитного гистерезиса YBCO и критическую плотность тока при $T = 4.2$ K. Максимальное увеличение критической плотности внутригранульных токов достигается при добавлении 0.5 wt.% наночастиц NiO.

Ключевые слова: магнитный гистерезис, магнитный пиннинг, *RE*-123, твердофазный синтез, гранулярный сверхпроводник, критическая плотность тока.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62339.20534

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты второго поколения на основе $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ представляют собой ключевой материал для современных энергетических и исследовательских установок из-за способности переносить критические токи в тысячи ампер при температурах ниже 20 K в сильных магнитных полях [1–4]. Планирующиеся мегапроекты ускорителей частиц и термоядерных реакторов выдвигают все более растущие требования к токонесущей способности сверхпроводников [5]. Применяемой стратегией увеличения пиннинга магнитного потока и критической плотности тока является внедрение искусственных центров пиннинга на этапе роста [6–8], замена редкоземельного элемента или изменение его стехиометрии [9] и облучение лент различными ионами [10,11]. Внедрение магнитных наночастиц в сверхпроводник может быть наиболее эффективным методом увеличения пиннинга [12–15], так как магнитные дефекты обеспечивают существенно более сильное взаимодействие с вихрями Абрикосова по сравнению с немагнитными центрами пиннинга. Технология магнитного пиннинга для сверхпроводящих лент второго поколения в настоящее время не освоена. Основными проблемами являются внедрение магнитных наночастиц в многослойную структуру лент и минимизация возможного негативного влияния на сверхпроводящий слой.

Некоторые особенности влияния магнитных наночастиц на свойства сверхпроводников могут быть исследованы с использованием доступной технологии твердофазного синтеза. Ранее мы определили, что при быстром спекании порошка $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) с наночастицами ε-Fe_2O_3 и NiO удается получить образцы с увеличенной критической плотностью внутригранульного тока [16,17]. Так как данный метод может не подходить для внедрения в технологию приготовления 2G-лент, необходимо рассмотреть пути увеличения магнитного пиннинга при длительном отжиге образцов.

Исследования свойств допированных наночастицами сверхпроводников в работах [16,17] проводились при температуре кипения азота. Однако эффективность использования высокотемпературных сверхпроводников значительно возрастает при температурах 4.2–20 K. При этих температурах длина когерентности и эффективный размер центров пиннинга меньше, чем при 77 K. Следовательно, увеличение пиннинга может быть достигнуто при использовании наночастиц меньшего размера.

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния концентрации ультрамалых антиферромагнитных наночастиц NiO на критическую плотность тока сверхпроводящих гранул в поликристаллическом YBCO при $T = 4.2$ K.

Синтез $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ проводился по стандартной технологии твердофазного синтеза из порошков Y_2O_3, $BaCO_3$ и CuO. Наночастицы NiO со средними размерами 8, 12 и 23 nm приготовлены в Институте катализа СО РАН [18]. Размер наночастиц NiO определен в работе [18] на основе микрофотографий, полученных с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Для приготовления образцов в диспергированный в спирте порошок YBCO добавлялась спиртовая взвесь наночастиц. Затем спирт выпаривался при слабом нагреве на плите. Сухой порошок тщательно перетирался и подвергался гидростатическому прессованию (~ 100 MPa). Полученные прессованные таблетки нагревались в печи до температуры 920 °C и отжигались при этой температуре в течение 18 h. Затем образцы выдерживались 10 h при температуре 400 °C.

Приготовлена серия образцов с различным содержанием наночастиц NiO от 0 до 6 wt.% ($0 \le x \le 0.06$). Температура начала сверхпроводящего перехода, выше которой намагниченность M становится положительной, для всех образцов одинакова: $T_c \approx 93$ K. Измерения петель магнитного гистерезиса проводились на вибрационном магнитометре, созданном в лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН, в диапазоне магнитных полей ± 7 T при $T = 4.2$ K.

Сравнение петель магнитного гистерезиса для образцов YBCO с 1 wt.% наночастиц с размером 8, 12 и 23 nm позволило выбрать размер наночастиц NiO, при котором обеспечивается наиболее эффективный пиннинг магнитного потока при $T = 4.2$ K. Величина захваченного магнитного потока пропорциональна расстоянию между ветвями петель магнитного гистерезиса при возрастании и убывании поля (ΔM). Значения ΔM в поле $H = 0$ для образцов с разными размерами наночастиц NiO приведены в табл. 1.

В образце YBCO с размером наночастиц NiO 23 nm наблюдалось уменьшение ΔM в 1.1 раза по сравнению с величиной ΔM для недопированного YBCO. В образце YBCO с размером NiO 12 nm рост ΔM в сравнении с недопированным YBCO составлял менее 2 %. В образце YBCO с размером наночастиц NiO 8 nm происходило увеличение ΔM в 1.1 раза в сравнении с недопированным YBCO. Дальнейшее исследование влияния концентрации наночастиц NiO на намагниченность и критическую плотность тока проводилось для образцов YBCO, допированных наночастицами NiO со средним размером 8 nm.

На рис. 1, *a* показаны петли магнитного гистерезиса образцов, измеренные при температуре $T = 4.2$ K. Зависимость ΔM от массовой доли наночастиц x приведена на рис. 1, *b*. Максимальное значение ΔM, превышающее в 1.4 раза величину ΔM для недопированного YBCO, наблюдается для образца с $x = 0.005$. Выше критической температуры сверхпроводника ($T_c = 93$ K) зависимости $M(H)$ для всех образцов обратимые, так что учета магнитных вкладов при анализе сверхпроводящего гистерезиса не требуется.

Плотность критического тока определялась по формуле $J_c(H) = 3\Delta M(H)/D$, где D — характерный масштаб циркуляции токов. В поликристаллических сверхпроводниках значение D определяется размерами гранул и параметрами их распределения [19–21]. Также размер D можно оценить из асимметрии петель гистерезиса намагниченности [22]. Значения намагниченности при увеличении поля M^+ по модулю больше значений намагниченности при уменьшении поля M^-. Асимметрия намагничивания вызвана равновесной намагниченностью приповерхностного слоя с глубиной λ. Значение масштаба циркуляции тока определялось по формуле $D \approx 2\lambda/[1 - (\Delta M/2|M_m^-|)^{1/3}]$, где M_m^- — минимальное значение намагниченности, т. е. максимальная величина диамагнитного сигнала. В вычислениях использовалось значение $\lambda = 0.15\,\mu$m. Для недопированного YBCO получено значение $D = 4.2\,\mu$m. При увеличении доли NiO величина D растет до $6.8\,\mu$m для $x = 0.001$, а затем уменьшается до $6.1\,\mu$m для $x = 0.06$. Отметим, что значения D одинаковы для образцов, допированных наночастицами разного размера с $x = 0.01$.

В табл. 2 приведены полученные значения D и значения J_c в полях 0 и 6 T. Погрешность определения J_c составляет около $\pm 10^5$ A/cm^2. Зависимости критической плотности тока образцов от магнитного поля приведены

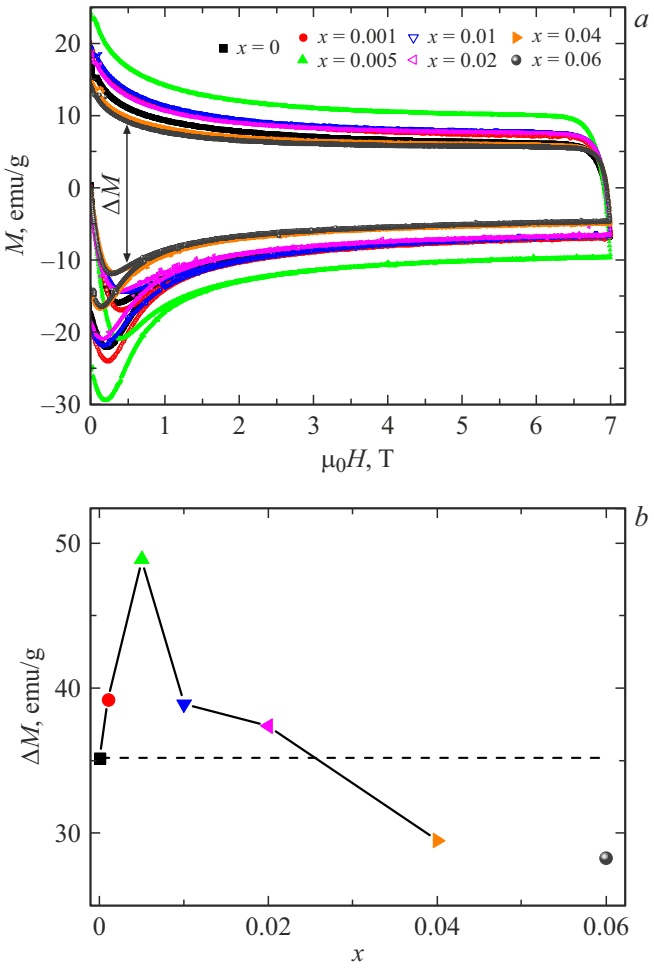


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса образцов с различным содержанием наночастиц при $T = 4.2$ K (a) и зависимость ΔM в поле $H = 0$ от x (b). Штриховой линией отмечено значение ΔM для недопированного YBCO. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

Таблица 1. Значения ΔM при допировании YBCO наночастицами NiO разного размера ($x = 0.01$)

Образец	ΔM, emu/g ($H = 0$)
Недопированный YBCO	35.2
YBCO + 23 nm NiO	31.9
YBCO + 12 nm NiO	35.8
YBCO + 8 nm NiO	38.9

Таблица 2. Параметры образцов, оцененные на основе петель магнитного гистерезиса

x	ΔM, emu/g ($H = 0$)	D, μm	J_c, 10^6 A/cm^2	
			$H = 0$	$\mu_0 H = 6$ T
0	35.2	4.2	16.0	6.0
0.001	39.2	4.5	16.6	6.1
0.005	48.9	5.6	17.1	6.9
0.01	38.9	6.8	10.9	4.1
0.02	37.4	6.7	10.5	4.0
0.04	29.5	6.6	8.5	3.2
0.06	28.3	6.1	8.9	3.3

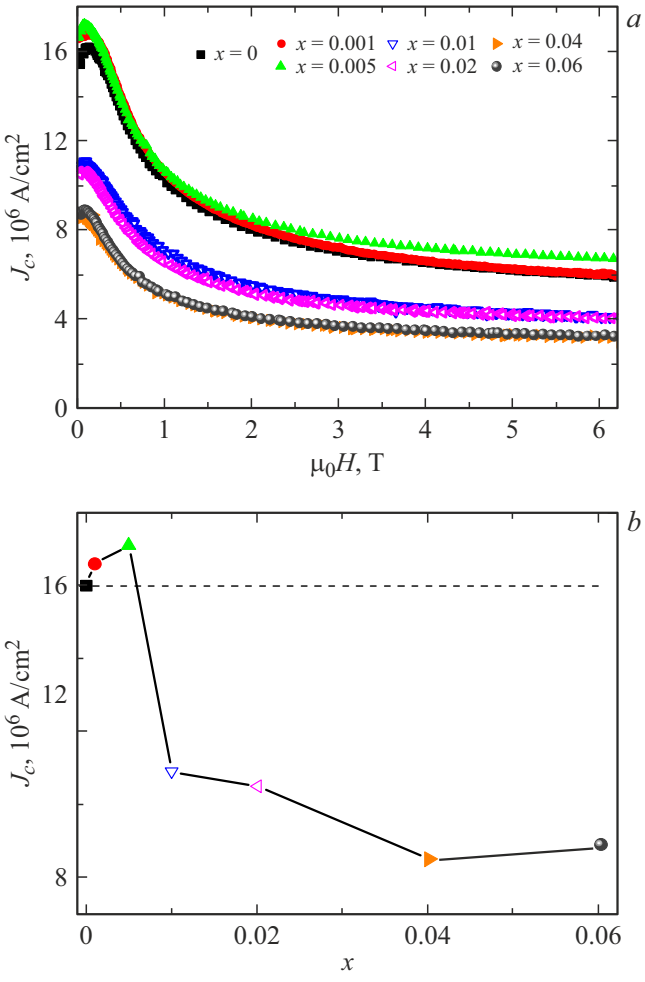


Рис. 2. Зависимости критической плотности тока от магнитного поля при $T = 4.2$ K (a) и зависимость J_c в $H = 0$ от x (b). Штриховой линией отмечено значение J_c для недопированного YBCO. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

на рис. 2, a. На рис. 2, b показано изменение J_c в $H = 0$ при увеличении x.

Как и ожидалось из данных ΔM, для образца, допированного 0.5 wt.% NiO (8 nm), наблюдается максимальное значение J_c. Однако значение J_c для этого образца лишь в 1.07 раза больше, чем для недопированного YBCO. Для образцов, допированных 1 wt.% NiO и более, наблюдается уменьшение критической плотности тока по сравнению с недопированным YBCO. В сильных магнитных полях (6 T) значение J_c для образца, допированного 0.5 wt.% NiO (8 nm), в 1.15 раза больше, чем для недопированного YBCO. К увеличению критической плотности тока приводит рост поверхностного пиннинга из-за наночастиц NiO на поверхности гранул, а также дополнительные дефекты в кристаллической решетке YBCO, вызванные внедрением Ni [12,15].

Во многих экспериментальных работах увеличение ΔM становится основанием для вывода о перспективности допирования данным видом наночастиц для увеличения критической плотности тока. Однако, как мы показали в нашем исследовании, увеличение ΔM может не коррелировать с изменением J_c. Таким образом, корректное сравнение J_c для разных сверхпроводящих образцов требует учета характерных структурных размеров этих образцов [20,21].

В заключение отметим, что обнаружено значительное увеличение ΔM (в 1.4 раза) при допировании YBCO ультрамалыми наночастицами NiO (8 nm) с концентрацией 0.5 wt.%. Размер сверхпроводящих гранул увеличивается в 1.3 раза, а критическая плотность внутригранульного тока в данном допированном образце увеличивается в 1.07 раза в нулевом поле и в 1.15 раза в сильных магнитных полях.

Благодарности

Авторы благодарят В.Л. Кириллова и О.Н. Мартьянова за синтез наночастиц NiO, Д.А. Балаева и А.А. Дубровского за стимулирующие обсуждения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00053 (https://rscf.ru/project/24-22-00053/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, P. Degtyarenko, S. Lee, V. Petrykin, M. Gaifullin, A. Mankevich, A. Vavilov, B. Sorbom, J. Cheng, S. Garberg, L. Kesler, Z. Hartwig, S. Gavrilkin, A. Tsvetkov, T. Okada, S. Awaji, D. Abraimov, A. Francis, G. Bradford, D. Larbalestier, C. Senatore, M. Bonura, A.E. Pantoja, S.C. Wimbush, N.M. Strickland, A. Vasiliev, Sci. Rep., **11**, 2084 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-81559-z

[2] И.В. Анищенко, С.В. Покровский, М.А. Осипов, Д.А. Абин, Д.И. Грицаенко, И.А. Руднев, Письма в ЖТФ, **47** (19), 22 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51508.18828 [I.V. Anischenko, S.V. Pokrovskii, M.A. Osipov, D.A. Abin, D.I. Gritsaenko, I.A. Rudnev, Tech. Phys. Lett., **48** (13), 43 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.13.53352.18828].

[3] В.В. Гурьев, В.Е. Крылов, И.В. Куликов, И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев, Ю.Н. Белотелова, П.В. Коновалов, П.А. Лукьянов, М.В. Мальцева, С.Н. Николаев, С.В. Шавкин, ФТТ, **66** (12), 2082 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59565.6507PA [V.V. Guriev, V.E. Krylov, I.V. Kulikov, I.M. Abdyukhanov, M.V. Alekseev, Yu.N. Belotelova, P.V. Konovalov, P.A. Lukyanov, M.V. Maltseva, S.N. Nikolaev, S.V. Shavkin, Phys. Solid State, **66** (12), 1994 (2024). DOI: 10.61011/PSS.2024.12.60171.6507PA].

[4] D. Abraimov, J. Gillman, C. Zha, Y. Oz, H. Pimentel, S. Mao, J. Kvitkovic, G. Bradford, J. Lee, J. Jaroszynski, N. Bishop, Y. Zhang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **35**, 8000507 (2025). DOI: 10.1109/TASC.2025.3549409

[5] H.S. Ruiz, J. Hänisch, M. Polichetti, A. Galluzzi, L. Gozzelino, D. Torsello, S. Milošević-Govedarović, J. Grbović-Novaković, O.V. Dobrovolskiy, W. Lang, G. Grimaldi, A. Crisan, P. Badica, A.M. Ionescu, P. Cayado, R. Willa, B. Barbiellini, S. Eley, A. Badía-Majós, Prog. Mater. Sci., **155**, 101492 (2026). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101492

[6] K. Tsuchiya, X. Wang, S. Fujita, A. Ichinose, K. Yamada, A. Terashima, A. Kikuchi, Supercond. Sci. Technol., **34**, 105005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/AC1E65

[7] J. Wu, M. Panth, V. Ogunjimi, B. Gautam, J. Shi, M.A. Sebastian, T. Haugan, C. Ebbing, D. Zhang, J. Jian, J. Huang, Y. Zhang, H. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond., **33**, 8000908 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3254489

[8] T.-X. Wang, D.-X. Huang, F.-Z. Ding, H. Dong, H. Yu, C.-C. Dun, H.-W. Gu, CMat, **1**, e12 (2024). DOI: 10.1002/CMT2.12

[9] Б.И. Массалимов, В.А. Власенко, А.Р. Прищепа, П.Н. Дегтяренко, Е.М. Иванова, А.В. Садаков, Письма в ЖЭТФ, **121** (10), 833 (2025). DOI: 10.31857/S0370274X25050198 [B.I. Massalimov, V.A. Vlasenko, A.R. Prishchepa, P.N. Degtyarenko, E.M. Ivanova, A.V. Sadakov, JETP Lett., **121** (10), 794 (2025). DOI: 10.1134/S0021364025606116].

[10] И.А. Руднев, А.И. Подливаев, Д.А. Абин, С.В. Покровский, А.С. Стариковский, Р.Г. Батулин, П.А. Федин, К.Е. Прянишников, Т.В. Кулевой, ФТТ, **65** (3), 386 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.03.54735.540 [I.A. Rudnev, A.I. Podlivaev, D.A. Abin, S.V. Pokrovskii, A.S. Starikovskii, R.G. Batulin, P.A. Fedin, K.E. Prianishnikov, T.V. Kulevoy, Phys. Solid State, **65** (3), 379 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.03.55577.540].

[11] П.Н. Дегтяренко, В.А. Скуратов, А.Л. Васильев, А.В. Овчаров, А.М. Петржик, В.К. Семина, С.Ю. Гаврилкин, М.С. Новиков, А.Ю. Малявина, В.А. Амеличев, А.Ю. Цветков, ЖЭТФ, **165** (6), 827 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024060099

[12] Y. Zhao, C.H. Cheng, J.S. Wang, Supercond. Sci. Technol., **18**, S43 (2005). DOI: 10.1088/0953-2048/18/2/010

[13] R.A. Algarni, Y. Slimani, E. Hannachi, M.A. Almessiere, T.M. Alqahtani, F.B. Azzouz, J. Mater. Sci. Mater. Electron., **34**, 1529 (2023). DOI: 10.1007/s10854-023-10921-w

[14] А.Н. Максимова, И.А. Руднев, В.А. Кашурников, А.Н. Мороз, ФТТ, **65** (4), 531 (2023). DOI: 10.21883/FTT.2023.04.55287.500 [A.N. Maksimova, I.A. Rudnev, I.A. Kashurnikov, A.N. Moroz, Phys. Solid State, **65** (4), 517 (2023). DOI: 10.21883/PSS.2023.04.55989.500].

[15] R. Kandari, M. Dahiya, M. Faraz, N. Khare, J. Supercond. Nov. Magn., **38**, 37 (2025). DOI: 10.1007/s10948-024-06885-5

[16] С.В. Семенов, Д.М. Гохфельд, М.И. Петров, Т.Д. Балаев, М.С. Молокеев, И.В. Немцев, В.Л. Кириллов, О.Н. Мартьянов, ФТТ, **66** (12), 2230 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59601.277 [S.V. Semenov, D.M. Gokhfeld, M.I. Petrov, T.D. Balaev, M.S. Molokeev, I.V. Nemtsev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, Phys. Solid State, **66** (12), 2135 (2024). DOI: 10.61011/PSS.2024.12.60207.277].

[17] D.M. Gokhfeld, S.V. Semenov, M.I. Petrov, I.V. Nemtsev, M.S. Molokeev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, arXiv:2510.14322 [cond-mat.supr-con]. DOI: 10.48550/arXiv.2510.14322

[18] S.I. Popkov, A.A. Krasikov, A.A. Dubrovskiy, M.N. Volochaev, V.L. Kirillov, O.N. Martyanov, D.A. Balaev, J. Appl. Phys., **126**, 103904 (2019). DOI: 10.1063/1.5109054

[19] D.M. Gokhfeld, J. Supercond. Nov. Magn., **36**, 1089 (2023). DOI: 10.1007/s10948-023-06575-8

[20] К.С. Пигальский, А.А. Вишнёв, Н.Н. Ефимов, П.Н. Васильев, А.В. Шабатин, Л.И. Трахтенберг, ЖЭТФ, **166** (8), 246 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024080108

[21] K.S. Pigalskiy, A.A. Vishnev, N.N. Efimov, A. V. Shabatin, L.I. Trakhtenberg, Ceram. Int., **51**, 11037 (2025). DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2024.12.523

[22] Д.М. Гохфельд, Письма в ЖТФ, **45** (2), 3 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47212.17553 [D.M. Gokhfeld, Tech. Phys. Lett., **45** (1), 1 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019010243].