

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.26>

УДК: 537.62

ЗАХВАТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ ЛЕНТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

А.О. Петров, В.В. Коледов, А.В. Маширов, К.А. Колесов, В.Г. Шавров

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2023.

Аннотация. Создание систем твердотельного охлаждения при криогенных температурах требует разработки источников магнитного поля, способных длительное время удерживать сильные магнитные поля без существенных энергетических затрат. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) семейства Y-Ba-Cu-O в виде объемной керамики и лент пленочных композитов обладают необходимыми свойствами для создания постоянных сверхпроводящих магнитов (ПСМ), захватывающих и длительное время сохраняющих постоянное магнитное поле при температурах 90 К и ниже. В настоящей работе представлены результаты исследования процесса захвата и удержания магнитных полей в ПСМ на основе лент ВТСП в зазоре между двумя стопками отрезков лент. Эксперименты проводились при температурах от 3 до 100 К, в магнитном поле до 10 Тл.

Ключевые слова: постоянные магниты, высокотемпературные сверхпроводники, магнитокалорический эффект, магнитное твердотельное охлаждение при криогенных температурах, захват магнитного потока.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 20-19-00745-П.

Автор для переписки: Петров Александр Олегович,
alexandrpetrov291094@gmail.com

Введение

Явление сверхпроводимости характеризуется полной утратой электрического сопротивления материалом при его охлаждении ниже критической температуры, специфичной для данного вещества. Высокая температура сверхпроводимости (ВТСП) представляет особый интерес с точки зрения практического применения, так как она позволяет использовать менее затратные и более удобные методы охлаждения (например, с использованием жидкого водорода, азота или метана), в отличие от традиционных сверхпроводников, которые требуют жидкого гелия.

На 2023 год наиболее высокотемпературными сверхпроводниками при атмосферном давлении являются купраты, представляющие собой керамические смешанные оксиды (см. рис. 1). Ограничения в практическом использовании керамических ВТСП связаны с тем, что интенсивное магнитное поле, создаваемое током в сверхпроводнике, может привести к разрушению его слоистой структуры и, как следствие, к необратимой утрате сверхпроводящих свойств. Важно отметить, что даже незначительное нарушение сплошности материала в одном участке может вызвать локальный дефект с высоким сопротивлением, что приводит к выделению тепла и, в результате, к последовательному нагреву соседних участков. Это явление может вызвать лавинообразный переход всего проводника в нормальное состояние, т.е. к снижению критического тока образца или даже к полной потере сверхпроводимости.

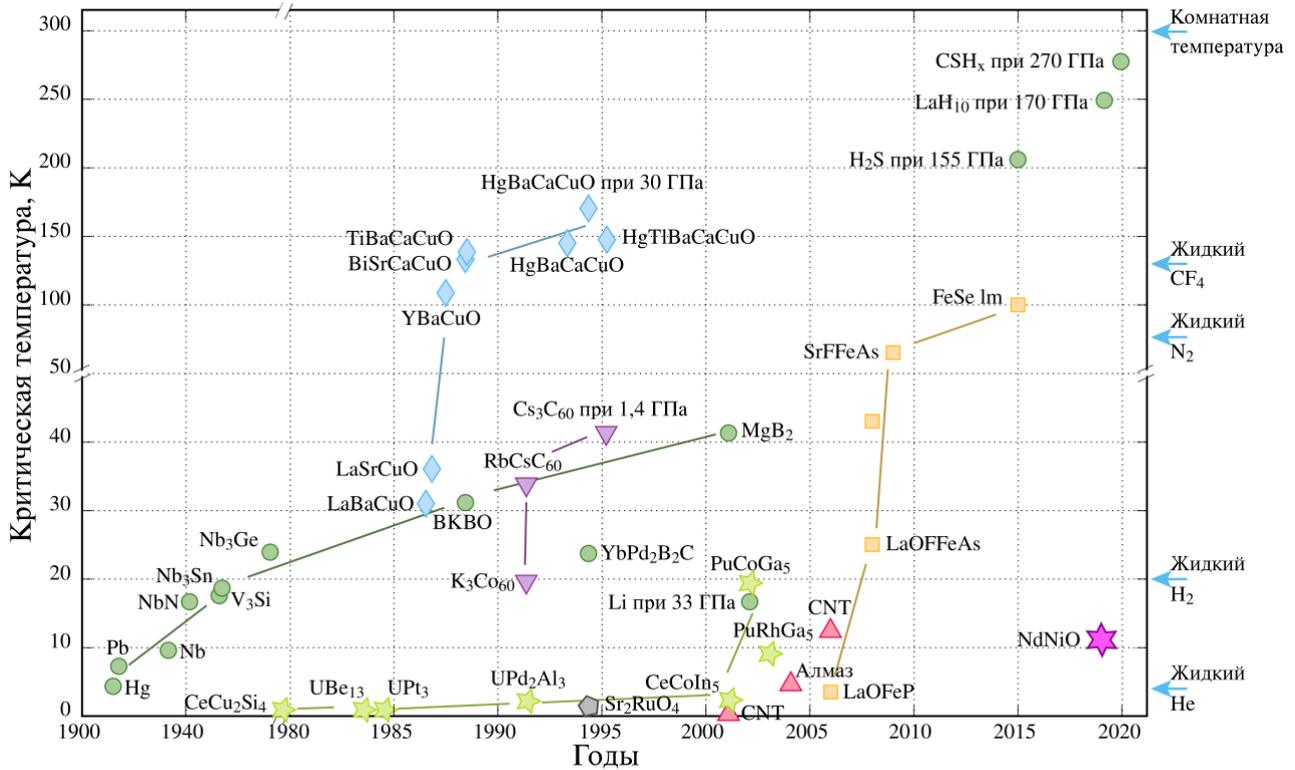


Рис. 1. Диаграмма достижений в области создания новых ВТСП материалов.

Семейство объемных ВТСП материалов типа $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (или $(RE)BCO$, где RE – элемент из класса редкоземельных металлов или иттрий) может быть использовано в качестве магнитов с захваченным полем [1-3] с полями, превышающими самые лучшие традиционные постоянные магниты на основе ферромагнетиков, содержащих редкоземельные металлы. С использованием объемных ВТСП достижимы захваченные поля более 17 Т, что примерно на порядок превышает значения, достижимые лучшими обычными постоянными магнитами [1]. Весьма интересным является эксперимент Томиты и Мураками 2003 года, в котором было продемонстрировано захваченное поле в 17,24 Т при 29 К в зазоре между двух образцов YBCO диаметром 26,5 мм [4]. В 2014 году Даррелл и др. превзошли этот показатель, продемонстрировав захваченное поле в 17,6 Т при 26 К в зазоре между двумя объемными сверхпроводниками GdBCO-Ag диаметром 24 мм, укрепленными кольцами из нержавеющей стали [5].

Также существует растущий интерес к использованию стопок высокотемпературных сверхпроводящих композитных лент. Пател и др.

сообщили о захваченном поле в 17,66 Т при 8 К в стопке диаметром отрезков лент 34,4 мм в 2018 году [6]. Предполагается возможным достичь захват полей более 20 Т в объемных сверхпроводниках (RE)BCO с использованием современных техник обработки материала, позволяющих создавать большие, хорошо связанные сверхпроводящие кристаллы с отличными сверхпроводящими свойствами (такими как, высокая, зависящая от температуры T и внешнего магнитного поля B , критическая плотность тока сверхпроводимости $J_c(B, T)$) [7]. Однако, для захвата таких сильных полей необходимо решить две проблемы. Во-первых, объемные сверхпроводники обладают довольно низкой прочностью на растяжение из-за большого количества внутренних дефектов малого масштаба, таких как поры и микротрещины, образующиеся в процессе плавления. Поскольку сила Лоренца, $F_L = J_c \cdot B$, приводит к большим магнито-индуцированным механическим напряжениям во время намагничивания таких магнитов [8, 9], эти хрупкие материалы часто подвергаются механическому разрушению. Во-вторых, материалы (RE)BCO, как правило, обладают относительно низкой теплопроводностью [10, 11], и, таким образом, при значительном выделении тепла, $Q = E \cdot J$, вследствие движения магнитного потока во время намагничивания, могут происходить катастрофические тепловые неустойчивости и скачки магнитного потока, приводящие к деградации материала [4, 12]. Для решения этих проблем и достижения рекордных захваченных полей, более 17 Т образцы объемных сверхпроводников укреплялись различными методами, включая пропитку смолой и сплавом, обмотку углеволокном [4] и кольцами из нержавеющей стали методом термоусадки [5]. Считается, что адекватное механическое укрепление и термическая стабильность являются ключевыми свойствами, необходимыми для достижения захваченного поля более 20 Т. Достижение таких полей необходимо для важных практических применений, таких как компактные системы ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и магнитно-резонансной томографии (МРТ),

магнитное сепарирование и магнитно-целевая доставка препаратов, твердотельное магнитокалорическое охлаждение и др. [13-18].

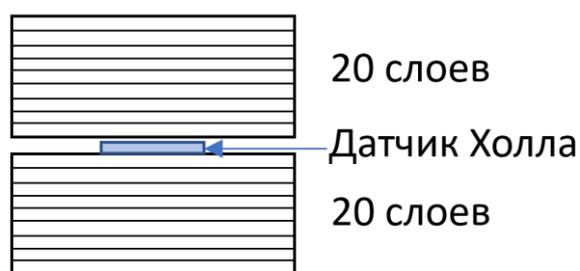
Цель данной работы заключалась в экспериментальном изучении процесса захвата магнитного поля в зазоре между стопками лент ВТСП.

1. Материалы и методы

Образцы лент с ВТСП для экспериментов были получены на предприятии ЗАО «СуперОкс», Москва. Ширина ленты составила 12 мм, толщина композитной ленты – 80 мкм, толщина слоя ВТСП – 5 мкм, критический ток при температуре 77 К – 500 А. В данной работе изучаются экспериментально макеты ПСМ для работы в схеме криомагнитного твердотельного охлаждения. Исследованные экспериментально ПСМ представляют собой 2 стопки из лент ВТСП. В каждой стопке содержится 20 лент, см. рис. 2 а, б.

Измерения поля проводились датчиком Холла расположенном в центре зазора шириной 2 мм, при захолаживании макета ПСМ в нормальном состоянии от температуры 100 К во внешнем магнитном поле от 1 до 10 Тл, с последующим выключением поля. Источником магнитного поля служил сверхпроводящий магнит [19–21].

В ходе эксперимента образец помещался в криостат при температуре 100 К, выше критической точки фазового перехода ВТСП 93 К. Затем включали магнитное поле и температуру понижали до 3 К. Затем выводили внешнее магнитное поле. Наблюдалось захваченное в зазоре между стопками магнитное поле. После этого повышали температуру и измеряли поле, захваченное в зазоре в зависимости от температуры.



а



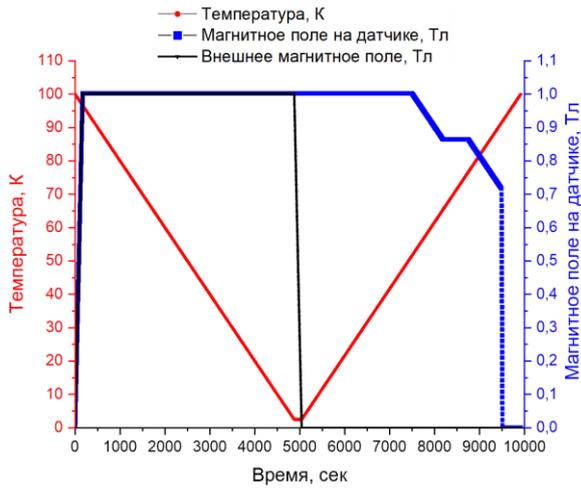
б

Рис. 2. Схематические конфигурации ПСМ, исследуемые в литературе. (а) СПМ с магнитным полем в зазоре между двумя стопками отрезков сверхпроводящих лент ВТСП. (б) Внешний вид ставки с ПСМ, использованной для изучения процесса захвата магнитного поля.

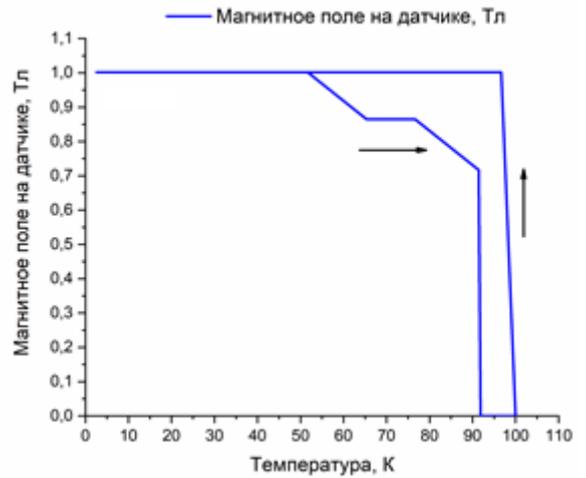
2. Результаты эксперимента

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимостей захваченного поля и температуры ПСМ от времени для двух экспериментов: после выключения поля 1 Тл и 3 Тл.

После вывода внешнего магнитного поля при температуре 3 К, образцы захватывали максимальные магнитные поля 1 Тл и 3 Тл, соответственно. В результате повышения температуры, на графике 3а наблюдаем сохранение захваченного магнитного поля 1 Тл до 50-55 К. Далее с ростом температуры, захваченное магнитное поле снижается, а в интервале от 65 до 75 К остается постоянным на уровне 0,8 Тл. Затем линейно снижается, вплоть до 0 при температуре 93 К. На рисунке 3б показано изменение захваченного магнитного поля от температуры. Таким образом, возможно создание ПСМ на поле 1 Тл при температуре 50 К и менее и 0,8 Тл при температуре жидкого азота.

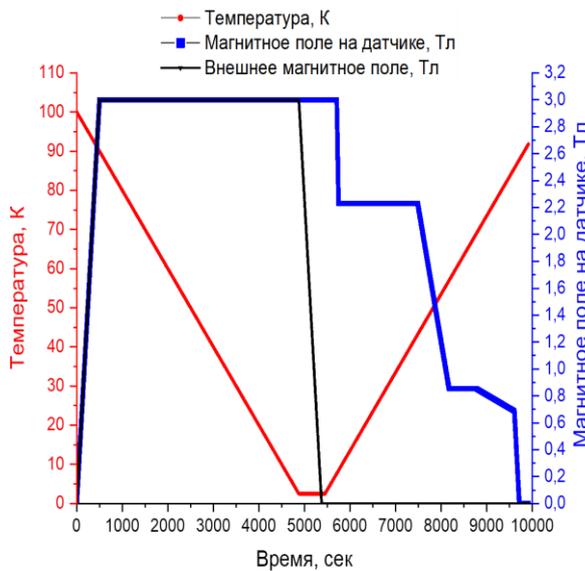


а

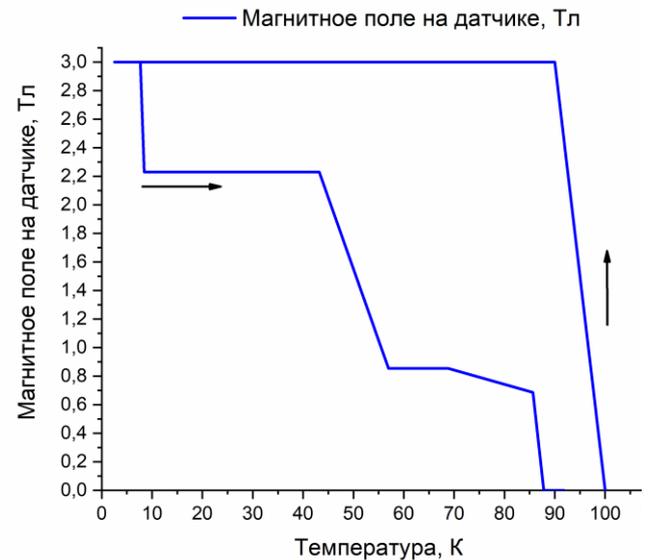


б

Рис. 3. Диаграмма эксперимента по захвату при помощи ПСМ магнитного поля 1 Тл. а) временная зависимость температуры и магнитного поля. б) значение захваченного магнитного поля в зависимости от температуры.



а



б

Рис. 4. Диаграмма эксперимента по захвату при помощи ПСМ магнитного поля 3 Тл. а) временная зависимость температуры и магнитного поля. б) значение захваченного магнитного поля в зависимости от температуры.

На рисунке 4 показано, что, после вывода внешнего магнитного поля, равного 3 Тл при температуре 3 К, и последующего плавного повышения температуры, образцы лент ВТСП скачкообразно отдавали захваченное

магнитное поле. При 8 К произошло резкое снижения магнитного поля от 3 Т до 2,2 Тл. Далее, захваченное поле сохранялось в образцах ПСМ до температур 40-45 К. Затем магнитное поле уменьшалось скачком от 2,2 Тл до 0,8 Тл при температуре 50-58 К. В результате захваченное магнитное поле полностью исчезло при температуре от 86 К до 88 К. Таким образом, возможно использование стопок лент ВТСП для создания ПСМ с захваченным полем до 2,2 Тл.

Заключение

В заключение можно сказать, что проведенные эксперименты показали принципиальную возможность создания миниатюрной магнитной системы ПСМ на основе лент ВТСП с габаритными размерами 12x12x6 мм, обеспечивающей захват в зазоре 2 мм магнитного поля более 2 Тл при температуре менее 45 К и 0,8 Тл при температуре жидкого азота.

В экспериментах наблюдалось скачкообразное снижение захваченного магнитного поля при постепенном повышении температуры. Дальнейшие исследования должны прояснить природу скачков намагничивания при повышении температуры. Более детальные исследования должны прояснить, связаны ли скачки захваченного поля с образованием дефектом или частичным разрушением ВТСП лент силой Лоренца. Кроме того, должна быть изучена долговременная стабильность удержанного поля при стационарной температуре.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-19-00745-П.

Литература

1. Campbell A.M., Cardwell D.A. Bulk high temperature superconductors for magnet applications //Cryogenics. – 1997. – Т. 37. – №. 10. – С. 567-575.
2. Murakami M. Progress in applications of bulk high temperature superconductors // Superconductor Science and technology. – 2000. – Т. 13. – №. 5. – С. 448.

3. Hull J.R., Murakami M. Applications of bulk high-temperature superconductors // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Т. 92. – №. 10. – С. 1705-1718.
4. Tomita M., Murakami M. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K // Nature. – 2003. – Т. 421. – №. 6922. – С. 517-520.
5. Durrell J.H. et al. A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel // Superconductor Science and Technology. – 2014. – Т. 27. – №. 8. – С. 082001.
6. Patel A. et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape // Superconductor Science and Technology. – 2018. – Т. 31. – №. 9. – С. 09LT01.
7. Fujishiro H., Naito T., Awaji S. Proposal of an effective mechanical reinforcement structure for a REBaCuO disk bulk pair by full metal encapsulation to achieve a higher trapped field over 20 T // Superconductor Science and Technology. – 2019. – Т. 32. – №. 4. – С. 045005.
8. Ren Y. et al. Damage caused by magnetic pressure at high trapped field in quasi-permanent magnets composed of melt-textured Y-Ba-Cu-O superconductor // Physica C: Superconductivity. – 1995. – Т. 251. – №. 1-2. – С. 15-26.
9. Johansen T.H. Flux-pinning-induced stress and magnetostriction in bulk superconductors // Superconductor Science and Technology. – 2000. – Т. 13. – №. 10. – С. R121.
10. Noto K. et al. Thermal and mechanical properties of high Tc bulk superconductors and their applications // Physica C: Superconductivity. – 2003. – Т. 392. – С. 677-683.
11. Fujishiro H., Nariki S., Murakami M. Thermal conductivity and thermoelectric power of DyBaCuO bulk superconductors // Superconductor Science and Technology. – 2006. – Т. 19. – №. 7. – С. S447.
12. Gao L. et al. Thermal instability, magnetic field shielding and trapping in single-grain YBa₂Cu₃O_{7-δ} bulk materials // Applied physics letters. – 1994. – Т. 64. – №. 4. – С. 520-522.

13. Saho N. et al. Development of portable superconducting bulk magnet system // *Physica C: Superconductivity*. – 2009. – Т. 469. – №. 15-20. – С. 1286-1289.
14. Nakamura T. et al. Development of a superconducting bulk magnet for NMR and MRI // *Journal of Magnetic Resonance*. – 2015. – Т. 259. – С. 68-75.
15. Durrell J.H. et al. Bulk superconductors: a roadmap to applications // *Superconductor science and technology*. – 2018. – Т. 31. – №. 10. – С. 103501.
16. Patel A. et al. Trapped fields greater than 7 T in a 12 mm square stack of commercial high-temperature superconducting tape // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Т. 102. – №. 10.
17. Patel A. et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape // *Superconductor Science and Technology*. – 2018. – Т. 31. – №. 9. – С. 09LT01.
18. Molodyk A. et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // *Scientific reports*. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 2084.
19. Petrov A.O. et al. Capture of magnetic flux in high-temperature superconductor YBa₂Cu₃O₇ and its destruction // *Chelyabinskiy Fiziko-Matematicheskii Zhurnal*. – 2022. – Т. 7. – №. 3. – С. 359-364.
20. Kolesov K.A. et al. Determination of heat transfer parameters in the mechanical heat switch for a refrigerating machine with magnetocaloric effect // *Chelyabinskiy Fiziko-Matematicheskii Zhurnal*. – 2021. – Т. 6. – №. 1. – С. 111-118.
21. Kuznetsov A.S. et al. The Magnetocaloric Effect upon Adiabatic Demagnetization of a Polycrystalline DyNi₂ Alloy // *Physics of Metals and Metallography*. – 2022. – Т. 123. – №. 4. – С. 397-401.

Для цитирования:

Петров А.О., Коледов В.В., Маширов А.В., Колесов К.А., Шавров В.Г. Захват магнитного поля постоянными магнитами на основе лент высокотемпературного сверхпроводника // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.26>