

means of the thermal imaging device there fixed the values of the specified Johnson criteria, necessary for the rational design of such devices and the prognosis of their range.

УДК 621.37; 538.08

Физические предпосылки применения сверхпроводников в импульсной энергетике микросекундного диапазона

Ю. Д. Куроедов, Г. Л. Дорофеев, В. С. Вяткин
РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

Рассмотрены методы накопления и быстрого вывода энергии магнитного поля из индуктивных накопителей с помощью сверхпроводящих магнитных экранов. Приведены результаты исследований экранирующей способности экранов, характерных времен проникновения поля внутрь экранов и величины ЭДС, возникающей во вторичной обмотке, связанной с экраном общим магнитным потоком.

Формирование мощных электрических импульсов тока состоит в накоплении энергии в емкостных или индуктивных накопителях и последующем выводе ее в нагрузку с помощью коммутирующих устройств.

Исторически источники импульсной энергии с запасом энергии порядка 0,1–1 МДж, мощностью порядка 1 ГВт создавались на основе высоковольтных конденсаторных батарей (КБ) [1]. Современные частотные КБ типа ИКЧ-50-0,12 энергоемкостью 150 Дж имеют плотность запасаемой энергии $w = 0,01\text{--}0,02 \text{ МДж}/\text{м}^3$ [2]. Конструкция импульсных источников энергии энергоемкостью $10^5\text{--}10^6$ Дж на основе этих, сравнительно мелких, модулей чрезвычайно сложна (количество элементов достигает нескольких тысяч, включая выравнивающие со-противления, замыкатели, разрядники, шины). Система вывода требует сложную схему синхронизации запуска разрядников, высоковольтные маслонаполненные трансформаторы.

В сверхпроводящих индуктивных накопителях (СПИН) с полем 2–3 Тл запасается энергия плотностью $w = 2\text{--}4 \text{ МДж}/\text{м}^3$, однако их индуктивность велика, и быстрый вывод энергии в виде импульсов 10–100 мкс осуществляется путем многоступенчатой коммутации. Полупроводниковые устройства, обеспечивающие быстрый разрыв сильноточной цепи, рассчитаны на ток в несколько килоампер, вакуумные и газовые коммутаторы — $10^4\text{--}10^5$ А. Одиночные попытки применения сверхпроводящих (СП) размыкателей мощностью порядка 10^7 Вт не увенчались успехом. Необходимость охлаждения магнитной системы до $T = -273$ °С также препятствовала распространению СП накопителей в импульсной энергетике.

В конце XX века появилось несколько новых обстоятельств в пользу применения СПИН в

качестве основы импульсных источников энергии. Прежде всего это снятие проблемы охлаждения СП-устройств до гелиевых температур за счет создания и более широкого применения криокуллеров [3], а также открытие и освоение среднетемпературных (Nb_3Sn , NbN , MgB_2) и высокотемпературных сверхпроводников (иттриевая, висмутовая и другие керамики), работоспособных при $T > 10$ К и даже при $T > 77$ К.

Создание магнитных систем с запасом энергии $10^5\text{--}10^6$ Дж, объемом $0,1\text{--}0,5 \text{ м}^3$ не представляет сегодня проблемы, так как производство проводов для них освоено у нас в стране и за рубежом [4, 5], технология изготовления магнитов отработана [6]. Однако быстрый вывод энергии из индуктивных накопителей затруднен по причине большей индуктивности и ограничений на скорость изменения поля в обмотке ($dB/dt < 1 \text{ Тл}/\text{с}$) из-за возможности перехода обмотки в нормальное состояние и рассеяния в ней большей части запасенной энергии.

Авторами статьи в 1992 г. предложен метод накопления и вывода энергии из индуктивного накопителя с помощью СП магнитного экрана, размещенного между накопительной и вторичной обмотками [7]. Затем был предложен метод трансформаторного вывода энергии из СП-экрана, внутри которого запасается энергия поля, созданного наведенными СП-токами [8]. Новизна этих технических решений заключается в том, что изменение магнитного потока происходит за счет затухания экранирующих токов на сопротивлении самого экрана, переведенного в нормальное (резистивное) состояние, в отличие от традиционной схемы, в которой ток первичной обмотки затухает на внешнем сопротивлении.

Экран представляет собой тонкостенный цилиндр, который может быть выполнен как из

низкотемпературных сверхпроводников, так и из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые являются керамиками. Большое число работ по созданию электротехнических защитных устройств мощностью в десятки МВт (ограничители токов короткого замыкания) на основе ВТСП [9], работающих при азотной температуре, опирается на достижения технологии изготовления ВТСП в виде колец, труб, шайб, некоторые из которых могут применяться для коммутации магнитного потока за времена милли- и микросекундного диапазонов.

Для эффективного вывода энергии из экрана необходимо быстро переводить его в резистивное состояние, т. е. обеспечивать распространение нормальной фазы. Известно, что процесс проникновения поля внутрь сверхпроводника может иметь лавинообразный характер [10]. В наших работах [11, 12] и ниже показано, что можно обеспечить режим самоподдерживающегося распространения нормальной фазы вдоль СП-экрана со скоростью до 2000 м/с, что на два порядка больше известного теплового механизма. Появилась возможность быстрого перевода достаточно больших объемов сверхпроводника.

Результаты исследований экранирующей способности и механизмов разрушения СП-магнитных экранов представлены ниже.

Способы накопления и вывода энергии с помощью СП-экранов

Магнитная плотина

Схема импульсного источника энергии (ИИЭ) типа магнитная плотина представлена на рис. 1. Устройство состоит из первичной обмотки 1, вторичной обмотки (2 или 4), соединенной с нагрузкой, СП-экрана 3, обмотки управления 5, датчика Холла 6, источника постоянного тока, системы охлаждения. Первичная и вторичная обмотки могут быть как сверхпроводящими, так и несверхпроводящими. Устройство работает следующим образом. Охлаждают экран до температуры ниже критической, т. е. переводят его в СП-состояние, тем самым создают магнитный барьер между обмотками. С помощью маломощного источника вводят ток в первичную обмотку до тока $I_1 = I_0$ (рис. 2, а) такой величины, чтобы ток в экране не превышал критического значения, т. е. не нарушились его барьерные свойства. Так осуществляется накопление электромагнитной энергии в виде магнитного поля в зазоре между первичной обмоткой и экраном (см. рис. 1, б).

Для вывода энергии в нагрузку на обмотку управления подают импульс тока. Экран локально или целиком переходит в резистивное состояние. Ток в экране затухает из-за резистивных потерь в нем, т. е. разрушается магнитный барьер между обмотками 1 и 4. Во вторичной обмотке возникает ток, удерживающий

магнитный поток, который ранее удерживался СП-током экрана. Наведенный во вторичной цепи ток $I_2 = (N_1/N_2)I_0$ затухает на сопротивлении нагрузки, производя полезную работу.

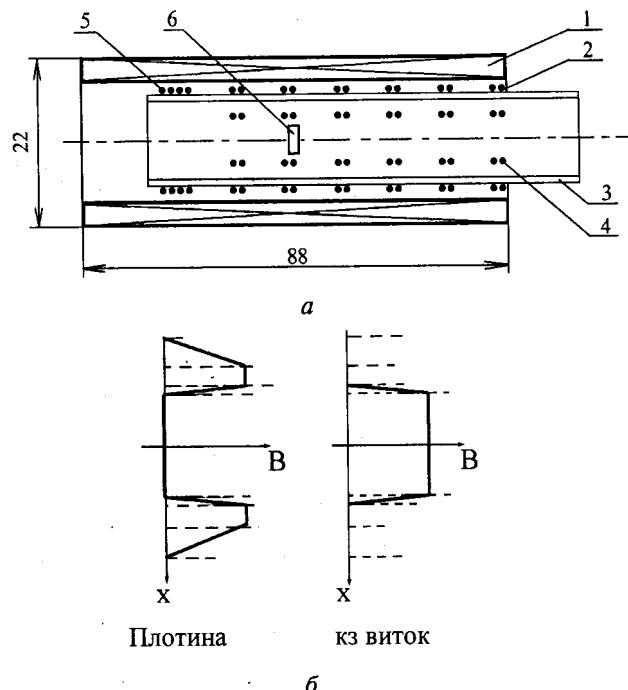


Рис. 1. ИИЭ типа магнитная плотина:
а — схема устройства ИИЭ на основе экранов; б — распределение магнитного поля в сечении магнитной системы на этапе накопления энергии в схеме магнитной плотины и короткозамкнутого витка

Энергия плотностью $w = B^2/2\mu_0$ запасается в зазоре между соленоидом диаметром D_1 и экраном диаметром D_3 . Величина запасенной энергии $W_0 \sim w(D_1^2 - D_3^2)$ увеличивается при уменьшении D_3 , однако КПД вывода энергии увеличивается с увеличением коэффициента связи между обмотками $k \sim D_2^2/D_1^2 \sim D_3^2/D_1^2$. Эффективность устройства максимальна при $D_2^2 = 2D_1^2$, при этом коэффициент связи первичной обмотки со вторичной $k \sim 0,5$.

Магнитный экран — индуктивный накопитель

Запасать энергию можно непосредственно в объеме ограниченном экраном, внутри которого размещается вторичная обмотка. Изменение токов в элементах устройства представлено на рис. 2, б. На этапе ввода тока в первичную обмотку экран находится в нормальном состоянии. После заряда первичной обмотки до тока I_1 (в течение времени от t_0 до t_1) охлаждают экран (за время $t_1 - t_2$) до температуры ниже T_c , затем уменьшают ток I_1 (за время $t_2 - t_3$) до нуля (с помощью источника тока или разрядного сопротивления). При этом ток в экране увеличивается до значения I_2 , затем при необходимости

реализуют режим хранения энергии, запасенной в экране, поддерживая его температуру ниже T_c в течение времени ($t_3 - t_4$). Для генерации импульса тока управляющим импульсом тока I_{con} экран переводят в нормальное состояние в момент времени t_4 , ток экрана I_2 уменьшается, а во вторичной цепи генерируется импульс тока I_3 за счет изменения магнитного потока, имеющегося в объеме вторичной обмотки.

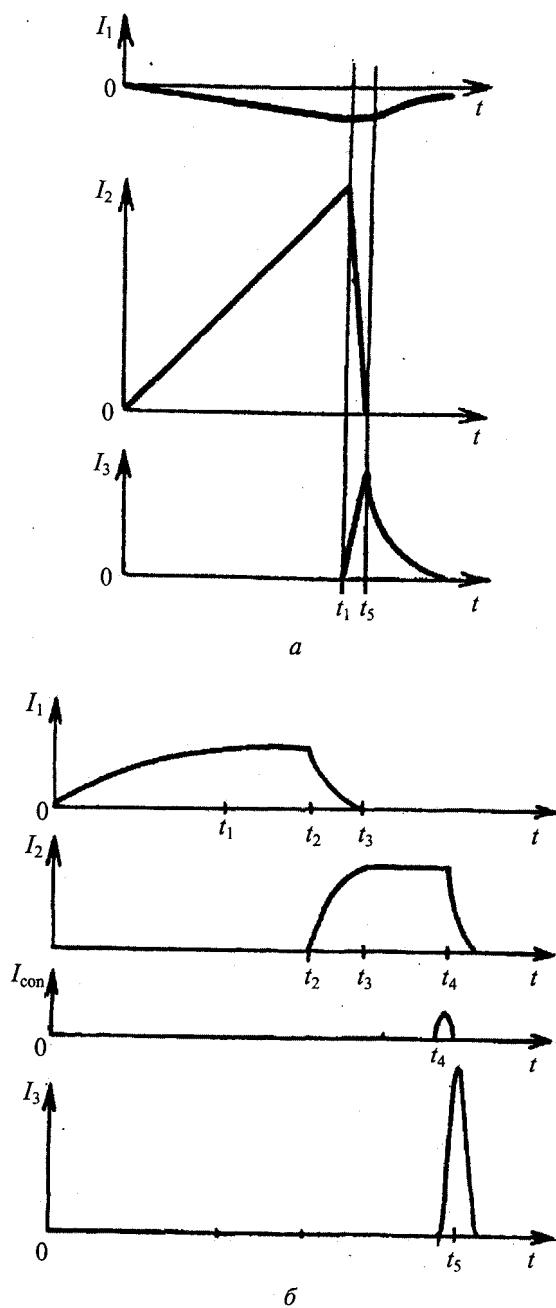


Рис. 2. Распределение токов в элементах магнитной системы в схеме:

а — магнитной плоскости; б — короткозамкнутого витка;
 I_1 — ток первичной обмотки, I_2 — ток экрана, I_3 — ток вторичной цепи

Мощность импульса управления значительно меньше мощности генератора, так как достаточно превысить критические параметры малой части экрана.

Коэффициент связи экрана с вторичной обмоткой может быть близок к единице, что обеспечивает высокий КПД вывода энергии. Первичная обмотка размыкается после вывода тока из нее, экран может быть удален из первичной обмотки для снижения перенапряжения в ней на этапе вывода энергии; "заряженный" экран может применяться автономно в течение некоторого времени за счет теплоемкости экрана и его корпуса.

Устройство охлаждения может быть выполнено в виде криокулера или криостата, заполненного жидким хладагентом (гелием или азотом в зависимости от типа сверхпроводника).

Эффективность вывода энергии из индуктивного сверхпроводящего накопителя

Рассмотрим эффективность трансформаторного вывода энергии из накопителя в виде сверхпроводящего тонкостенного цилиндра с помощью вторичной обмотки.

Положим, что диаметры экрана и вторичной обмотки приблизительно равны, индуктивность вторичной обмотки в n^2 раз больше первичной ($L_2 = nL_1 = nL$). Рассмотрим процесс затухания тока в системе для случая мгновенного увеличения сопротивления экрана R_1 . Отметим, что при переходе экрана в резистивное состояние время "переброса" тока во вторичную цепь мало при $k^2 \sim 1$, так как определяется выражением $\tau_{min} \sim L(1 - k_2)/R_1$. Решение системы двух уравнений электротехники для двух цепей, связанных единым магнитным потоком, дает, что токи (I_{10} и I_{20}) в начальный момент после перехода экрана в нормальное состояние будут соотноситься следующим образом: $I_{20}/I_{10} = nR_1/R_2$ и будут затухать экспоненциально с одинаковым характерным временем

$$\tau = \frac{L}{R_1} \left(1 + n^2 \frac{R_1}{R_2} \right).$$

При выводе часть энергии (W_2) выделяется во вторичной цепи, включая нагрузку, а часть выделяется в СП экране (W_1). Эффективность вывода энергии характеризуется выражением

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{R_1}{R_2} n^2.$$

Таким образом, чтобы эффективно выводить энергию из экрана-накопителя на активную или индуктивную нагрузку необходимо, чтобы выражение $n^2 R_1 / R_2$ было как можно больше.

При индуктивной нагрузке ($n \gg R_1/R_2$) время вывода энергии возрастает в $n^2 R_1 / R_2$ раз по сравнению с минимальным временем вывода

$\tau_1 = L/R_1$. При активной нагрузке ($n^2 \ll R_1/R_2$) $R_1 < R_2$ время вывода энергии определяется величиной $\tau_1 = L/R_1$.

При эффективности вывода энергии $\eta = (R_1 n^2) / (R_1 n^2 + R_2) = 0,9$ получим, что длительность импульса $\tau = 10\tau_1$. При $\eta = 0,5$ длительность импульса $\tau = 2\tau_1$.

Связь физических характеристик сверхпроводящих материалов с техническими параметрами экранов

Рассмотрим параметры генератора, построенного на основе тонкостенного цилиндрического экрана (одновиткового индуктивного накопителя), внутри которого за счет замороженных токов (СП не затухающих токов) удерживается магнитное поле индукцией B и размещена вторичная обмотка, подсоединененная к нагрузке.

$$W_0 = wV; \quad (1)$$

$$w = B^2/(2\mu_0) = BJ/2 = F\delta/2; \quad (2)$$

μ_0 — магнитная постоянная, δ — толщина экрана;

B — магнитное поле внутри экрана, предполагается одинаковым по всему объему;

V — объем запасенного поля, примерно $V = 0,8 D^2 l$;

D — средний диаметр экрана, l — длина экрана;

$t_{min} = L_0/R_n$ — время проникновения поля внутрь экрана, в нормальном состоянии;

L_0 — собственная индуктивность экрана;

R_n — сопротивление экрана в нормальном состоянии;

P_{max} — предельная пиковая мощность генератора, $P_{max} = KW_0/t_{min}$; (3)

F — основная (силовая) характеристика сверхпроводника, $F = JB$; А·Тл/м²; (4)

J — плотность критического тока сверхпроводника;

D_M — коэффициент магнитной диффузии, $D_M = \rho_{sc}/\mu_0$.

Подставив в выражение (3) значения сомножителей (1), (2) и (4), получим

$$P_{max} = FD_M V/2D.$$

Предельную разрывную мощность генератора можно выразить через удельную разрывную мощность сверхпроводящего материала ($p_{sc} = J^2\rho_{sc}$):

$$P_{max} = p_{sc} VK(\delta/D).$$

Коэффициент K учитывает потери в экране, коэффициент связи между обмотками, неоднородность поля по длине экрана и т. д.

Итак, предельная мощность генератора со СП-экраном-накопителем пропорциональна удельной разрывной мощности материала ($p_{sc} = J^2\rho_{sc}$), объему запасаемого поля, коэффициенту магнитной связи вторичной обмотки с экраном, отношению толщины экрана к его диаметру. Отметим, что энергия поля, "сидящая" в материале экрана, рассеивается в нем на этапе вывода энергии. Потери в экране влияют на скважность импульсов, так как выделившееся тепло необходимо отвести до начала последующего заряда накопителя.

С помощью подходящей конструкции вторичной обмотки можно сформировать импульс тока или напряжения одиночного импульса, серии одно- или двуполярных импульсов. Преимущества высоковольтных одновитковых импульсных трансформаторов подробно описаны в работе [13].

Оценим габаритные размеры генератора импульсов мощностью порядка 1 ГВт на основе СП-экрана из ниобий-титанового сплава.

При использовании экрана диаметром 0,25 м, длиной 0,6 м, с величиной экранирующего поля 1–2 Тл величина запасаемой энергии равна $W = 12–50$ кДж.

Время проникновения поля сквозь стенку экрана при его переходе в нормальное состояние $t_{min} = \delta D_M/4\rho = 5–10$ мкс, так как $\delta = 100$ мкм, $D = 0,25$ м, $\rho/\mu_0 = 0,5–1$ м²/с.

Предельная мощность устройства с таким экраном $P_{max} = KW_0/t_{min} \sim 1–10$ ГВт.

Сверхпроводящие экраны

Разработка однослойных и многослойных СП-цилиндрических оболочек для экранирования магнитных полей достигла определенных успехов [14, 15]. Однако наличие медных промежуточных слоев в них существенно увеличивает время разрушения сверхпроводимости и перехода их в нормальное состояние.

Мы исследовали экранирующую способность и времена перехода экранов, не содержащих слоев с хорошей электропроводностью.

Конструктивно СП-экраны могут быть выполнены в виде:

- цельнотянутой трубки, цилиндров из паяных фольг или многослойных листов;
- в виде сборки из колец, вырубленных из листов, фольг, или пленок на подложках;
- в виде соленоида из одножильной проволоки или многожильного кабеля.

Экранирование магнитного поля однослойным экраном

Некоторые результаты исследований экранирующей способности имевшихся в нашем распоряжении материалов, а также пленок, созданных магнетронным напылением, представлены в табл. 1. За экранирующую способность экрана

принималась величина поля, при которой происходил скачок магнитного потока внутрь экрана, регистрируемый датчиком Холла и измерительными катушками, намотанными на экран или размещенными внутри него. Экраны из цельнотянутых NbTi трубок и из фольги, свернутой в цилиндр, экранируют поле от 0,06 до 0,2–0,3 Тл в зависимости от количества слоев. Экраны из Nb₃Sn, полученные на поверхности фольги из Nb + 1,5 % Zr, обладают большей экранирующей способностью. Более эффективно могут экранировать наноструктурные СП-пленки на основе Nb + Sn + Cu или Nb + Ti + Cu [17]. Плотность критического тока достигает 3·10⁶ А/см² в собственном поле. Основная характеристика наноструктурного сверхпроводника достигает $F = J \times B = 2,5 \cdot 10^{10}$ А·Тл/м². Это значение на порядок превышает характеристику ниобий-титановой ленты, однако из-за наличия бронзовой подложки их удельная разрывная мощность только в 2–3 раза превышает мощность фольговых экранов.

Ограничение на толщину СП-экрана, не содержащего медного стабилизирующего покрытия, связано с возникновением термомагнитной неустойчивости СП-состояния в толстых сверхпроводниках, вызываемых перераспределением магнитного потока по сечению проводника при превышении внешнего поля выше некоторого значения. СП-покрытия NbN, Nb₃Sn или ВТСП соединения могут наноситься на корпус экрана, который выполняет опорные функции и может быть аккумулятором холода.

В табл. 2 приведены характеристики перспективных материалов, которые могут быть применены для изготовления многослойных экранов на поля до 2–3 Тл при температурах 4,3 К и более.

Пленки NbN, TiN толщиной 2–5 мкм, полученные напылением в атмосфере азота на алюминиевую подложку, имеют очень высокую плотность тока [14]. Очень перспективным представляется возможность применения покрытий из пленок Y-123 [16], полученных пиролизом и имеющих плотность тока до 2·10⁶ А/см² при температуре кипения жидкого азота, а также пленки MgB₂, имеющие T_b около 40 К.

Таблица 1

Экранирующая способность однослойных экранов

Толщина a , мкм	Формула сверхпр-ка	Поле В, Тл	J , 10 ⁶ А/см ² ; (В, Тл)	Геометрия	Примечание
20 20×4	NbTi	0,06–0,2	0,3 (0,2)	Трубка, $D = 12\text{--}40$ мм	Фольга 1 и 4 слоя
5 5×4	Nb ₃ Sn	0,2–0,4	5(3) – 2(5)	Трубка, $D = 12$ мм	На подложке Nb + 1,5 % Zr
250	NbTi	0,25	2,5 (3)	Провод	
5–10	CuNbTi	0,1	3,0 (4)	Трубка, $D = 12$ мм	Пленка на подложке
5–10	CuNbSn	0,3	1,0 (4)	Трубка, $D = 12$ мм	То же
Трубка, 200 200×3	NbTi	0,07–0,2	0,03 (0,2)	$D = 12\text{--}15$ мм	1 или 3 трубы
$a = 3$ мм	NbTi	0,6	0,1(0,6)	Трубка, $D = 12$ мм	Пакет колец из фольги $N = 1000$

Таблица 2

Характеристики перспективных сверхпроводников

Толщина a , мкм × N слоев	Формула сверхпроводника	Поле В, Тл	J , 10 ⁶ А/см ² ; (В, Тл)	Геометрия	Примечание
20	MgB ₂	1	2(5)		Пленки, $T_{cr} = 39$ К
7 × 30	NbTi + Cu + Ni	0,7	1,0 (4)	$D = 20$ мм	Трубка катаная, $T_{cr} = 9$ К
2–10	NbN, TiN + Al	0,15–0,2	6–2	45×45 мм	Напыление в атм. азота
5 × 10	NbN, TiN + Al	0,95	0,03 (0,2)	45×45 мм	Пленка, 10 слоев $T_{cr} = 14$ К
5–10	NbN	1	2 (5)		Трубка из Nb, азотирована
1,5	Y-123	0,03	2 (0,03)	1×10 см	Пленка на CeO ₂ $T_{cr} = 77$ К

Особенности экранирования многослойными экранами

В работе [15] проведены исследования возможности экранирования многослойными тонкостенными цилиндрами, изготовленными металлургическим путем из слоев NbTi/Nb/Cu при многократной деформации, прокатке, отжиге. Суммарная экранирующая способность двух трубок достигала 1,4 Тл, что подтверждает возможность создания экранов на поля с индукцией в несколько тесла. Однако наличие медных слоев в них значительно повышает время перехода в нормальное состояние. Применение в качестве промежуточных слоев сплавов типа CuMg позволит создать экраны с достаточной экранирующей способностью и сопротивлением.

В многослойных экранах экранирующая способность наружных слоев снижается, учет обратно пропорциональной зависимости J от B дает логарифмическую зависимость экранирующей способности от числа слоев, что и наблюдается экспериментально на многослойных экранах из фольги (1 слой — 0,06 Тл, 10 слоев — 0,35 Тл).

Снижение экранирующей способности ниобий-титановых труб толщиной 0,2 мм происходит медленнее (1 слой — 0,09 Тл, 9 слоев — 0,35 Тл). Известно, что плотность критического тока фольги понижается в магнитном поле, перпендикулярном ее поверхности. Для фольги толщиной 18 мкм величина $JB \sim 0,7 \cdot 10^9$ А·Тл/м² в полях 0,2–0,8 Тл. При намагничивании цилиндра из фольги на его краях действует поле, перпендикулярное поверхности фольги порядка 0,5 продольного, это и приводит к логарифмической зависимости экранирующего поля от числа слоев.

Для ниобий-оловянной ленты зависимость J от B в слабых полях незначительна, поэтому наблюдается аддитивность экранирующей способности плоских многослойных экранов до 0,8–1,6 Тл. Ожидается, что в больших полях будет логарифмическая зависимость величины экранируемого поля от числа слоев. Отметим, что применение ниобий-оловянной фольги требует высокотемпературной обработки (750 °C) готового изделия в инертной среде или вакууме, это необходимо учитывать при выборе материалов корпуса экрана. Необходимо учитывать также сравнительно небольшое удельное сопротивление NbZr фольги, на основе которой синтезируется Nb₃Sn, наличие которого снижает удельную разрывную мощность экрана.

Одна из проблем при изготовлении экранов из лент или фольги — необходимость соединения ленты по всей длине экрана (по ширине ленты), чтобы образовать замкнутый виток каждого слоя. Полученные нами методом холодной сварки соединения ниобий-титановых фольг шириной 2 см выдерживают СП-ток 0,9 крити-

ческого. Наличие небольшого сопротивления в короткозамкнутом экране приводит к ограничению времени хранения запасенной энергии в экране-накопителе. Характерное время затухания СП-токов в экранах, полученных методом холодной сварки, порядка 10–100 с, т. е. через 1–0,1 с ток уменьшится на 1 %, что может быть приемлемо при вводе поля в экран в течение нескольких долей секунды.

Наборные, шайбовые экраны

Экраны также могут быть изготовлены из набора узких колец, вырубленных из СП-фольги или дисков со слоями пленок. Экранирующая способность стопки плоских колец из Nb₃Sn исследовалась в работах [18]. Объект исследования представлял собой полый цилиндр, собранный из платиновых дисков, покрытых с обеих сторон пленкой Nb₃Sn толщиной 3,25 мкм. Диаметр дисков 25 мм, диаметр отверстия 5 мм. Экранирующее поле величиной 6 Тл достигалось в наборе из 656 дисков при скорости ввода поля 2–5 мТл/с. Остаточное поле составляло 5,5 Тл.

Наши исследования экранирующей способности цилиндра наружным диаметром 12 мм, длиной 14 мм с толщиной стенки 3,5 мм из набора 1000 слоев 18 мкм NbTi фольги показали, что экранирующая способность достигала 0,6 Тл (см. табл. 1). Проникновение поля внутрь происходило лавинообразно. Оценка скорости проникновения поля внутрь цилиндра (из величины ЭДС в катушке, размещенной внутри цилиндра) дает 10⁴ м/с.

Короткозамкнутые обмотки из проволок

В качестве магнитного экрана на поля порядка 1 Тл и более можно использовать короткозамкнутую обмотку — соленоид из голого однотипного провода. Промышленно выпускаемые провода на основе НТ50 имеют высокую плотность критического тока в средних магнитных полях. Так, провод диаметром 0,25 мм в резистивной матрице CuMn имеет $J_c > 10^5$ А/см² в поле 3 Тл. Из соображений адиабатической стабильности сверхпроводников [19] достаточно устойчива обмотка из голого NbTi провода диаметром 0,2 мм и менее. При зарядке многослойных экранов могут появиться трудности, связанные с распределением поля во внутренних слоях, однако, выбирая соответствующую скорость ввода поля и обеспечив конструктивно достаточный теплоотвод, эти трудности можно преодолеть.

Минимальное время перехода проволочных обмоток можно оценить из выражения $\tau = L/R = \delta D/4D_m$, где δ и D — диаметр проволочки и обмотки, соответственно D_m — коэффициент магнитной диффузии.

Времена перехода, методы управления

Задача эффективного вывода энергии из СП-экрана состоит в том, чтобы путем превышения критических параметров небольшой части экрана обеспечить дальнейший рост сопротивления экрана за счет энергии накопителя. При этом достигается значительный коэффициент усиления по мощности. В зависимости от направления распространения нормального состояния вдоль или поперек экранирующих токов будет "проваливаться" магнитное поле внутрь экрана, пересекая вторичную обмотку и возбуждать в ней напряжение.

Расчетно-теоретическим и экспериментальным путем были исследованы процессы распространения нормального состояния по всему объему намагниченного тонкостенного цилиндра при возбуждении нормальной фазы различным образом:

при возбуждении нормальной фазы на одном конце экрана она и соседняя область в виде кольца также переходит в нормальное состояние; внутрь экрана, с торца, проникает магнитное поле, вдоль экрана бежит магнитная волна со скоростью $V \sim 0,2-3$ км/с; в катушке, намотанной на экран, возникает ЭДС, пропорциональная скорости V ;

возбуждение узкой полоски нормальной области вдоль образующей цилиндра, нормальное состояние распространяется по всей ширине экрана в обе стороны от этой полоски, вдоль направления экранирующих токов с тепловой скоростью $V \sim 0,1$ км/с.

Резистивная полоска может быть образована путем подогрева этой области нагревателем. При этом происходит задержка времени между импульсом тока нагревателя и моментом появления напряжения на вторичной обмотке порядка 1 мс.

Резистивная полоска может быть образована за счет быстрого распространения нормальной фазы вдоль образующей цилиндра на участке с искусственно уменьшенной толщиной.

Ниже приведены результаты исследования распространения нормальной фазы вдоль и поперек цилиндра на образцах из ниобий-титановых цельнотянутых трубок и паяных фольг.

Распространение магнитного поля внутрь намагниченного тонкостенного СП-цилиндра

В некоторых работах, например [20], исследовалось проникновение магнитного потока внутрь намагниченного цилиндра с помощью измерительной катушки, однако не обнаружено сведений о распространении волны магнитного поля внутри экрана.

В нашей работе [12] приведены результаты по исследованию распространения магнитного

потока вдоль СП-цилиндра, состоящего из одной или двух NbTi трубок. Трубки диаметром 16 и 17 мм, толщиной стенки 0,2 мм, длиной 10–12 см помещались внутрь соленоида с магнитной постоянной $\alpha_m = 0,02$ Тл/А (см. рис. 1). С одного края на поверхность трубы была намотана катушка возбуждения, создающая дополнительное магнитное поле в течение короткого времени (~5 мкс) при разряде на нее конденсаторной батареи емкостью $C = 0,5-3,5$ мкФ, заряжаемой до напряжения 250–450 В. На расстоянии порядка 12 мм от края катушки возбуждения (и далее через 12 мм) намотаны шесть катушек, регистрирующих изменение магнитного потока через каждую из них. Катушки включены последовательно, поэтому на графике суммарного напряжения (ЭДС) с системы внешних измерительных катушек виден момент появления напряжения на каждой из них. Для увеличения достоверности измерений соседние катушки наматывались с изменением направления намотки, поэтому сигнал носит волнобразный характер (рис. 3). Внутри экрана помещалась такая же система измерительных катушек на трубке Ø 15 мм из изолятора. Каждая катушка состояла из трех витков (как и в предыдущем случае). ЭДС внутренних и наружных катушек регистрировались на двухканальном осциллографе С9-8.

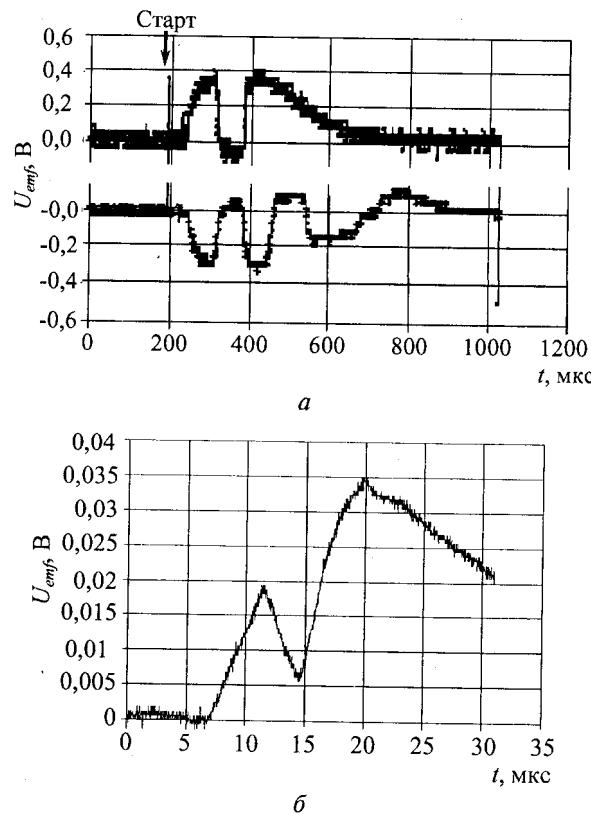


Рис. 3. Осциллограммы ЭДС от измерительных катушек:
а — трубка толщиной 0,2 мм: вверху — сигнал от трех внешних катушек, внизу — сигнал от шести внутренних катушек;
б — трубка из NbTi фольги толщиной 0,018 мм, ЭДС от четырех катушек, вторая и четвертая катушки включены встречно двум другим

Внутри трубы $\varnothing 15$ мм, в центре, размещался датчик Холла ($\alpha_x = 48$ мВ/Тл, при токе $I = 80$ мА). Показания напряжения U_x считывались с цифрового вольтметра В7-21 до и после инициированного скачка магнитного потока через СП-экран.

После охлаждения устройства в жидком гелии в СП-соленоид вводился ток со скоростью 0,1–0,5 А/с. При достижении перепада магнитного поля на экране 0,01–0,06 Тл на дополнительную обмотку разряжалась электрическая емкость. Это приводило к разрушению сверхпроводимости на участке экрана под дополнительной обмоткой. Резкое увеличение сопротивления экрана приводило к затуханию кольцевых экранирующих токов с постоянной времени $\tau = L^*/R^*$ (где L^* и R^* — индуктивность и сопротивление кольцевой области экрана, перешедшего в нормальное состояние). При этом магнитный поток подхватывался соседними кольцевыми участками, находящимися в СП-состоянии, ток в них увеличивался до значения больше критического, что и приводит к разрушению сверхпроводимости в соседнем участке. Процесс носит непрерывный характер, внутри экрана вдоль его оси движется фронт dB/dx с некоторой скоростью v . Изменение поля внутри области, охватываемой измерительной катушкой, наводит в ней ЭДС. Из-за того, что измерительные катушки отстоят друг от друга на некотором расстоянии, сигнал от каждой катушки приходит с задержкой по времени на $\Delta t_i = l_i/v_i$, а так как соседние катушки намотаны в разные стороны, то и вклад в общий сигнал меняет знак при прохождении фронта магнитного поля под соседними катушками. По расстоянию между пиками (см. рис. 3) определялось время прохождения нормальной фазы вдоль сверхпроводящего экрана между катушками.

На рис. 3, а представлены осциллограммы ЭДС от внешних и внутренних катушек. На первый канал осциллографа выведен только сигнал от трех ближних к участку возбуждения нормальной фазы внешних катушек, поэтому наблюдается три пика ЭДС. По второму каналу записывался сигнал от всех 6 внутренних катушек. Отметим равенство интервала между пиками (скорость распространения нормальной фазы постоянна), кроме сигнала с 6-й катушкой (амплитуда меньше, задержка больше). Это связано с тем, что она размещена на краю соленоида, и величина внешнего магнитного поля на этом участке меньше, чем в центральной области.

Для разных значений перепада магнитного поля на стенке экрана определялась скорость движения фронта нормальной фазы (рис. 4, верхний график). На этот рисунок нанесена зависимость $V \sim 1/[(B_m - \Delta B)d]$, полученная расчетным путем. Видно, что скорость достигает 300 м/с при максимально достигнутом на одно-

слойном экране перепаде поля $\Delta B = 0,06$ Тл. Для двухслойного экрана (трубы $\varnothing 17$ и 16 мм) зависимость носит такой же характер, но скорость в два раза меньше, что соответствует установленной ниже зависимости скорости от толщины экрана.

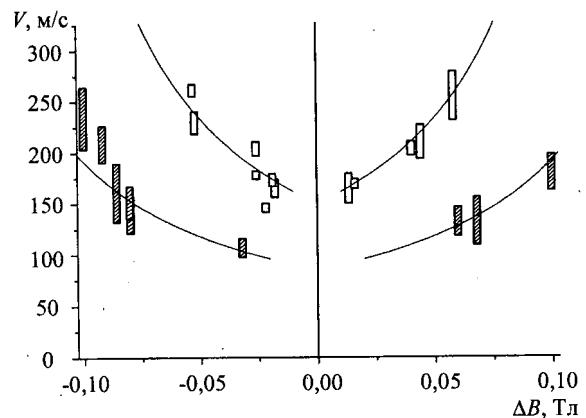


Рис. 4. Зависимость скорости распространения магнитного поля внутри сверхпроводящего, намагниченного экрана вдоль его оси.

Наверху — для однослоиного экрана, внизу — для двухслойного экрана. Сплошная кривая соответствует зависимости $B_m/(B_m - \Delta B)$

Расчетно-теоретическая модель распространения фронта магнитного поля внутрь намагниченной СП-трубки

Рассмотрим возможный механизм распространения нормальной фазы вдоль намагниченного цилиндра, несущего экранирующие токи с линейной плотностью J . Предположим, что экран, который представляет собой трубу, состоит из колец диаметром D , толщиной d , расположенных на расстоянии между кольцами $l = \eta D$, т. е. $\eta \ll 1$. Кольца электрически не связаны между собой. В начальный момент экран находится в СП-состоянии, по всем кольцам экрана текут экранирующие токи I_0 . Пусть одна часть экрана перешла в резистивное состояние, а другая еще находится в СП-состоянии. Токи в резистивных кольцах экспоненциально затухают с характерным временем $\tau = L^*/R^*$.

$$\tau = \frac{L^*}{R^*} = \frac{\mu_0}{4} \frac{Dd}{\rho_{eff}}.$$

В соседнем СП-кольце ток возрастает, так как магнитный поток, пронизывающий СП-кольцо, сохраняется на том же уровне, что был в полностью СП-экране. Если считать, что индуктивная связь между кольцами идеальная, то максимальный ток в СП-кольце достиг бы значения $(I_0 + I_c)$. В нашем случае происходит переход кольца в нормальное состояние при токе I_c . Время t_{12} , когда ток во втором кольце достигнет

критического, определим в линейном приближении по времени роста тока в сверхпроводящем кольце.

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{I_0 + I_c - I_0}{\tau} = \frac{I_c - I_0}{\tau_{12}} \Rightarrow t_{12} = \tau \frac{I_c - I_0}{I_c}$$

Из этого выражения видно, что время прохождения фиксированного расстояния линейно спадает с ростом величины I_0 , т. е. линейно спадает с ростом перепада магнитного поля на стенке экрана, что и наблюдается на эксперименте (см. рис. 4).

Выражение для скорости распространения нормальной фазы имеет вид

$$V = \frac{l}{t_{12}} = \frac{\eta D}{t_{12}} = \frac{4\eta \rho}{\mu_0 d} \frac{I_c}{I_c - I_0} \frac{1}{d} \frac{B_m}{B_m - \Delta B}.$$

Таким образом, можно утверждать, что экспериментально наблюдается устойчивое, с постоянной скоростью распространение нормальной фазы вдоль оси экрана при перепадах магнитного поля на стенке экрана более 0,005 Тл. Скорость распространения нормальной фазы тем больше, чем больше перепад магнитного поля на экране в момент действия дополнительного импульса, причем скорость $V \sim 1/[(B_m - \Delta B)d]$.

Для определения влияния толщины экрана на скорость движения нормальной фазы вдоль цилиндра проведены эксперименты на цилиндре из NbTi фольги толщиной 18 мкм с помощью четырех катушек с $N = 5$, соединенных последовательно. Катушки располагались на поверхности экрана на расстоянии 1 см одна от другой. График зависимости сигнала от времени показан на рис. 3, б. При перепаде магнитного поля на поверхности экрана ~0,025 Тл скорость составила 3 км/с, что на порядок больше скорости для NbTi цилиндра с толщиной стенки 0,2 мм; это согласуется с предложенной моделью распространения нормальной фазы вдоль фольги.

Распространение нормальной фазы в виде узкой полоски вдоль намагниченного цилиндра

При исследовании процесса диффузии магнитного потока внутрь намагниченного тонкостенного СП-цилиндра наблюдалось скачкообразное увеличение ЭДС на катушках, размещенных внутри и на поверхности цилиндра диаметром 12 мм, длиной 40 мм, изготовленного из фольги толщиной $\delta = 0,018$ мм. Для объяснения полученной зависимости предложена модель скачкообразного перехода в нормальное состояние узкой полоски вдоль оси цилиндра (ламели). При увеличении внешнего поля, направленного вдоль оси цилиндра (рис. 5, а), по стенкам цилиндра протекает кольцевой экрани-

рующий ток с плотностью j . В какой то момент времени происходит переход небольшого участка фольги в нормальное состояние. Ток j начинает обтекать нормальную область, плотность тока повышается в направлении, перпендикулярном экранирующим токам. В этом направлении происходит распространение нормальной фазы. Время перераспределения тока из области шириной $h = \delta$ из нормального пятна в соседнюю область на расстоянии h , находящуюся в СП-состоянии, можно оценить из формулы $t = L/R$, а скорость из выражения $V_L = h/t \sim 10^3 - 10^4$ м/с.

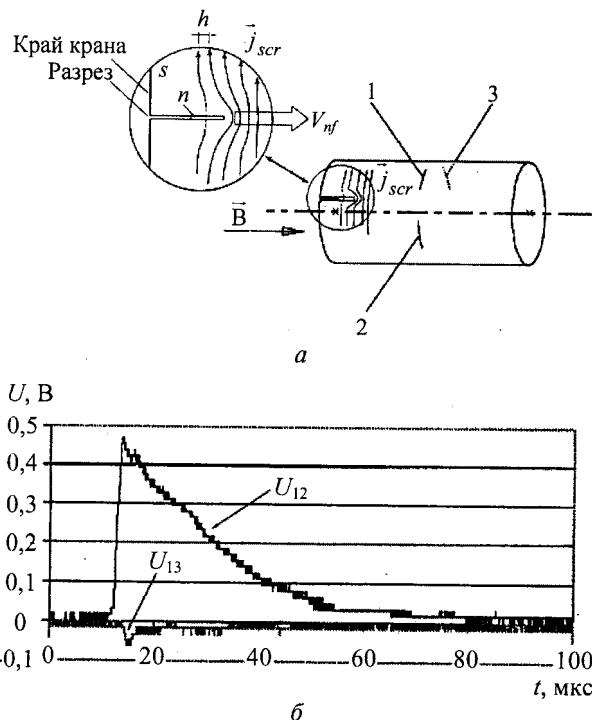


Рис. 5. Схема эксперимента по распространению нормальной фазы поперек экранирующих токов:
а — расположение потенциальных контактов относительно разреза; б — напряжение на участке 1—2 (верхний график) и 1—3 (нижний график)

Процесс перераспределения тока происходит непрерывно, поэтому вдоль оси цилиндра распространяется узкая полоска нормального состояния с сопротивлением $\rho(t)$ на единицу длины со скоростью порядка $10^3 - 10^4$ м/с. Образовавшаяся полоска будет расширяться с тепловой скоростью распространения нормальной фазы в обе стороны в направлении протекания экранирующих токов ($2V \sim 100$ м/с при $J = 5 \cdot 10^5$ А/см²).

Был проведен эксперимент по прямому обнаружению нормальной полоски. Для этой цели в центральной области цилиндра по периметру были припаяны потенциальные контакты, а переход в нормальное состояние инициировался с одного края цилиндра, где была прорезана узкая щель, перпендикулярная направлению кольцевых экранирующих токов (см. рис. 5, а). При

увеличении внешнего поля напряжение появляется только между одной парой потенциальных контактов (см. рис. 5, б), между которыми возникает полоска с нормальной проводимостью. По времени затухания напряжения была определена ширина полоски, которая оказалась равна ~1 мм.

Таким образом, из двух различных типов экспериментальных данных получается примерно одинаковая ширина полоски СП-цилиндра, перешедшей в нормальное состояние. Это позволяет утверждать, что динамика скачка магнитного потока происходит согласно предложенной модели.

Одновременный переход всего экрана

В случае одновременного перехода всего объема экрана толщиной δ , диаметром D в нормальное состояние минимальное время затухания тока в нем можно оценить из формулы $t_{\min} = L_0/R_n = \delta D/D_m$, где величина $D_m \sim 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ для NbTi сплавов, δ и D — толщина и диаметр экрана.

Одновременно перевести весь экран в нормальное состояние можно импульсом тока в первичной или вторичной цепи или путем высокочастотного нагрева экрана.

Форсировать переход всего объема экрана можно также путем пропускания импульса тока вдоль экрана, что обеспечит развитие скачка магнитного потока в нормальное состояние.

Выводы

1. Успешно проведенные эксперименты по быстрому переводу ниобий-титановых экранов из СП-состояния в резистивное подтверждают принципиальную возможность создания импульсных источников тока с микросекундными фронтами.

2. Применение NbN, TiN, Nb₃Sn, MgB₂, СП-керамик и криокуллеров существенно расширяет возможность применения СП-устройств в народном хозяйстве и военной технике.

3. Перечисленные новые обстоятельства позволяют приступить к разработке импульсных источников с запасом энергии в сотни килоджо-

улей мощностью более 1 ГВт на основе СП магнитных экранов.

*Работа выполнена при поддержке
ЗАО "РОССО".*

Л и т е р а т у р а

1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля// Пер. с англ. — М.: Мир, 1972.
2. Ермилов И. В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы// Прикладная физика. 2001. № 5. С. 77.
3. Yazawa T. et al.// IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1995. V. 5. № 2. P. 181—184.
4. Металлургия сверхпроводящих материалов. — М.: Металлургия, 1984.
5. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. — М.: Мир, 1976.
6. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — М.: Мир, 1985.
7. Куроедов Ю. Д., Дорофеев Г. Л. Устройство для накопления электромагнитной энергии и генерации импульсных токов: А/с 1736016 SU; Бюл. изобр. № 19. 1992.
8. Куроедов Ю. Д., Дорофеев Г. Л., Вяткин В. С. Патент 2237356 RU. Способ генерации импульсных токов; Бюл. № 27. 2004.
9. Carlos A. Baldan et al.// Physica C., 2004. V. 408—410. P. 937—939.
10. Altshuler E., Johansen T. H. Colloquium: Experiments in vortex avalanches// Reviews of Modern Physics. April. 2004. V. 76. P. 471—487.
11. Вяткин В. С., Дорофеев Г. Л., Куроедов Ю. Д.// Способ получения бегущей магнитной волны и устройство для реализации способа. 2219685 RU. 2003// Бюл. № 35.
12. Doroфеев G. L. et al.// Physica C. 2004. V. 402. P. 196.
13. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
14. Yoshiro Saji// Superconductors for magnetic field shielding// Patent 4797646 US. Sasaki T.
15. Itoh I. Magnetic shilding by NbTi multiplayer cylinder// Cryogenics. 1996. V. 36. № 7. P. 497—506.
16. Doroфеев G. L. et al.// Superconducting nanocomposites on the base of Cu + Nb// Inst. Phys. Conf. Ser. 2003. № 181. V. 1. P. 2172—2178. (Proc EUCAS'03).
17. Yoshitaka Tokunaga et al.// High critical current YBCO films using advanced TFA-MOD process// Physica C., 2004. V. 412—414. P. 910—915.
18. Петцингер К. Т. Проникновение магнитного потока в диски из станида ниobia// Сверхпроводящие соединения ниобий—олово: Пер. с англ. — М., 1970.
19. Альтов В. А. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем/ Под ред. В. В. Сычева. — М.: Энергия, 1975. С. 328.
20. Field S. et al.// Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 1206.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2005 г.

Physical prepositions for application of superconductivity in engineering of microsecond power pulses

*Yu. D. Kuroedov, G. L. Dorofeev, V. S. Vyatkin
RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

The methods of magnetic flux energy storage and fast energy evacuations from inductive storage system using superconducting magnetic screen are considered. The results of screen-

ing capacity, characteristic time of flux penetration and values of electro moving force in second coil are presented.

УДК 537.312.62

Высокотемпературный датчик магнитного поля на основе поликристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\chi}$

A. И. Головашкин

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Н. Д. Кузьмичев

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск, Россия

B. В. Славкин

Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ, г. Саранск, Россия

На основе исследований магнитных свойств поликристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\chi}$ разработан высокочувствительный датчик магнитного поля. Датчик обладает чувствительностью, близкой к параметрам сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (СКВИД), значительно большей, чем чувствительность феррозонда. В отличие от СКВИДов датчик позволяет измерять непосредственно величину напряженности магнитного поля, имеет широкий диапазон измерений магнитных полей и обладает выраженной диаграммой направленности. Он проще конструктивно и более надежен, чем СКВИДы.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости дало возможность более широкому внедрению в повседневную практику различных сверхпроводящих устройств с высокой чувствительностью [1–4]. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) несмотря на то, что они имеют малую длину когерентности, обладают высокой чувствительностью к содержанию кислорода и сильной анизотропией электронных свойств [5–7]; благодаря высоким критическим параметрам и возможности работать при температуре жидкого азота или с относительно простыми рефрижераторами являются весьма привлекательными для применения в различных областях электроники и электротехники. Если для фундаментальных физических исследований необходимы качественные монокристаллы или пленки ВТСП, то для целого ряда приложений необходима простота изготовления, и для таких применений вполне пригодны поликристаллические образцы. В некоторых случаях параметры поликристаллических образцов даже предпочтительнее соответствующих характеристик монокристаллов и эпитаксиальных пленок.

Одно из самых распространенных направлений прикладной сверхпроводимости — это использование СКВИДов как в различных технических областях, так и в научных исследованиях [8]. Примером использования в этой области поликристаллических образцов являются работающие при азотных температурах керамические ВТСП СКВИДы [9], которые наряду с высокой

чувствительностью обладают хорошей технологичностью и могут быть достаточно легко изготовлены в лабораториях. Технология ВТСП СКВИДов быстро совершенствуется. Из-за проблемы температурных шумов низкотемпературные СКВИДы, работающие при гелиевых температурах, имеют определенное преимущество перед СКВИДами, функционирующими при азотных температурах. Но область использования ВТСП СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. Криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации, значительно дешевле и доступнее, а поскольку высокая чувствительность ВТСП СКВИДов вполне достаточна для многих приложений, некоторый выигрыш в чувствительности низкотемпературных СКВИДов для этих целей не является существенным преимуществом.

Известно, что на практике широко применяются датчики магнитного поля. Разработан целый ряд таких датчиков. Физический принцип работы полупроводниковых датчиков поля основан на эффекте Холла [10–12]. Феррозонды [13, 14] обладают более высокой чувствительностью по сравнению с датчиками Холла, но являются более громоздкими устройствами. Основной недостаток существующих датчиков — относительно невысокая чувствительность. Наиболее перспективным методом повышения чувствительности датчиков магнитного поля считается использование нелинейных свойств сверхпро-