08

Асимметрия угловых зависимостей критического тока композитных сверхпроводящих лент как инструмент оптимизации гистерезисных потерь

© В.В. Гурьев, Н.К. Чумаков, В.Е. Крылов, С.В. Шавкин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
Москва, Россия

E-mail: Gurev_VV@nrcki.ru

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 8 сентября 2025 г.
Принята к публикации 11 ноября 2025 г.

Исследованы угловые зависимости критического тока и гистерезисные потери композитной ВТСП ленты на основе DyBCO. Установлено, что асимметрия угловых зависимостей критического тока уменьшается при увеличении магнитного поля и/или критерия электрического поля. Площади петель гистерезиса магнитного момента для одинаково отклоняющихся от нормали углов отличаются на 15−20 %, что говорит о пропорциональной разнице в потерях на перемагничивание. Таким образом, даже в высоких полях, когда угловые зависимости критического тока демонстрируют практически симметричное поведение, асимметрия проявляется через различие в потерях на перемагничивание.

Ключевые слова: DyBCO, анизотропия, асимметрия, угловая зависимость, гистерезисные потери.

DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62431.7968k-25

1. Введение

Прогресс последних десятилетий в производстве высокотемпературных сверхпроводящих проводов второго поколения (ВТСП-2), также известных как композитные ВТСП ленты на основе REBCO ($RE\mathrm{Ba_2Cu_3O_{7-\delta}}$, RE — редкоземельный элемент) или „coated conductors“, открыл новые перспективы для множества практических применений [1]. Одной из ключевых особенностей ВТСП-2 лент, по сравнению с традиционными низкотемпературными техническими сверхпроводниками (НТСП), является гораздо более выраженная анизотропия токонесущей способности. Для ВТСП во многих случаях существенную роль играет не только направление внешнего поля, но и направление силы Лоренца, действующей на вихревую структуру [2]. Это проявляется, например, в так называемом не полном диодном эффекте [3], при котором значение критического тока I_c меняется в зависимости от полярности транспортного тока [2]. Использование этого эффекта упрощает выпрямление переменного тока в сверхпроводящей электрической схеме, что приводит к снижению веса и стоимости сверхпроводникового оборудования [4]. Другая особенность анизотропии композитных ВТСП лент — асимметрия угловых зависимостей критического тока [5]. Это явление также имеет важные практические следствия, поскольку позволяет оптимизировать рабочие параметры сверхпроводниковых устройств [6,7]. Микроскопической причиной появления асимметрии является наклон кристаллографической плоскости ab по отношению к плоскости ВТСП-2 ленты [2,8]. Такой наклон часто наблюдается в ВТСП лентах, в которых текстура получена с помощью вспомогательного ионного травления [9]. Однако результирующая асимметрия определяется не только этим наклоном, но и сложной физикой вихревой материи — ее движения и механизмов пиннинга. В результате может возникнуть ситуация когда значительной асимметрии не наблюдается, хотя отклонение плоскости ab от плоскости ленты существенно. В данной работе мы демонстрируем пример подобной ситуации, и исследуем последствия для гистерезисных потерь при перемагничивании.

2. Эксперимент

Образцы композитной ВТСП ленты были изготовлены в НИЦ „Курчатовский институт“ [10]. В качестве сверхпроводящего слоя использовался DyBCO ($\mathrm{DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}}$) [11], выращенный методом импульсного лазерного осаждения (PLD) на стальной подложке с буферными слоями YSZ (оксид циркония, стабилизированный иттрием) и $\mathrm{CeO_2}$. Критический ток I_c определялся по конвенциональному критерию $1\,\mu$V/cm на воль-амперной характеристике (ВАХ), зарегистрированной стандартным четырех-контактным методом в среде жидкого азота ($T = 77$ K). Угловые зависимости $I_c(\theta)$ извлекались из обработки серии ВАХ измеренных при различных ориентациях внешнего магнитного поля, определяемых углом θ, при сохранении ортогональности магнитного поля и транспортного тока. Угол θ отсчитывался от плоскости ленты, и варьировался в полном 360° диапазоне с точностью позиционирования не хуже 0.5°. Критический ток по альтернативным критериям электрического поля ($0.01\,\mu$V/cm и $100\,\mu$V/cm) рассчитывался из степенной аппроксимации вольт-амперных харак-

теристик (ВАХ): $I_c^{0.01} = I_c(0.01)^{1/n}$ и $I_c^{0100} = I_c(100)^{1/n}$, где n — показатель степенной зависимости ВАХ.

Петли гистерезиса магнитного момента $M(H)$ исследовались на вибрационном магнитометре (LakeShore 7400 Series VSM) в полях до 1 T при температуре 77 K. Образцы имели размер 4×12 mm ориентировались под различными углами к направлению магнитного поля, аналогично работе [12].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена угловая зависимость критического тока для различных величин внешнего магнитного поля. Для полей 0.1 T и 0.3 T наблюдается существенная зависимость величины критического тока I_c от полярности транспортного тока. При полярности, отмеченной на рисунке закрытыми символами, пик вблизи $\theta = 0°$ выше, чем пик вблизи $\theta = 180°$. При инверсии направления тока (открытые символы) соотношение высот пиков меняется на обратное: пик вблизи $\theta = 0°$ ниже, чем пик вблизи $\theta = 180°$. Отметим, что при одновременной инверсии как направления поля **H** (что соответствует повороту образца на 180°), так и транспортного тока **j**, величина критического тока не изменяется. А при инверсии только одного из этих двух векторов величина изменения I_c не зависит от того какой именно вектор инвертирован. Такое поведение говорит об истинной зависимости не от полярности тока, а от направления силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_L = [\mathbf{j}\times_0\mathbf{H}], \qquad (1)$$

$\mathbf{F}_L$ — сила Лоренца, **j** — плотность тока, μ_0 — магнитная постоянная, **H** — внешнее магнитное поле.

Величина анизотропии по отношению к силе Лоренца снижается при увеличении внешнего поля, и при 1 Тл угловые зависимость для двух полярностей транспортного тока практически совпадают.

Другая особенность, также уменьшающаяся при увеличении поля — асимметрия. Этот эффект наиболее заметен по ненулевой производной угловой зависимости при $\theta = 90°$, когда внешнее поле направлено по нормали к ВТСП ленте. В результате величины критического тока для двух направлений магнитного поля отклоняющихся от нормали на одинаковый (комплементарный) угол θ' не совпадают: $I_c(90° - \theta') \neq I_c(90° + \theta')$.

В рамках модели предложенной ранее [2,13,14] асимметрия угловой зависимости интерпретируется как проявление дуализма анизотропии токонесущей способности: не только по отношению к направлению магнитного поля, но и по отношению к направлению силы Лоренца. Угловая зависимость $I_c(\theta)$ аппроксимируется формулой [15]:

$$I_c(\theta) = I_c^0\sqrt{\frac{[k^L\cos\theta]^2 + [\sin\theta]^2}{[k^U\cos(\theta-\theta_0)]^2 + [\sin(\theta-\theta_0)]^2}}, \qquad (2)$$

где $I_c^0, k^L, k^U, \theta_0$ — подгоночные параметры. Параметр θ_0 отвечает за степень асимметрии, и характеризует относительный поворот энергетического и размерного тел кооперативной потенциальной ямы [2].

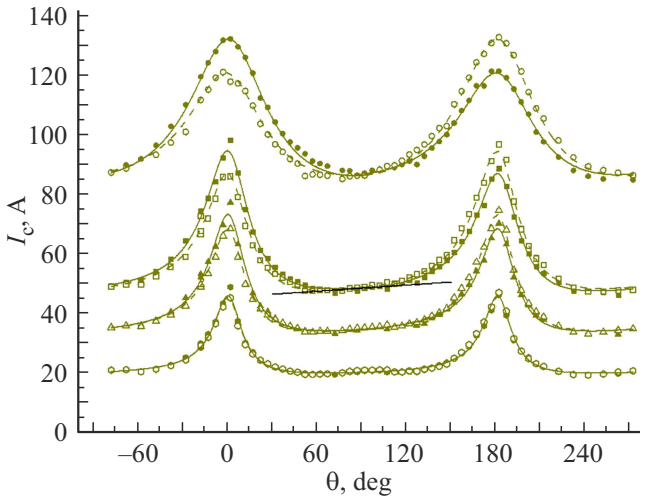


Рис. 1. Угловая зависимость критического тока для полей 0.1 T; 0.3 T; 0.5 T и 1 T (сверху вниз). При 0° и 180° поле ориентировано в плоскости ленты, при 90° и 270° поле направлено по нормали к ленте. Открытые и закрытые символы соответствуют двум противоположным полярностям тока. Черная линия — касательная в точке $\theta = 90°$ для угловой зависимости при 0.3 T.

Линиям на рис. 1 соответствует аппроксимация экспериментальных данных в соответствии с формулой (2). Подобранный параметр θ_0 составил -5.7; -4.7; -4.4; -3.2 для полей 0.1 T; 0.3 T; 0.5 T; 1 T соответственно. Таким образом, при увеличении магнитного поля наблюдается устойчивый тренд к снижению абсолютной величины параметра θ_0, что соответствует снижению асимметрии. Эта тенденция проявляется на рис. 1 как приближение касательной в точке $\theta = 90°$ к горизонтали с увеличением поля.

На рис. 2 приведены угловые зависимости в поле 0.3 T перестроенные для критических токов, определенных по критериям 0.01 μV/cm; 1 μV/cm; 100 μV/cm. Параметр θ_0 для этих зависимостей -5.5; -4.7; -4.1 соответственно. С увеличением критерия электрического поля асимметрия снижается.

Таким образом, различие критических токов для комплементарных (т.е. одинаково отличающихся от нормали) углов $I_c(90° - \theta')$ и $I_c(90° + \theta')$ существенно зависит от величины магнитного поля и выбранного критерия электрического поля. Для оценки влияния асимметрии на величину энергетических потерь при перемагничивании были изучены петли гистерезиса магнитного момента $M(H)$ (рис. 3).

Для комплементарных углов величины магнитного момента в нулевом внешнем поле полностью совпадают, что подтверждает корректность калибровки и отсутствие систематической погрешности в позиционировании образца. В поле ~ 1 T разница в ширине петель и величине магнитного момента также незначительна, что соответствует ранее сделанному наблюдению о практически симметричном поведении $I_c(\theta)$ во внешнем поле 1 T.

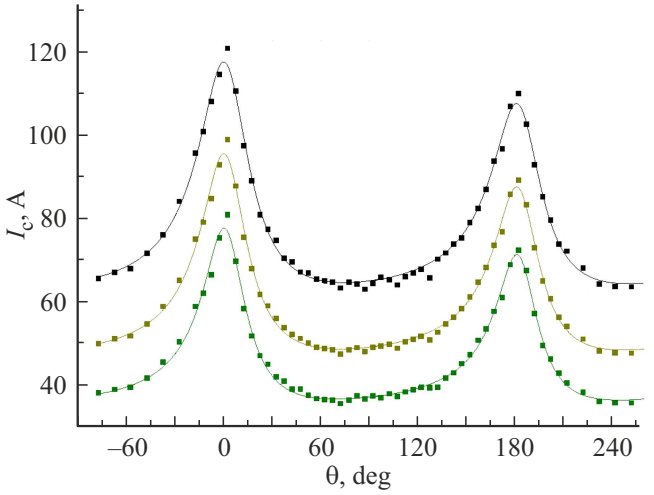


Рис. 2. Угловые зависимости критического тока в поле 0.3 T для критериев электрического поля 0.01; 1; 100 μV/cm (снизу вверх).

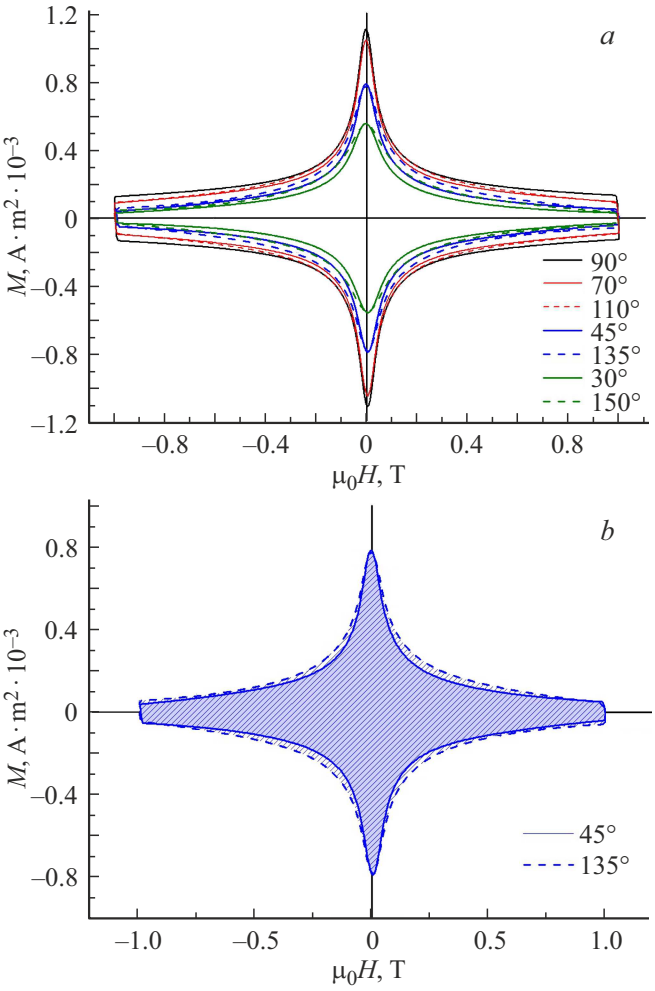


Рис. 3. *a* — гистерезис петель намагничивания для серии комплементарных углов; *b* — сравнение площадей петель гистерезиса магнитного момента для углов 45° и 135°.

Однако в диапазоне от 0 T до 1 T проявляются различия, и площади петель гистерезиса для комплементарных углов отличаются на 15–20%. Такое поведение находится в согласии с выраженной асимметрией угловых зависимостей в полях 0.1 T, 0.3 T и 0.5 T.

Таким образом, в достаточно сильном магнитном поле (в данном случае более 1 T) величина критического тока остается идентичной для комплементарный углов, однако, при перемагничивании гистерезисные потери отличаются на 15 %–20 % в соответствии с площадью петель гистерезиса. В результате даже при отсутствии явной асимметрии на $I_c(\theta|\mu_0 H = 1\,\mathrm{T})$, она все еще существенно определяет эксплуатационные характеристики. Учет данного эффекта при проектировании сверхпроводниковых устройств позволяет ущественно снизить энергетические потери за счет оптимальной пространственной ориентации ленты без модификации ее физических параметров.

4. Заключение

Проведено исследование угловых зависимостей критического тока и петель гистерезиса магнитного момента в композитных ВТСП лентах на основе DyBCO. Показана анизотропия токонесущей способности не только по отношению к направлению магнитного поля, но и по отношению к направлению силы Лоренца. Степень асимметрии угловых зависимостей уменьшается как с увеличением магнитного поля так и с увеличением критерия электрического поля. В достаточно больших магнитных полях асимметрия ослабевает вплоть до полного исчезновения, что создает иллюзию симметричности. Однако при этом площади петель гистерезиса магнитного момента для комплементарных углов сохраняют различия в 15–20 %, указывая на пропорциональные отличия в потерях на перемагничивание. Таким образом, асимметрия, проявляющаяся в малых полях, сохраняет значение для проектирования энергоэффективных сверхпроводниковых устройств, даже при работе в высоких магнитах полях.

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 Reviews Materials **6**, 587–604 (2021). https://doi.org/10.1038/s41578-021-00290-3

[2] В.В. Гурьев, С.В. Шавкин, И.В. Куликов. ВАНТ: ТС **47**, 3 (2024). https://doi.org/10.21517/0202-3822-2024-47-3-93-107

[3] M. Nadeem, M.S. Fuhrer, X. Wang. Nature Reviews Physics **5**, 558–577 (2023). https://doi.org/10.1038/s42254-023-00632-w
[4] J.M. Brooks, R. Mataira, T. Simpson, R.A. Badcock, C.W. Bumby. Appl. Phys. Lett. **126**, 082601 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0248777
[5] M. Chudy, M. Eisterer, H. Weber. Physica C **470**, 20 (2010). https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.098
[6] Zh. Jiang, N. Endo, S. Wimbush, J. Brooks, W. Song, R. Badcock, D. Miyagi, M. Tsuda. J. Phys. Com. **3**, 095017 (2019). http://dx.doi.org/10.1088/2399-6528/ab4437
[7] Zh. Jiang, W. Song, X. Pei, J. Fang, R.A. Badcock, S.C. Wimbush. J. Phys. Commun. **5**, 025003 (2021). https://doi.org/10.1088/2399-6528/abe036
[8] B. Maiorov, B.J. Gibbons, S. Kreiskott, V. Matias, T.G. Holesinger, L. Civale. Appl. Phys. Lett. **86**, 132504 (2005). https://doi.org/10.1063/1.1886253
[9] J. Lee, J. Bang, G. Bradford, D. Abraimov, E. Bosque, D. Larbalestier. IEEE Trans. Appl. Supercond **35**, 5 (2025). https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3505115
[10] E.P. Krasnoperov, V.V. Sychugov, V.V. Guryev, S.V. Shavkin, V.E. Krylov, P.V. Volkov. Electrical Engineering **102** (2020). https://doi.org/10.1007/s00202-020-00977-w
[11] В.В. Гурьев, И.В. Куликов, И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев, Ю.Н. Белотелова, П.В. Волков, П.В. Коновалов, В.С. Круглов, В.Е. Крылов, Д.В. Лазарев, А.А. Никонов, А.В. Овчаров, Д.Н. Раков, С.В. Шавкин. ФТТ **65**, 12 (2023). http://dx.doi.org/10.61011/FTT.2023.12.56725.5015k
[12] V.V. Guryev, A.V. Irodova, N.K. Chumakov, S.V. Shavkin. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics **16**, *1*, 1 (2023). https://doi.org/10.18721/JPM.161.111
[13] V. Guryev, S. Shavkin, V. Kruglov. Journal of Physics: Conference Series **2103** (2021). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012096
[14] E.Yu. Klimenko, S.V. Shavkin, P.V. Volkov. Journal of Experimental and Theoretical Physics **112**, 1055–1081 (1997). https://doi.org/10.1134/1.558341
[15] В.В. Гурьев, В.Е. Крылов, А.В. Иродова, О.А. Кондратьев, С.В. Шавкин. ЖТФ **95**, 9 (2025). https://doi.org/10.61011/JTF.2025.09.61228.83-25

Редактор В.В. Емцев