

Влияние редкоземельного элемента на скорость роста и критический ток ленточного высокотемпературного сверхпроводника

© В.В. Гурьев¹, И.В. Куликов¹, И.М. Абдюханов², М.В. Алексеев², Ю.Н. Белотелова²,
П.В. Волков¹, П.В. Коновалов², В.С. Круглов¹, В.Е. Крылов¹, Д.В. Лазарев¹,
А.А. Никонов¹, А.В. Овчаров¹, Д.Н. Раков², С.В. Шавкин¹

¹НИЦ „Курчатовский институт“,
Москва, Россия

²АО „ВНИИНМ“ им. А.А. Бочвара,
Москва, Россия

E-mail: GuryevVV@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 мая 2023 г.

В окончательной редакции 2 сентября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Исследованы образцы ВТСП проводников на основе $REBa_2Cu_3O_{7-x}$, где RE обозначает Y, Gd, Sm, Eu, Dy. Слой ВТСП осаждался методом импульсного лазерного напыления на длинномерные стальные ленты-подложки с текстурированными слоями YSZ и CeO_2 . Скорость формирования слоя ВТСП тем выше, чем ниже температура плавления соответствующего редкоземельного элемента. Обнаружено что в перпендикулярном магнитном поле при азотной температуре критический ток увеличивается в ряду $Y \rightarrow Dy \rightarrow Gd \rightarrow Sm$, тогда как при гелиевой температуре эта тенденция меняется на противоположную.

Ключевые слова: REBCO, редкоземельный элемент, критический ток, анизотропия.

DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56725.5015k

1. Введение

Общепризнано, что ленточные высокотемпературные сверхпроводники второго поколения (ВТСП-2) на основе соединения $REBa_2Cu_3O_7$ (REBCO), где RE — редкоземельный элемент (РЗЭ), являются одним из ключевых элементов перехода к ресурсосберегающей энергетике [1]. Однако, несмотря на колоссальные затраченные усилия, производство достаточно дешевых проводников ВТСП-2 с высокими эксплуатационными характеристиками остается нерешённой задачей [2]. Одной из часто используемых опций вариации эксплуатационных характеристик является замена в составе REBCO „стандартного“ иттрия на другой редкоземельный элемент или их комбинацию [3–7]. При этом на данный момент в литературе очень скудно представлены систематические исследования влияния РЗЭ на характеристики проводников ВТСП-2. Дело осложняется тем, что многофакторный технологический процесс изготовления не позволяет проводить прямое количественное сравнение результатов различных авторов, даже в случаях, когда использовались похожие технологии получения лент ВТСП-2 [8].

В сложившейся ситуации особую ценность приобретает выявление качественных трендов влияния РЗЭ, подтверждённых многими научными группами, вне зависимости от используемой технологии. В данной работе мы приводим результаты исследований серий образцов ВТСП-проводников на основе мишеней REBCO, где RE это Y, Dy, Gd, Eu или Sm.

2. Эксперимент

Мишени изготовлены в АО „ВНИИНМ“ с применением оксидного соосаждения, СВЧ-сушки, пиролиза, высокотемпературной обработки и прессования. Данный метод позволяет получать мишени с заданным фактором с плотностью более чем 90% от теоретической [9,10]. Подробности методики приготовления мишеней приведены в работе [11].

Все образцы ВТСП-проводников изготовлены на экспериментальной технологической линии в НИЦ „Курчатовский институт“ [12,13]. Процесс изготовления длинномерного ВТСП-проводника (ширина ленты 4 mm) состоит из нескольких последовательных этапов [14]. Ключевыми для настоящей работы являются два из них. Во-первых, этап осаждения методом импульсного лазерного напыления сверхпроводящего слоя REBCO. При этом для всех REBCO сохранялись фиксированными: давление кислорода (100 mTorr), энергия и частота лазерного излучения (600 mJ, 200 Hz), а также скорость движения ленты при проходе через ростовую камеру (36 m/h). Варьировалась температура нагревателя подложки в диапазоне от 990 до 1020°C, с целью максимизации критического тока при 77.4 K в собственном магнитном поле. Во-вторых, этап отжига в атмосфере кислорода (850 mbar) при температуре 450°C в течение 4 h и медленного остывания до комнатной температуры вместе с печкой.

Определение критического тока проводили по критерию $1 \mu V/cm$, достигаемому на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) при стандартных транспортных изме-

рениях четырехтерминальным методом. Угловые зависимости критического тока $I_c(\theta)$ измерялись в т.н. конфигурации максимальной силы Лоренца: магнитное поле всегда перпендикулярно транспортному току. Угол θ отсчитывался от плоскости ленты. Исследование угловых зависимостей проведено в среде жидкого азота (77.4 К) при атмосферном давлении во внешнем магнитном поле 1.5 Т. Измерения критического тока в среде жидкого гелия (4.2 К) проводились при ориентации внешнего магнитного поля по нормали к ленте.

Критическая температура определялась индуктивным методом на частоте 30 Hz. На кривой перехода фиксировалось значение температуры, при котором достигается 50% значения напряжения в нормальном состоянии.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, а представлена зависимость критической температуры REBCO от ионного радиуса РЗЭ r^{RE} (валентность 3+, координационное число 8). Для разных составов REBCO критическая температура T_c изменяется от 89.9 до 93.0 К. Просматривается линейная

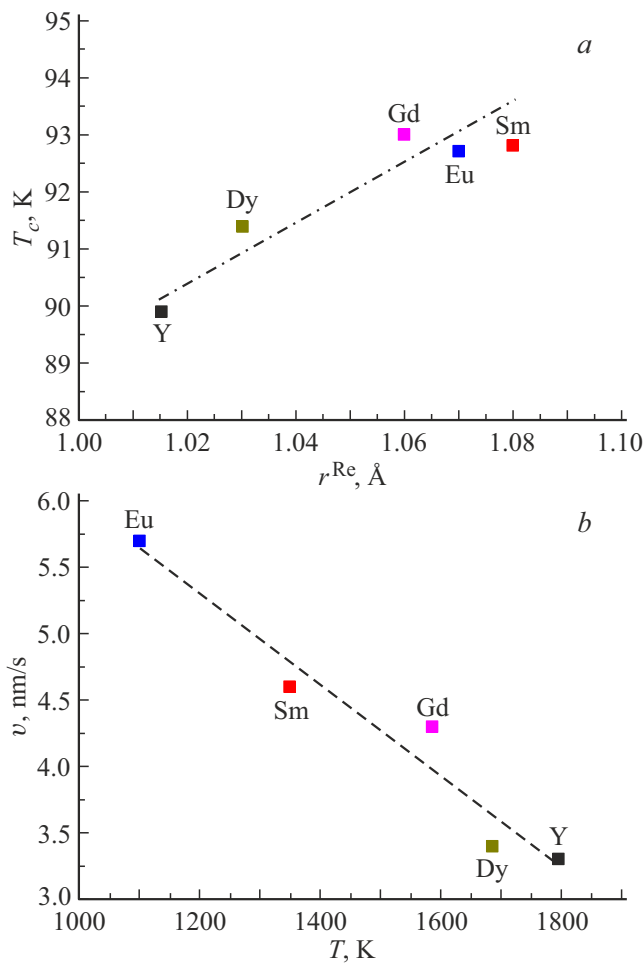


Рис. 1. а) Корреляция критической температуры и ионного радиуса РЗЭ. б) Корреляция скорости формирования слоя ВТСП и температуры плавления соответствующего РЗЭ.

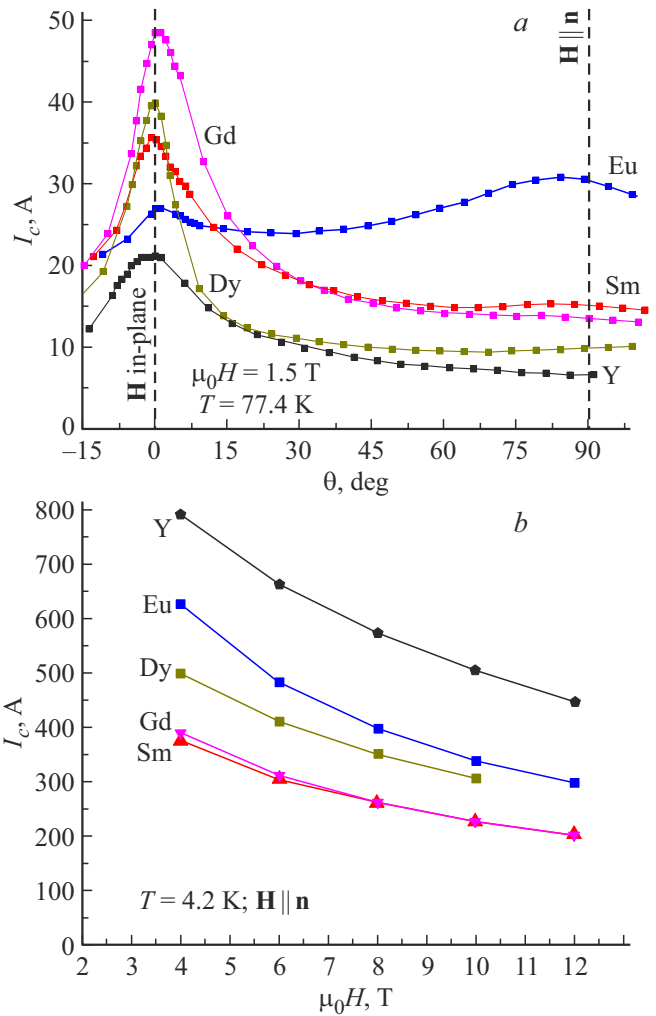


Рис. 2. а) Угловая зависимость критического тока $I_c(\theta)$ при 77.4 К во внешнем поле $\mu_0 H = 1.5$ Т. б) Полевая зависимость критического тока при 4.2 К и ориентации магнитного поля по нормали к ленте.

зависимость T_c от r^{RE} , отмечавшаяся ранее многими авторами как для лент ВТСП-2 [4], так и для объёмных материалов [15]. Отклонения от линейной зависимости могут быть объяснены тем, что РЗЭ с большими ионными радиусами имеют тенденцию к замещению бария [6,16], и, соответственно, к снижению T_c , а также не оптимизированной для каждого РЗЭ на кислородоживающей термообработкой [5].

Одним из важнейших параметров с точки зрения экономики производства лент ВТСП-2 является скорость осаждения. Установлено, что скорость роста изменяется более чем в 1.5 раза для различных РЗЭ. В отличие от работы [3], нами отмечена обратная корреляция скорости роста с температурой плавления соответствующего РЗЭ (рис. 1, б), а не прямая с размером ионного радиуса. Наиболее низкая температура плавления европия приводит к высокой диффузионной подвижности, что в свою очередь приводит к максимальной скорости роста в 5.7 nm/s. Другим фактором, очевидно имеющим влияние

на скорость роста слоя ВТСП, является процесс расплытия мишени в результате взаимодействия с лазерным излучением. Однако в настоящей работе не выявлено корреляции скорости осаждения с какой бы то ни было характеристикой мишени, за исключением химического состава.

Поскольку температура кипения жидкого азота (77.4 К) близка к критической температуре REBCO, можно предположить, что величина критического тока I_c определяются приведенной температурой $t = T/T_c$, и, соответственно, тем выше, чем выше T_c и больше ионный радиус. Однако эта простая картина значительно осложняется тем фактом, что величина анизотропии критического тока I_c не имеет четкой корреляции с размером ионного радиуса (рис. 2, а) в отличие от термодинамических критических параметров, в частности H_{c2} [17]. Более того, критический ток EuBCO имеет аномальную анизотропию: при ориентации по нормали ток выше, чем при ориентации в плоскости ленты. За исключением Eu, наименее предпочтительная ориентация магнитного поля для REBCO — по нормали к ленте. При этом при азотной температуре критический ток $I_c(\theta = 90^\circ)$ возрастает в ряду $Y \rightarrow Dy \rightarrow Gd \rightarrow Sm$ (рис. 2, а), а при гелиевой температуре эта последовательность изменяется на противоположную (рис. 2, б). Похожие тенденции отмечались в работе [4] при использовании метода осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы.

4. Заключение

Замена редкоземельного элемента в составе REBCO это мощный инструмент управления токонесящей способностью ВТСП-лент второго поколения. При этом влияние РЗЭ не исчерпывается зависимостью от соответствующего ионного радиуса. Основные эмпирические наблюдения, сделанные в работе, можно подытожить следующим образом:

1. РЗЭ влияет на скорость осаждения ВТСП-слоя при лазерной абляции, причем скорость тем выше, чем ниже температура плавления соответствующего РЗЭ.

2. Использование различных РЗЭ позволяет управлять степенью анизотропии критического тока в широких пределах. Для образцов, исследованных в данной работе, величина анизотропии при азотной температуре варьировалась от 0.9 до 4.0.

3. В перпендикулярном магнитном поле при азотной температуре критический ток увеличивается в ряду $Y \rightarrow Dy \rightarrow Gd \rightarrow Sm$, тогда как при гелиевой температуре эта тенденция меняется на противоположную.

Последнее наблюдение свидетельствует о существенном различии температурных зависимостей критического тока различных REBCO. Каждый состав REBCO может найти свою область применения, поскольку оптимален для специфических условий эксплуатации, определяющихся главным образом диапазонами рабочих полей и температур.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт”.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.L. MacManus-Driscoll, S.C. Wimbush. *Nature Rev. Mater.* **6**, 587 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00290-3>.
- [2] C. Yao, Y. Ma. *Perspective* **24**, 6, 102541 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102541>.
- [3] Q.X. Jia, B. Maiorov, H. Wang, Y. Lin, S.R. Foltyn, L. Civale, J.L. MacManus-Driscoll. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15**, 2, 8493837 (2005). <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.847797>.
- [4] S. Zhang, S. Xu, Z. Fan, P. Jiang, Zh. Han, G. Yang, Y. Chen. *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 125006 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aae460>.
- [5] M. Erbe, P. Cayado, W. Freitag, K. Ackermann, M. Langer, A. Meledin, J. Hanisch, B. Holzapfel. *Supercond. Sci. Technol.* **33**, 094002 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab9aa0>.
- [6] J. Shi, Y. Zhao, G. Jiang, J. Zhu, Y. Wu, Y. Gao, X. Quan, X. Yu, W. Wu, Zh. Jin. *J. Eur. Ceram.* **41**, 10, 5223 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.04.001>.
- [7] S.R. Foltyn, L. Civale, J.L. MacManus-Driscoll, Q.X. Jia, B. Maiorov, H. Wang, M. Maley. *Nature Mater.* **6**, 631 (2007). <https://doi.org/10.1038/nmat1989>.
- [8] M. Yazdani-Asrami. *Supercond. Sci. Technol.* **36**, 4, 043501 (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/acbb34>.
- [9] S.V. Shavkin, A.K. Shikov, I.A. Chernykh, V.V. Guryev, E.S. Kovalenko, E.V. Yakovenko, M.L. Zhanaveskin, D.N. Rakov, A.E. Vorobieva. *J. Phys. Conf. Ser.* **507**, 022030 (2014). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/2/022030>.
- [10] И.А. Черных, А.М. Строев, М.Я. Гараева, Т.С. Крылова, В.В. Гурьев, С.В. Шавкин, М.Л. Занавескин, А.К. Шиков. *Письма в ЖТФ* **40**, 1, 29 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1063785014010027>.
- [11] А.Е. Воробьева, И.М. Абдюханов, Д.Н. Раков, Ю.Н. Белотелова, Е.В. Котова, П.В. Коновалов, В.И. Панцырный, А.К. Шиков. *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы* **2**, 73, 108 (2012). eLIBRARY ID: 21467311.
- [12] E.P. Krasnoperov, V.V. Guryev, S.V. Shavkin, V.E. Krylov, V.V. Sychugov, V.S. Korotkov, A.V. Ovcharov, P.V. Volkov. *J. Eng. Sci. Technol. Rev.* **12**, 1, 104 (2019). <https://doi.org/10.25103/jestr.121.12>.
- [13] E.P. Krasnoperov, V.V. Sychugov, V.V. Guryev, S.V. Shavkin, V.E. Krylov, P.V. Volkov. *Electr. Eng.* **102**, 1769 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00202-020-00977-w>.
- [14] А.В. Иродова, И.Д. Карпов, В.С. Круглов, В.Е. Крылов, С.В. Шавкин, В.Т. Эм. *ЖТФ* **91**, 12, 1964 (2021). <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51761.169-21>.
- [15] J.G. Lin, C.Y. Huang, Y.Y. Xue, C.W. Chu, X.W. Cao, J.C. Ho. *Phys. Rev. B* **51**, 12900(R) (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.12900>.
- [16] K. Zhang, B. Dabrowski, C.U. Segre, D.G. Hinks, I.K. Schuller, J.D. Jorgensen, M. Slaski. *J. Phys. C* **20**, L935 (1987). <https://doi.org/10.1088/0022-3719/20/34/001>.
- [17] S.V. Samoylenkov, O.Yu. Gorbenko, A.R. Kaul. *Physica C* **278**, 1–2, 49 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(97\)00111-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(97)00111-1).

Редактор Е.Ю. Флегонтова