

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.31>

УДК: 537.62

СОЛЕНОИД НА ОСНОВЕ ЛЕНТ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА ДЛЯ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

К.А. Колесов¹, А.В. Маширов¹, В.В. Коледов¹, А.О. Петров¹,
А.П. Орлов¹, И.В. Бычков², Д.А. Кузьмин², D. Gajda³,
Ю.С. Кошкидько¹, В.Г. Шавров¹, Д.А. Суслов¹

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

² Челябинский государственный университет

454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

³ Institute of Low Temperature and Structure Research PAS
Okolna 2, 50-422 Wrocław, Poland

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2024 г.

Аннотация. Композитные ленты на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) семейства Y-Ba-Cu-O могут применяться для создания постоянных сверхпроводящих магнитов (ПСМ), захватывающих и длительное время сохраняющих постоянное магнитное поле при температурах 90 К и ниже. В настоящей работе предложена оригинальная конструкция ПСМ в конфигурации соленоида, состоящего из колец лент ВТСП. Представлены результаты исследования процесса захвата и удержания магнитных полей в соленоиде, включая зависимость магнитного поля в центре соленоида от температуры после выключения внешнего источника поля, последующего за охлаждением ПСМ во внешнем магнитном поле. Рассмотрена также стабильность удержанного поля в ПСМ при постоянной температуре. Эксперименты проводились при температурах от 3 до 100 К, в магнитном поле до 6,4 Тл. Обсуждается возможность использования соленоидов на основе лент

ВТСП в перспективных системах твердотельного охлаждения на основе магнитокалорического эффекта.

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

Финансирование: Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда №20-19-00745-П, <https://rscf.ru/project/20-19-00745/>

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

Введение

Семейство соединений с высокотемпературной сверхпроводимостью типа (RE)Ba₂Cu₃O_{7-δ}, где RE – элемент редкоземельных металлов или иттрий) применяется для создания токоведущих и магнитных систем, в частности, для создания постоянных сверхпроводящих магнитов с захваченным полем [1-4]. С использованием объемных ВТСП достижимы захваченные поля более 17 Т, что примерно на порядок превышает значения, достижимые лучшими обычными постоянными магнитами [1].

Среди конструкций, описанных в литературе систем, наиболее исследованными являются ПСМ в виде стопки отрезков лент с зазором, в котором измеряют захваченное магнитное поле (рис. 1) [5-7]. Также применяется схема получения кольцевого ПСМ путем формирования объемного кольца из стопки лент с осевым разрезом в центре отрезка, как показано на рис. 2.

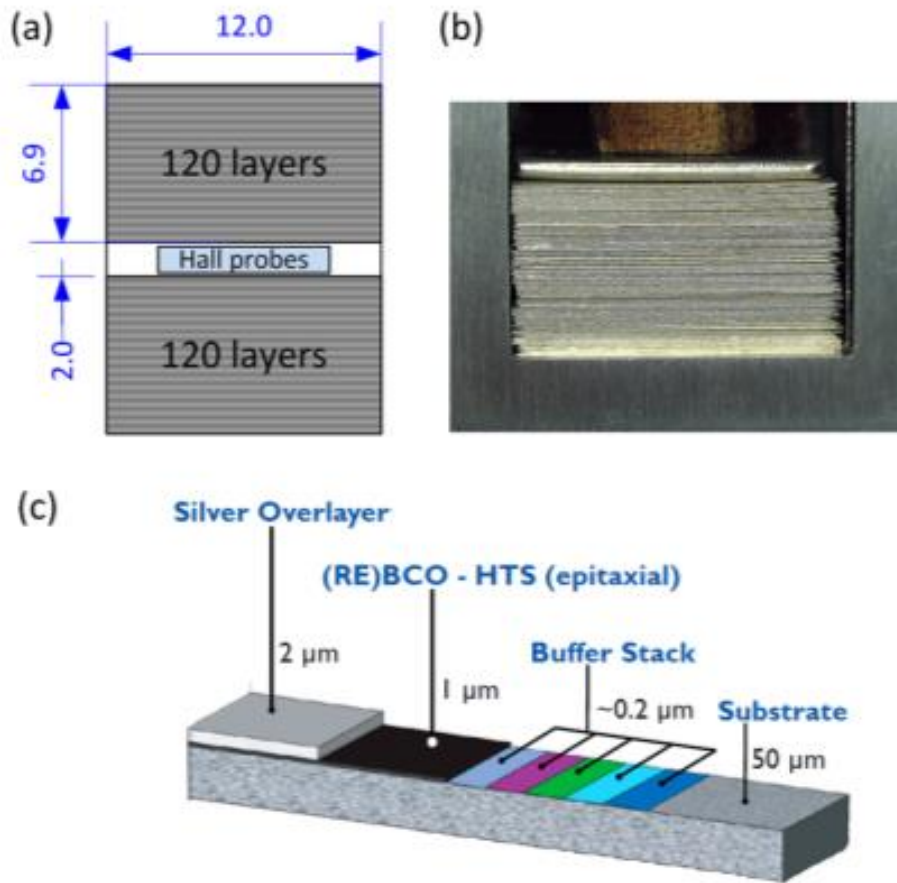


Рис. 1. (а) Схема пакета лент ВТСП с зазором, использованного для эксперимента по захвату поля.
 (б) 120 квадратных слоев ленты, спрессованных для формирования пакета.
 (с) компоненты композитной ленты на основе ВТСП [5].

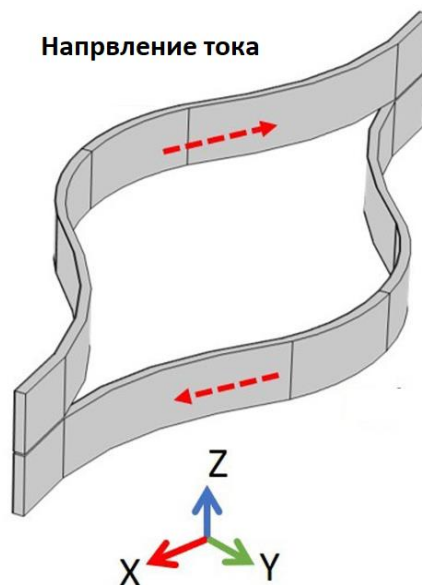


Рис. 2. Схема кольцевого ПСМ из стопки разрезанных отрезков ленты ВТСП [6].

В настоящей работе предложена новая конструкция ПСМ с использованием композитных лент на основе ВТСП, в конфигурации соленоида, выполненного в виде стопки соосных колец из ленты ВТСП с центральными отверстиями.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном и теоретическом изучении процесса захвата магнитного поля в центре соленоида на основе колец из ленты ВТСП и обсуждение возможности его использования для создания систем твердотельного магнитокалорического охлаждения.

1. Материалы и методы

Образцы композитных лент с ВТСП для экспериментов были получены на предприятии ЗАО «СуперОкс», Москва [11]. Ширина ленты – 12 мм, толщина композитной ленты – 80 мкм, толщина слоя ВТСП – 5 мкм, критический ток при температуре 77 К – 500 А. Для проведения эксперимента из лент методом штамповки вырубали кольца диаметром 12 мм с отверстием 4 мм в центре (рис. 3а). В эксперименте сначала изучалось захваченное магнитное поле в центре одного кольца, затем, в центре стопки из 4, 16, 64 и 256 колец. Для измерений, кольца помещали в специально изготовленную вставку в криостат, где внешнее магнитное поле создавалось сверхпроводящим магнитом, а захваченное магнитное поле измерялось в зависимости от времени, внешнего поля и температуры датчиком Холла, расположенном в геометрическом центре соленоида ПСМ (рис. 6б).

Измерения захваченного магнитного поля проводились с помощью датчика Холла, расположенного в центре канала соленоида диаметром 4 мм, при захолаживании макета ПСМ в конфигурации соленоида в нормальном состоянии при температуре 100 К во внешнем магнитном поле от 1 до 10 Тл, с последующим выключением поля. Источником магнитного поля служил сверхпроводящий магнит [8-10]. В ходе эксперимента образец помещался в криостат при температуре выше критической точки фазового перехода 93 К. Затем включали магнитное поле и температуру понижали до 3 К. Затем выводили

внешнее магнитное поле. Наблюдалось захваченное в центре соленоида магнитное поле. После этого повышали температуру и измеряли поле в зазоре в зависимости от температуры и времени.

Проведены измерения зависимости критического тока (J_c) ВТСП ленты от величины внешнего магнитного поля. Они проводились с использованием четырехзондового метода измерения сопротивления в жидком азоте с использованием регулируемого источника магнитного поля от -1.8 Тл до +1.8 Тл при токах до 150 А. Все измерения проводились в перпендикулярном магнитном поле с использованием метода развертки по току (равномерное возрастание или убывание электрического тока) при постоянном значении магнитного поля (рис. 3). Критический ток (J_c) определялся с критерием 1 мкВ/см [12] из зависимостей $E(J)$ представленных на рис. 3. Образец ленты ВТСП имел длину 18 мм и ширину 12 мм (ширина ленты от производителя). Результаты измерений представлены на рис. 4.

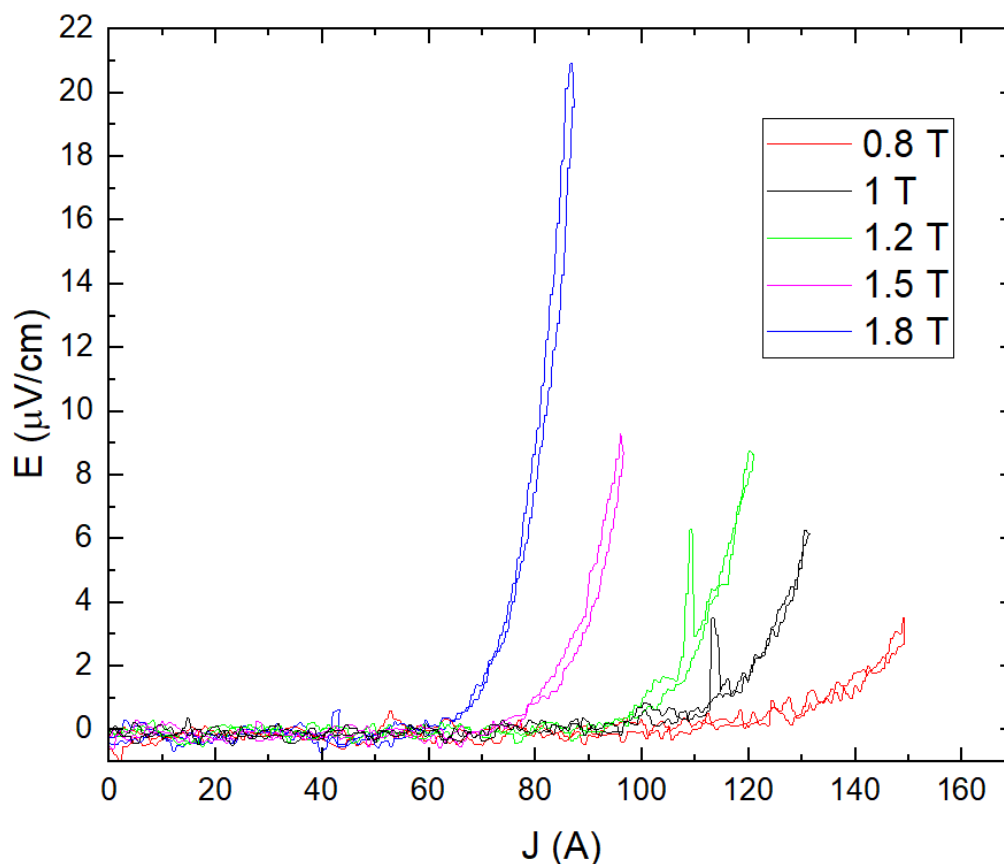


Рис. 3. Зависимость величины электрического поля (E) от тока (J) измеренные в поле (μ_0H) 0.8, 1, 1.2, 1.5 и 1.8 Тл для ленты «SuperOx» (ширина 12 мм) при температуре кипения жидкого азота (78 К).

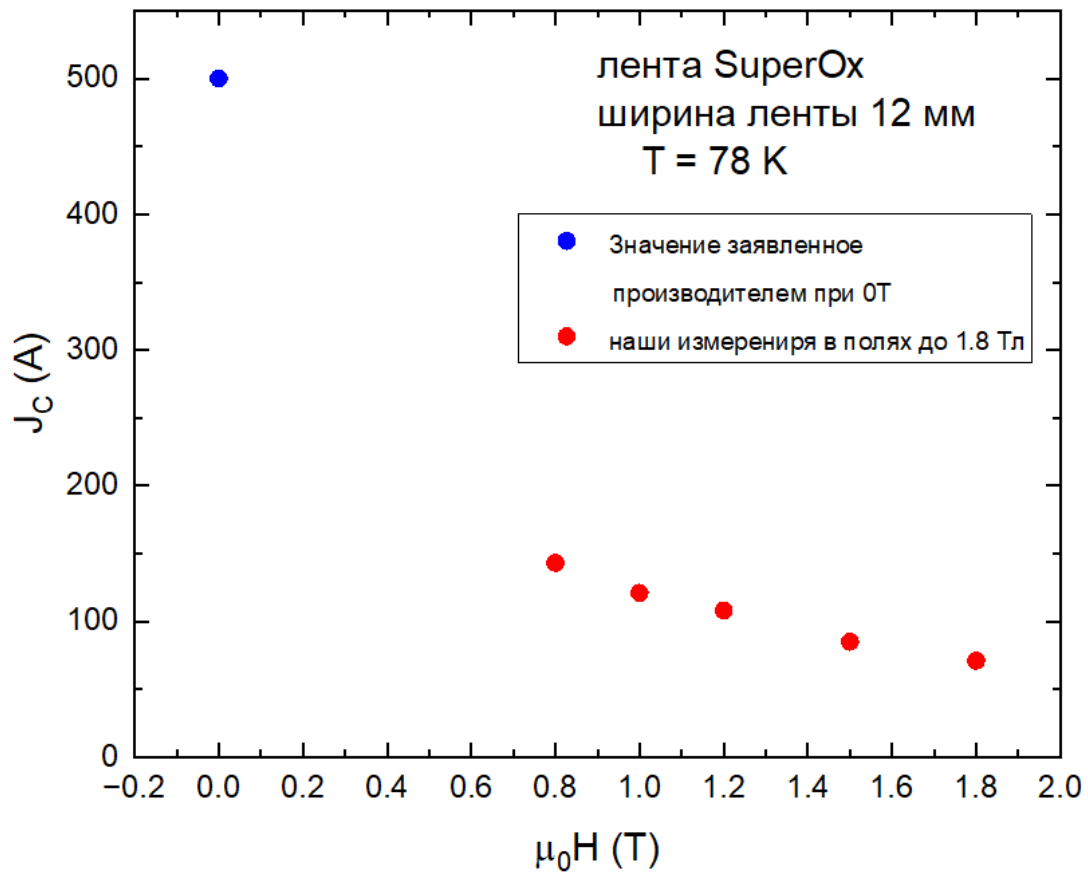


Рис. 4. Зависимость величины критического тока (J_c) для ленты «SuperOx» (ширина 12 мм) от величины магнитного поля ($\mu_0 H$) при температуре кипения жидкого азота (78 К).

В дополнение к основным измерениям величины критического тока были проведены измерения влияния деградации, вызванной многократным отогревом ленты до комнатной температуры с последующим охлаждением до температуры жидкого азота. При проведённых 6 циклах нагрева – охлаждения, описанных выше, не было выявлено изменения величины критического тока (рис. 5). Данное исследование подтверждает высокое качество исследуемых лент, а также пригодность их использования в катушках высокого магнитного поля, которые необходимо периодически отогревать с целью экономии жидких газов.

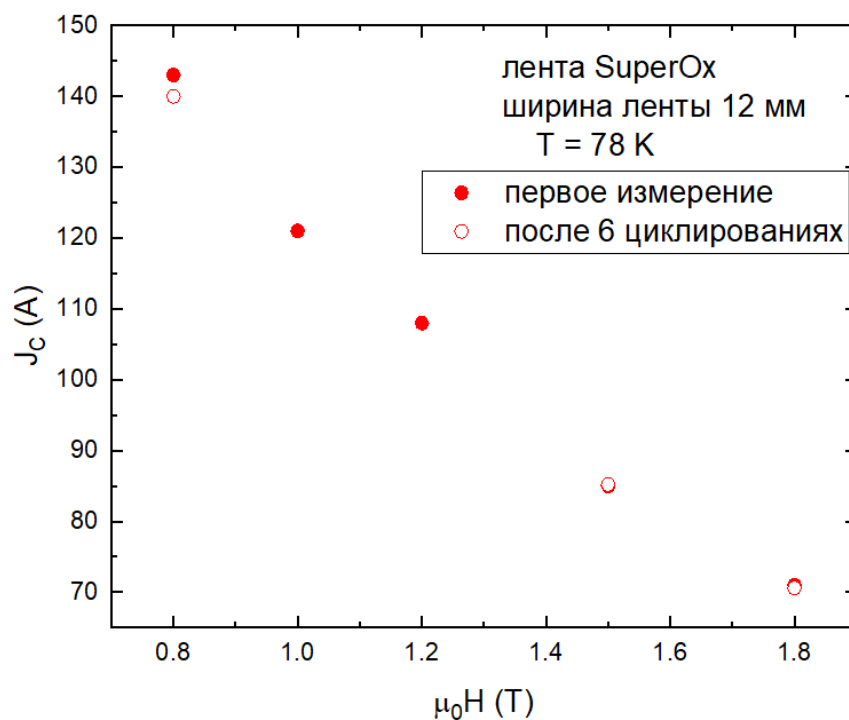


Рис. 5. Зависимость величины критического тока (J_c) для ленты ВТСП (ширина 12 мм) от величины магнитного поля ($\mu_0 H$) при температуре кипения жидкого азота (78 К) при первом измерении и после 6 циклов нагрева охлаждения.

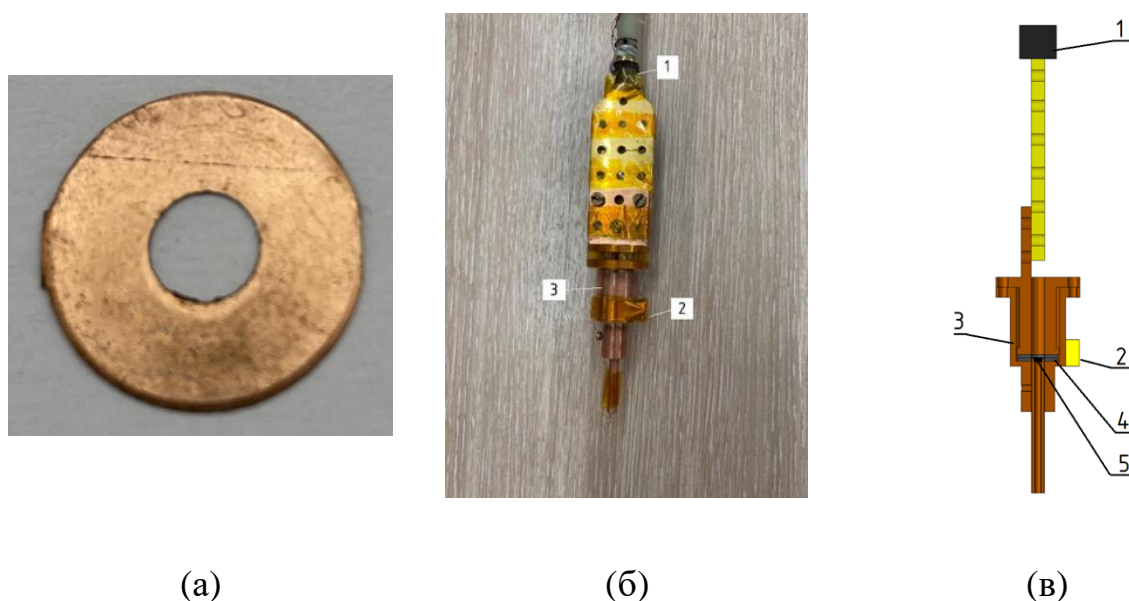


Рис. 6. Экспериментальный макет ПСМ на основе колец из композитной ленты на основе ВТСП. (а) отдельное кольцо, диаметром 12 мм, центральное отверстие диаметром 4 мм, толщина композитной ленты – 80 мкм, толщина слоя ВТСП – около 5 мкм. (б) общий вид вставка, в которой измерялось захваченное магнитное поле в сверхпроводящем магните. (в) схема вставки, где 1 – нагреватель, 2 – датчик температуры, 3 – держатель колец, 4 – кольца ВТСП, 5 – датчик Холла.

2. Результаты эксперимента

Для определения захваченного поля, держатель с кольцами помещался в криостат, в котором находился газообразный гелий. Затем держатель вместе с кольцами нагревался до 100 К, вводилось внешнее магнитное поле, далее происходило охлаждение держателя вместе с кольцами, после этого внешнее магнитное поле выключалось. На последнем этапе держатель вместе с кольцами нагревался до 100 К. Скорость нарастания внешнего магнитного поля была равна 757.6 Э/мин, нагрев держателя вместе с ВТСП кольцами производился со скоростью 3 К/мин. На рис. 7а представлены графики зависимости захваченного поля в отдельном кольце от температуры после выключения поля. На графиках видно, что захваченное поле монотонно, приближенно линейно, убывает с повышением температуры от 3 К до критической точки фазового перехода в сверхпроводящее состояние ВТСП материала – около 93 К. Максимальное захваченное поле одним кольцом – около 1600 Э. Поле, захваченное при температуре 77 К – 250 Э. При увеличении количества колец в соленоиде N качественный характер температурной зависимости сохраняется (рис. 8). Захваченное поле монотонно возрастает с увеличением N . Для 256 колец максимальное захваченное поле составляет $\sim 22\ 000$ Э. После вывода внешнего магнитного поля, при постоянной температуре захваченное магнитное поле не остается постоянным, а медленно убывает со временем (рис. 9). Этот эффект получил название «сползание» (creep). Проведено несколько измерений данного эффекта, для этого захваченное магнитное поле измерялось продолжительное время при постоянной минимальной температуре, что показано на рис. 9.

На основе полученных данных по захваченному полю в зависимости от количества колец N был построен график рис. 10. Как видно для разного количества колец насыщение захваченного магнитного поля происходит при разных внешних магнитных полях.

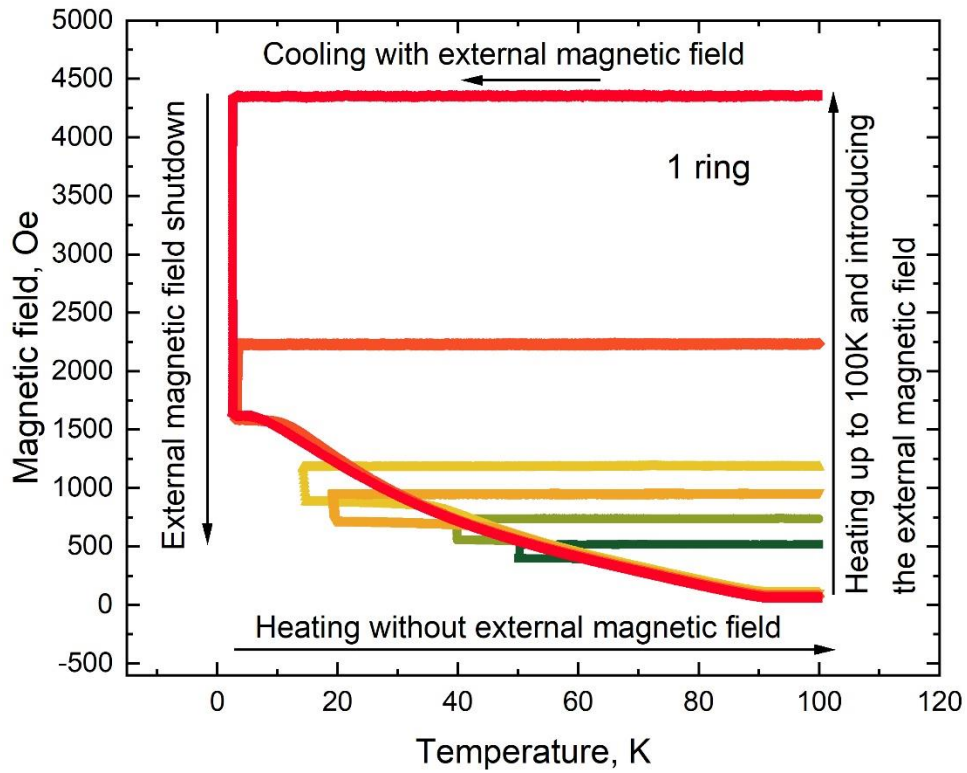


Рис. 7. Магнитное поле захваченное ПСМ в виде отдельного кольца из композитной ленты на основе ВТСП.

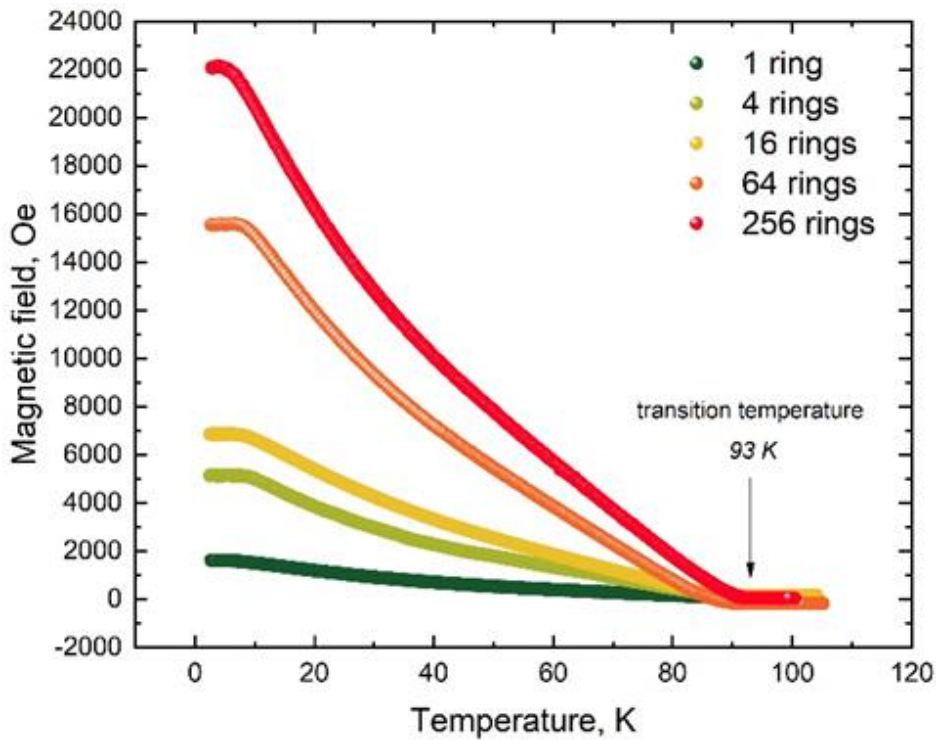


Рис. 8. Захват магнитного поля соленоидом из N колец, где N = 1, 4, 16, 64, 256.

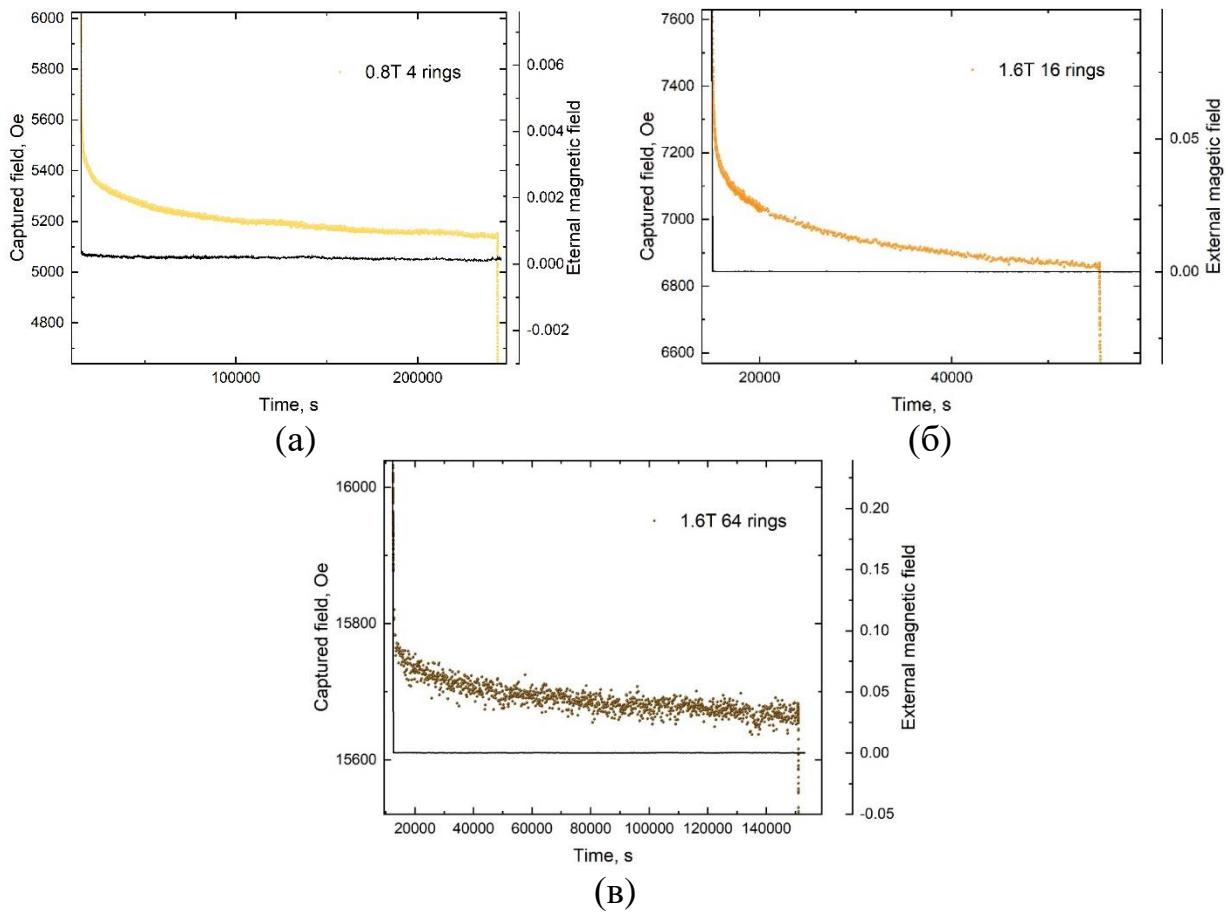


Рис. 9. Временная нестабильность захваченного поля при постоянной температуре. (а) зависимость поля, захваченного 4 кольцами ВРСП при температуре 3 К при постоянном поле $H = 5050$ Э. (б) то же для $N = 16$, $H = 1.6$ Тл. (в) нестабильность захваченного поля при $N = 64$, $H = 0$.

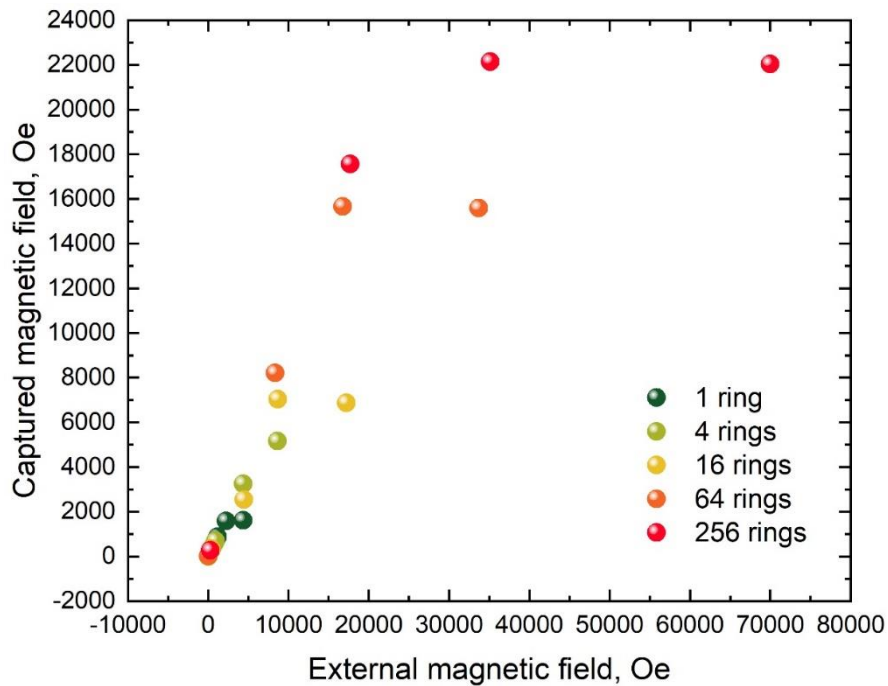


Рис. 10. Зависимость захваченного от внешнего магнитного поля.

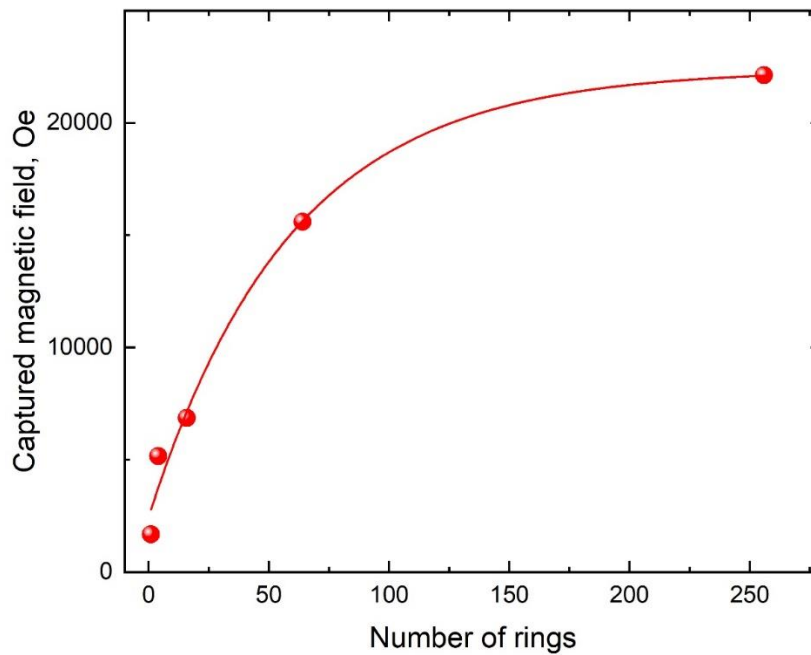


Рис. 11. Зависимость максимального захваченного магнитного поля от количества колец.

3. Теоретическая модель

Для объяснения полученных экспериментальных данных предложена теоретическая модель. Будем считать, что во внешнем магнитном поле в стопке колец ВТСП индуцируется слабозатухающий ток, по порядку величины соответствующий критическому току. В таком случае, создаваемое магнитное поле можно оценить как поле соленоида высотой L образованного проволокой ВТСП, намотанной в катушку радиусом R с числом витков N , по которому протекает ток I . Поле в центре соленоида можно рассчитать по известной формуле:

$$B_{max} = \frac{n\mu_0 I R^2}{2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} dx = \frac{n\mu_0 I L}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \quad (1)$$

$$n = \frac{N}{L} = \frac{1}{h}, \quad (2)$$

где B_{max} – магнитное поле в центре соленоида, n – плотность укладки, I – ток, L – высота соленоида, R – радиус обмотки.

В случае длинного соленоида ($L \gg 2R$), радиальными размерами колец можно пренебречь:

$$B_{\infty} = \frac{\mu_0 I}{h} \approx \frac{1,26 \times 10^{-6} \frac{\text{М} \cdot \text{КГ}}{\text{А}^2 \cdot \text{С}^2} \times 166 \text{ А}}{80 \times 10^{-6} \text{ м}} = 2,6 \frac{\text{КГ}}{\text{А} \cdot \text{С}^2} = 2,6 \text{ Т} \quad (3)$$

Для соленоида, размеры которого сопоставимы с радиальными, поле в центре может быть вычислено следующим образом:

$$B_{max} = \frac{n\mu_0 IL}{\sqrt{4R^2 + L^2}} = \frac{\mu_0 IN}{\sqrt{4R^2 + (Nh)^2}} \quad (4)$$

Тогда отношение B_{max}/B_{∞} :

$$\frac{B_{max}}{B_{\infty}} = \frac{Nh}{\sqrt{4R^2 + (Nh)^2}} \quad (5)$$

По этой формуле можно определить индукцию реального соленоида по отношению к идеальному, т.е. бесконечной длины.

Для оценки величины магнитного поля положим радиус соленоида равным среднему радиусу кольца $R = (R_1 + R_2)/2 = 4$ мм. Значение критического тока, заявленное производителем, составило 500 А при ширине ленты 12 мм при температуре жидкого азота. С учетом геометрии полученного кольца ширина «обмотки» составляет 4 мм. В этом случае максимальный ток (J_{max}), протекающий через «обмотку» (одного кольца), составляет 166 А ($500 \text{ А} \cdot 4 \text{ мм} / 12 \text{ мм} = 166 \text{ А}$). Толщина сверхпроводящего слоя в ленте составляет 5 мкм при общей толщине ленты 80 мкм. Таким образом, при максимально плотном уложении лент в стопку можно получить плотность укладки (n) равной 12500 слоев на метр. Исходя их выше указанных допущений можно провести расчет магнитного поля, описанного выше соленоида для различного количества колец. В этом случае необходимо учесть то, что данный расчет не учитывает влияние как внешнего так захваченного магнитного поля на величину максимального тока, протекающего в кольце. Результаты расчета для различного количества колец представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения магнитного поля соленоида при различном числе колец при температуре кипения жидкого азота (78 К).

Количество колец	Высота соленоида (мм)	Расчётные значения поля в центре соленоида (Тл)	Экспериментальные значение захваченного поля в центре соленоида (Тл)
1	0.08	0.026	0.0196
4	0.32	0.104	0.0569
16	1.28	0.412	0.0736
64	5.12	1.406	0.1149
256	20.48	2,429	0.23
бесконечность	бесконечность	2.6	-

Как видно из Таблицы 1, максимальное значение магнитного поля в данной конфигурации и при бесконечной длинны, рассчитанное на основании уравнения (3), может достигать 2.6 Тл при температуре кипения жидкого азота (78 К). Однако, известно, что влияние магнитного поля снижает величину максимального (критического) тока. Наши исследования показывают, что, что магнитное поле в 0.8 Тл снижает величину критического тока более, чем в 3 раза до 130 А (при 78 К) (рис. 4). Таким образом это приводит к снижению величины магнитного поля в соленоиде. Кроме того, в реальных условиях плотность укладки может быть значительно меньше из-за заусенцев и неровности поверхности неизбежно появляющихся в процессе вырубке колец методом штамповки. Кроме того, ток в сверхпроводнике не распределен равномерно, а протекает вокруг вихрей Абрикосова, структура которых зависит как от внешнего магнитного поля и температуры, так и от наличия дефектов в сверхпроводнике. Таким образом, в реальном сверхпроводящем соленоиде, состоящем из 256 колец, мы наблюдаем захваченное поле 0.23 Тл при 78 К.

Для того, чтобы сделать модель реалистичнее, рассмотрим кольцо (полый цилиндр), изготовленный из ВТСП, высотой l , внутренним радиусом R_1 и внешним радиусом R_2 . Пусть этот цилиндр помещен во внешнее магнитное поле $\mathbf{B} = (0, 0, B_z)$, где ось z совпадает с осью цилиндра. Предположим, что в момент

времени $t = 0$ внешнее магнитное поле «выключили», необходимо рассчитать каким будет распределение внешнего магнитного поля в пространстве и времени $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$. Удобно перейти в цилиндрическую систему координат.

Для решения поставленной задачи необходимо решить уравнения Максвелла внутри и вне цилиндра:

$$\partial E_{\varphi} / \partial z = \partial B_r / \partial t \quad (6)$$

$$r^{-1} \partial (r E_{\varphi}) / \partial r = - \partial B_z / \partial t \quad (7)$$

$$J_{\varphi} = \mu_0^{-1} (\partial B_r / \partial z - \partial B_z / \partial r) \quad (8)$$

где B_r и B_z – радиальные и аксиальные компоненты магнитной индукции, J_{φ} и E_{φ} – плотность тока и индуцируемое электрическое поле.

Для учета особенностей сверхпроводящего материала необходима также вольт-амперная характеристика образца (рис. 3). Ее обычно записывают в виде сильно нелинейного степенного закона [13]:

$$E_{\varphi} = E_c (J_{\varphi} / J_c)^n \quad (9)$$

Вне сверхпроводника можно применить закон Ома в обычной форме: $E_{\varphi} = \rho J_{\varphi}$, где ρ – удельное сопротивление непроводящей среды. На границе сверхпроводника и немагнитной области задается условие непрерывности нормальной компоненты вектора магнитной индукции.

Решение системы уравнений необходимо проводить численно. Расчеты показывают, что поле медленно убывает с течением времени как $B \sim t^{-1/2}$. Максимального значения поле достигает в центре цилиндра (рис. 9).

4. Обсуждение результатов

Таким образом, экспериментально показано, что соленоид из ВТСП колец позволяет захватывать магнитные поля до 2,2 Тл при $T = 10$ К и 2200 Э при $T = 77$ К.

Захваченное соленоидом поле спадает монотонно, приближенно линейно, при увеличении температуры до критической точки перехода в сверхпроводящее состояние. Ситуация качественно отличается от наблюдавшейся в работе [7], в которой сообщается, что магнитное поле, захваченное в зазоре между двумя стопками лент ВТСП, спадает с температурой скачкообразно при постепенном уменьшении температуры.

Для лучшего понимания природы различий, посмотрим на схему двух экспериментов (рис. 12). В случае зазора между двух стопок лент ВТСП сверхпроводящие слои ориентированы по внешнему магнитному полю. Это приводит к тому, что пока поле меньше первого критического все магнитное поле целиком вытесняется из каждого сверхпроводящего слоя. Токи в каждом сверхпроводящем слое протекают вблизи границ на толщине, определяемой лондоновской глубиной проникновения и создаваемые ими магнитные поля складываются. В случае стопки колец с отверстием магнитное поле ориентировано перпендикулярно плоскости сверхпроводящих слоев. Оно также вытесняется из объема сверхпроводника, однако токи опять протекают лишь в тонком приповерхностном слое, что для этой геометрии означает – вблизи внутреннего и внешнего радиусов, но не внутри кольца. Очевидно, что два тока дают меньший вклад, чем массив токов, как в первом случае.

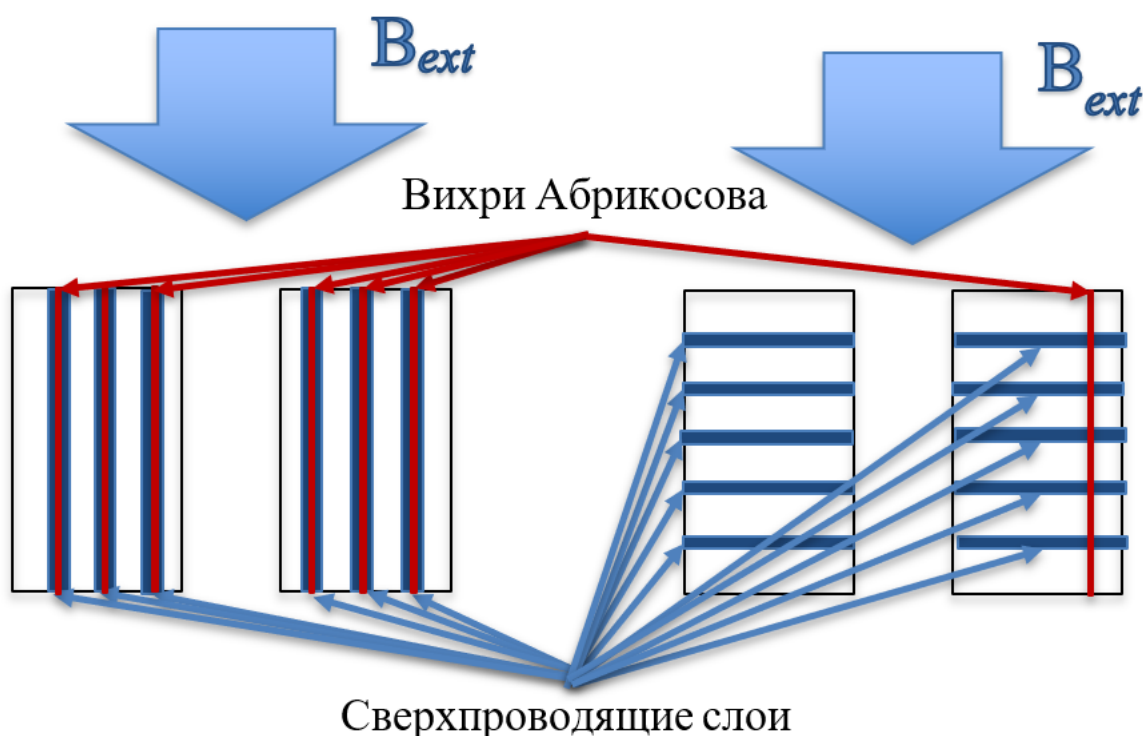


Рис. 12. Схема экспериментов.

При магнитных полях выше первого критического, в ВТСП зарождаются вихри Абрикосова, т.е. магнитное поле не полностью вытесняется из объема сверхпроводника, а частично проникает в него. Количество вихрей n определяется как $n\Phi_0 = BS$, где Φ_0 – квант магнитного потока, B – величина внешнего магнитного поля, S – площадь сверхпроводника, пересекаемая магнитными силовыми линиями. Из-за различий в геометрии площадь существенно отличается: площадь сверхпроводящих слоев в кольце значительно больше площади сверхпроводящих слоев в стопке, а значит в кольцевой структуре возникнет большее количество вихрей Абрикосова, т.е. меньшая часть внешнего поля будет вытеснена за пределы сверхпроводника. Механизм образования вихрей также будет существенно отличаться. Часть магнитного поля, проникающего в сверхпроводник, будет меняться скачками с величиной $\Delta B = \Phi_0/S$, соответствующей зарождению/исчезновению одного вихря. В случае колец, вихри, созданные во всех сверхпроводящих слоях, будут объединяться в нить и изменять магнитное поле на малую величину $\Delta B_k = \Phi_0/S_k$, S_k – площадь кольца. В случае со стопкой слоев вихри будут создаваться/исчезать одновременно во всех слоях и изменять магнитное поле на гораздо большую

величину $\Delta B_c = N\Phi_0/S_c$, где N – общее число сверхпроводящих слоев, S_c – поперечная площадь сечения одного слоя. Это качественно объясняет, что магнитное поле, захваченное в зазоре между двумя стопками лент ВТСП, спадает с температурой скачкообразно при постепенном уменьшении температуры.

К тому же необходимо учитывать и тот факт, что в кольцевой геометрии вихри могут перемещаться в плоскости кольца в то время, как в стопке ВТСП они оказываются зажаты внутри сверхпроводящих слоев, что тоже играет немаловажную роль в процессе захвата внешнего магнитного поля.

Из приведенных выше рассуждений можно предложить стратегии для увеличения захваченного поля в кольцевой конфигурации. Во-первых, нужно сократить площадь кольца. Это можно сделать, приблизив друг к другу внешний и внутренний его радиусы. При этом желательно уменьшить величину обоих, т.е. сделать кольцо как можно тоньше. Во-вторых, было бы неплохо иметь технологию изготовления колец ВТСП, при которой сверхпроводящие плоскости были бы сами замкнуты в кольца, т.е. чтобы они образовывали концентрические цилиндры. Например, каким-нибудь образом изогнув пленку ВТСП, сформировав из нее трубку. На данный момент такая технология недоступна.

Заключение

В заключение можно сказать, что экспериментальные исследования ПСМ в конфигурации соленоида из набора соосных колец, выполненных из композитных лент на основе ВТСП, показали, что захваченное магнитное поле монотонно, приближенно линейно снижается при повышении температуры соленоида до критической точки сверхпроводящего перехода. Максимальное захваченное магнитное поле соленоидом из 256 колец составляет 22 000 Э при $T = 10$ К. При $T = 77$ К, максимальное захваченное поле составляет около 2200 Э.

Финансирование: Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда №20-19-00745-П, ссылка на информацию о гранте <https://rscf.ru/project/20-19-00745/>

Литература

1. Murakami M. Progress in applications of bulk high temperature superconductors // Superconductor Science and technology. – 2000. – Т. 13. – №. 5. – С. 448.
2. Hull J.R., Murakami M. Applications of bulk high-temperature superconductors // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Т. 92. – №. 10. – С. 1705-1718.
3. Wang Q. et al. Review on high-temperature superconducting trapped field magnets // Superconductor Science and Technology. – 2024. – Т. 37. – №. 12. – С. 123005.
4. 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.
5. 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.
6. 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>
7. Petrov A.O. et al. Capture of magnetic flux in high-temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_7$ and its destruction // Chelyabinskiy Fiziko-Matematicheskii Zhurnal. – 2022. – Т. 7. – №. 3. – С. 359-364.
8. 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.
9. Kuznetsov A.S. et al. The Magnetocaloric Effect upon Adiabatic Demagnetization of a Polycrystalline $DyNi_2$ Alloy // Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Т. 123. – №. 4. – С. 397-401.

10. Chikurov D.S., Rudominskiyy A.E., Volkov M.P. Magnetization and Flux Capture in a Superconducting Ring Made of High-T_c 2G Tape // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2023. – Т. 16. – №. 6. – С. 838-844.
11. Baskys A. et al. A trapped field of 13.4 T in a stack of HTS tapes with 30 μm substrate // arXiv preprint arXiv:1709.03085. – 2017.
12. Brandt E.H. Superconductor disks and cylinders in an axial magnetic field. I. Flux penetration and magnetization curves // Physical Review B. – 1998. – Т. 58. – №. 10. – С. 6506.

Для цитирования:

Колесов К.А. и др. Соленоид на основе лент высокотемпературного сверхпроводника для магнитокалорических применений // Журнал радиоэлектроники – 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.31>