

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  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (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  $\Delta M$  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: 10.21883/00000000000

Высокотемпературные сверхпроводящие ленты второго поколения на основе  $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  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 токнесущей 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 облуживание 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  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) с наночастицами  $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и NiO удастся 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  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  проводился по стандартной технологии твердофазного синтеза из порошков  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  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 ( $\sim 100$  МПа). 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.% ( $0 \leq x \leq 0.06$ ). Температура начала сверхпроводящего перехода, выше которой намагниченность  $M$  становится положительной, для всех образцов одинакова:  $T_c \approx 93$  К. Измерения петель магнитного гистерезиса проводились на вибрационном магнитометре, созданном в лаборатории сильных магнитных полей ИФ СО РАН, в диапазоне магнитных полей  $\pm 7$  Т при  $T = 4.2$  К.

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  $T = 4.2$  К. Величина захваченного магнитного потока пропорциональна расстоянию между ветвями петель магнитного гистерезиса при возрастании и убывании поля ( $\Delta M$ ). Значения  $\Delta M$  в поле  $H = 0$  для образцов с разными размерами наночастиц NiO приведены в табл. 1.

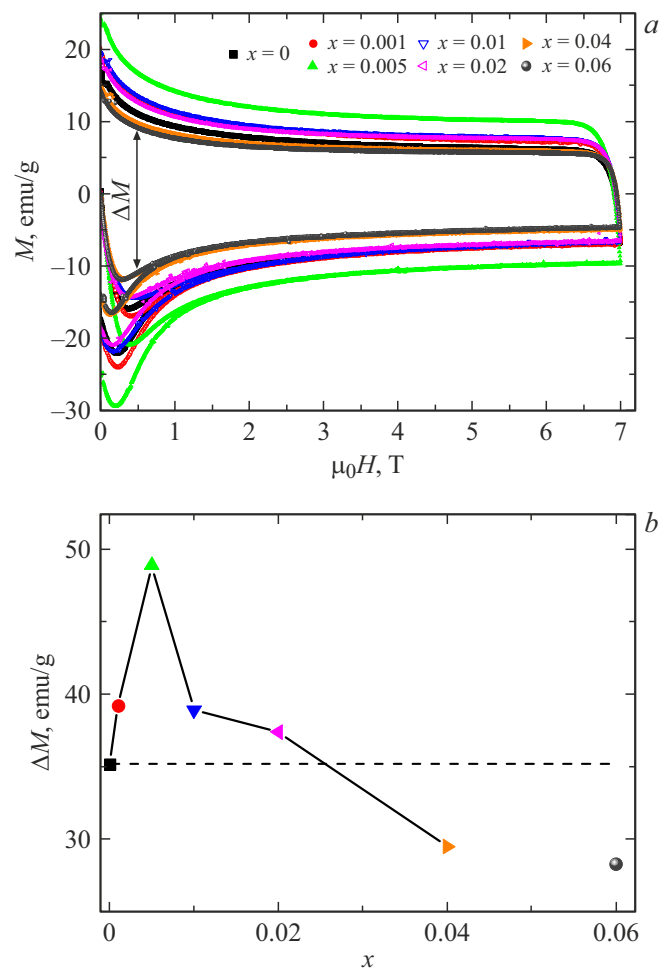
В образце YBCO с размером наночастиц NiO 23 nm наблюдалось уменьшение  $\Delta M$  в 1.1 раза по сравнению с величиной  $\Delta M$  для недопированного YBCO. В образце YBCO с размером NiO 12 nm рост  $\Delta M$  в сравнении с недопированным YBCO составлял менее 2%. В образце YBCO с размером наночастиц NiO 8 nm происходило увеличение  $\Delta M$  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  $T = 4.2$  К. Зависимость  $\Delta M$  от массовой доли наночастиц  $x$  приведена на рис. 1, *b*. Максимальное значение  $\Delta M$ , превышающее в 1.4 раза величину  $\Delta M$  для недопированного YBCO, наблюдается для образца с  $x = 0.005$ . Выше критической температуры сверхпроводника ( $T_c = 93$  К) 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].

**Таблица 1.** Значения  $\Delta M$  при допировании YBCO наночастицами NiO разного размера ( $x = 0.01$ )

Образец	$\Delta M$ , 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



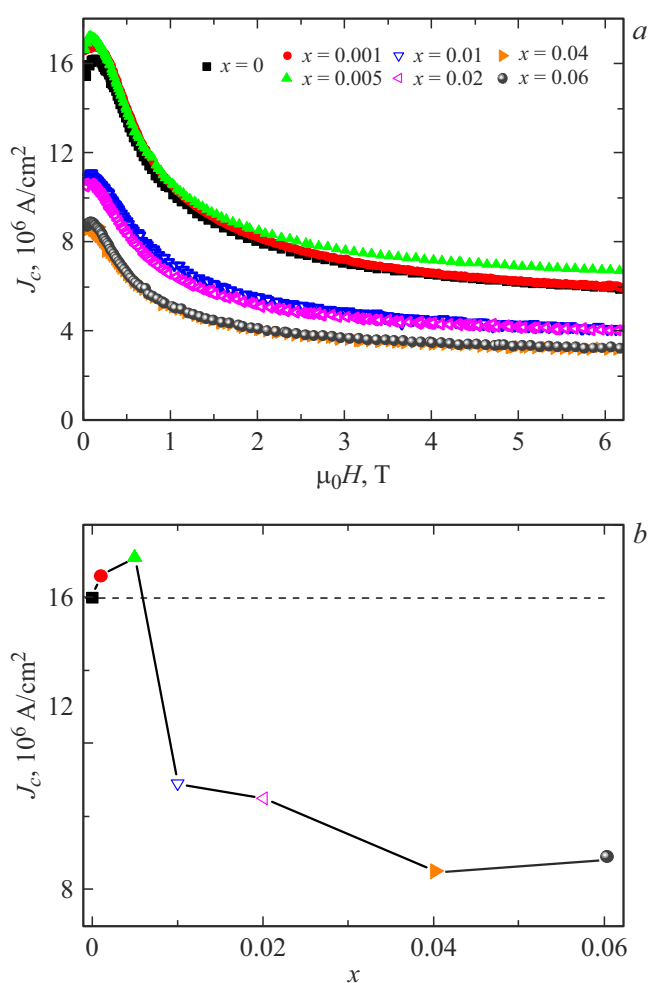
**Рис. 1.** Петли магнитного гистерезиса образцов с различным содержанием наночастиц при  $T = 4.2$  К (*a*) и зависимость  $\Delta M$  в поле  $H = 0$  от  $x$  (*b*). Штриховой линией отмечено значение  $\Delta M$  для недопированного YBCO. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

Значения намагниченности при увеличении поля  $M^+$  по модулю больше значений намагниченности при уменьшении поля  $M^-$ . Асимметрия намагничивания вызвана неравномерностью намагниченности приповерхностного слоя с глубиной  $\lambda$ . 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  $\lambda = 0.15 \mu\text{m}$ . Для недопированного YBCO получено значение  $D = 4.2 \mu\text{m}$ . При увеличении доли NiO величина  $D$  растет до  $6.8 \mu\text{m}$  для  $x = 0.001$ , а затем уменьшается до  $6.1 \mu\text{m}$  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 Т. Погрешность определения  $J_c$  составляет около  $\pm 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Зависимости критической плотности тока образцов от магнитного поля приведены

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

$x$	$\Delta M$ , emu/g ( $H = 0$ )	$D$ , $\mu\text{m}$	$J_c$ , $10^6 \text{ A/cm}^2$	
			$H = 0$	$\mu_0 H = 6 \text{ T}$
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  $T = 4.2 \text{ K}$  (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  $\Delta M$ , 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  $\Delta M$  становится основанием для вывода о перспективности допирования данным видом наночастиц для увеличения критической плотности тока. Однако, как мы показали в нашем исследовании, увеличение  $\Delta M$  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  $\Delta M$  (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. Мартыанова 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. Samoilnikov, 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. Abramov, 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. Anisichenko, 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. Петрижик, 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. Мартыанов, 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].