

15
Оценка чувствительности датчиков магнитного поля на основе высокотемпературного сверхпроводящего иттриевого купрата

© С.В. Черных

Волгоградский государственный университет,
400062 Волгоград, Россия
e-mail: schtks@list.ru

(Поступило в Редакцию 5 декабря 2011 г. В окончательной редакции 28 февраля 2012 г.)

Представлены экспериментальные исследования взаимодействия переменного и постоянного магнитных полей со сверхпроводящей керамикой $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Предложен способ оценки минимального уровня шума датчиков магнитного поля на основе сверхпроводящего иттриевого купрата. Рассмотрены пути достижения предельной чувствительности приборов подобного типа.

Введение

Актуальность исследований низкочастотной электродинамики высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обусловлена перспективностью их использования в радиэлектронике и измерительной технике. Основным недостатком существующих несверхпроводящих датчиков магнитного поля — относительно невысокая чувствительность. Повышение чувствительности таких датчиков видится в использовании нелинейных свойств сверхпроводимости. В частности, для многих приложений можно использовать нелинейные свойства высокотемпературных сверхпроводящих керамик. Датчики на основе ВТСП существуют, их конструкции и принципы функционирования рассмотрены в работах [1–5].

Датчики [1,2] имеют в выходном сигнале отклика поликристалла $YBaCuO$ большую (по сравнению с другими гармониками) первую гармонику (см. [2]). Конструкция датчика [3–5] обеспечивает подавление в выходном сигнале, во-первых, всех нечетных гармоник, включая первую, во-вторых, четных гармоник, вызванных нелинейными искажениями сигнала в токовой катушке, что значительно ослабляет требования к конструкции генератора, источника тока и избирательного усилителя.

Зависимость напряжения второй гармоники на выходе датчика от напряженности H_0 приложенного параллельного слабого постоянного магнитного поля — функция нелинейная. В пределах малых полей $0 < H_0 < 3 \text{ Oe}$ [1] зависимость напряжения второй гармоники от напряженности H_0 будет слабо нелинейной, что используется для измерения слабых магнитных полей [1]. Можно линеаризовать эту характеристику благодаря отрицательной обратной связи по магнитному полю, как показано в [3–5]. Таким образом, вольт-эрседная характеристика оказывается линейной и расчетной.

В работе [1] утверждается, что „оптимизируя устройство путем подбора рабочей частоты... тока... и номера рабочей гармоники, можно добиться чувствительности $\sim 10^{-8} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$ и выше“. Работа [6] более подробно исследует этот вопрос.

Однако при изучении работ [1–6] возникает ряд вопросов. В [1] утверждается, что в больших полях

датчик обнаруживает гистерезисные свойства, связанные с захватом магнитного потока, и „в случае попадания датчика в магнитные поля $H_0 > 10\text{--}50 \text{ Oe}$ сверхпроводящий сердечник (поликристалл $YBaCuO$) захватывает магнитный поток, и чувствительность датчика снижается примерно в 1.5–2 раза“. В [3] также говорится, что в больших постоянных полях зависимость напряжения второй гармоники от напряженности H_0 становится не только нелинейной (это видно из работы [1]), но и неоднозначной (появляется гистерезис). В чем же заключается определяющее отрицательное влияние гистерезиса — в снижении чувствительности датчика или в неоднозначности зависимости напряжения второй гармоники от напряженности H_0 ? Здесь необходимы дополнительные исследования.

Исследование частотной зависимости амплитуды магнитного потока, проникающего в образец керамики ВТСП [6], дает основание полагать, что дальнейшее увеличение частоты модуляции позволит заметно повысить чувствительность прибора. Однако возникает вопрос о влиянии увеличения частоты модуляции на поведение второй гармоники. Здесь также необходимы дополнительные исследования.

Работы [1–5] в совокупности не дают ответа о пределе совершенства рассмотренных в них магнитноизмерительных устройств. На практике важным вопросом является оценка минимально достижимого в приборе шума и способов его уменьшения. В настоящей работе сделана попытка с помощью дополнительных экспериментальных и теоретических изысканий прямо или косвенно ответить на поставленные выше вопросы.

Исследования проводились на высокотемпературных сверхпроводниках состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, изготовленных методом твердофазного синтеза.

Методика эксперимента

В слабых постоянных магнитных полях достоверность данных по нелинейной восприимчивости образцов керамики ВТСП обеспечивается использованием измерителей с уровнем нелинейных искажений не хуже 0.01%

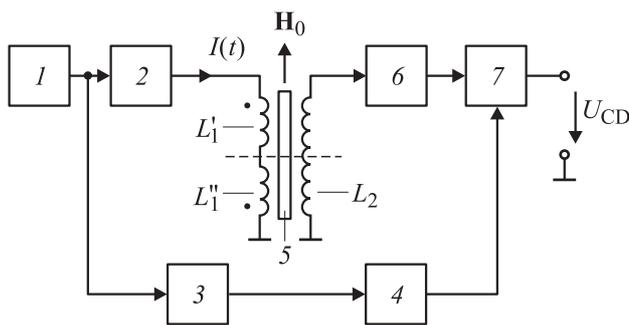


Рис. 1. Функциональная схема синхронного измерителя.

и подавлением первой гармоники на уровне 100 dB. В противном случае собственная нелинейность прибора маскирует результаты измерений. Отечественные и импортные серийные селективные усилители необходимыми характеристиками не обладают, поэтому для исследований был разработан синхронный измеритель (стенд), конструктивно похожий на устройство для измерения магнитного поля, рассмотренное в работе [1]. Уровень нелинейных искажений стенда составляет 0,008%, а его функциональная схема приведена на рис. 1.

Стенд состоит из генератора 1, вырабатывающего синусоидальный сигнал частотой 100 kHz, источника тока 2, управляемого напряжением, и преобразователя второй гармоники, состоящего из фазовращателя 3 и удвоителя частоты 4. На выходе удвоителя частоты получаем симметричный прямоугольный сигнал (меандр) с частотой 200 kHz, фаза которого по отношению к сигналу генератора регулируется в пределах $0^\circ - 320^\circ$.

На выход источника тока 2 подключается датчик, конструкция которого близка к дифференциальному феррозонду [7] и включает в себя цилиндр 5 диаметром 9 мм и длиной 20 мм из иттриевой керамики ВТСП. На цилиндр плотно намотаны 2 катушки: токовая, состоящая из двух одинаковых встречно включенных секций L_1' , L_1'' , содержащих по 36 витков провода ПЭЛШО-0,1, и поверх нее — сигнальная L_2 , содержащая 72 витка того же провода. Длина как токовой, так и сигнальной катушек составляет 18 мм. При настройке датчика в жидком азоте перемещениями цилиндра 5 относительно катушек добиваются полного исчезновения первой гармоники на сигнальной катушке.

Сигнальная катушка подключена на вход малошумящего резонансного усилителя 6, увеличивающего сигнал второй гармоники датчика. Усиленная вторая гармоника подается на сигнальный вход синхронного детектора 7, на опорный вход которого поступает прямоугольный сигнал от преобразователя второй гармоники. Величины синфазной и квадратурной компонент второй гармоники измерялись на выходе синхронного детектора после RC-фильтра (на рис. 1 не показан). В качестве измеряемой величины регистрировалось напряжение U_{CD} (рис. 1).

Для проведения исследований о влиянии увеличения частоты модуляции на поведение второй гармоники был

разработан аналогичный стенд с аналогичными характеристиками, но синусоидальный сигнал генератора 1 которого имеет частоту 10 kHz.

При измерениях применялись коаксиально расположенные экраны датчика: предварительно размагниченный магнитный экран из мягкого железа толщиной 20 мм, внутри которого располагался охлаждаемый жидким азотом медный экран толщиной 2,5 мм. При проведении шумовых измерений дополнительно применялся охлаждаемый жидким азотом алюминиевый экран толщиной 20 мм. Постоянное магнитное поле H_0 создавалось с помощью длинного соленоида, расположенного внутри коаксиальных экранов. Технические возможности источника тока 2 синхронного измерителя позволяли получать зависимости синфазной и квадратурной компонент при амплитудах модуляции до 12 Oe.

Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведены зависимости $U_{CD}(H_0)$ синфазной компоненты второй гармоники при амплитуде переменного магнитного поля $h_0 = 3,35$ Oe и развертке постоянного магнитного поля H_0 в пределах 140, 7 и 1 Oe. При измерениях последовательность изменения H_0 была следующей: от нуля до 140 Oe, затем от 140 Oe до нуля, далее от нуля до минус 140 Oe и от минус 140 Oe до нуля. То же самое можно сказать и про развертку H_0 в пределах 7 и 1 Oe. Поведение величины U_{CD} при этом показано на рис. 2 стрелками.

Наблюдается резкий пик амплитуды синфазной компоненты второй гармоники на начальном участке от нулевого поля H_0 и повторяющаяся при повторных проходах полная петля гистерезиса с несколькими самопересечениями. Величина начального пика практически не зависит от диапазона развертки H_0 . При развертке 7 Oe проходит почти обратимо начальный пик с шириной петли гистерезиса $DH = 0,1$ Oe (на уровне $U_{CD} = 0$) и высотой $DU = 0,03$ V (на уровне $H_0 = 0$). При развертке, большей чем 7 Oe, ширина и высота петли гистерезиса увеличиваются. При развертке в диапазоне 1 Oe гистерезис полностью исчезает, проходит обратимо часть начального пика с неизменной крутизной S .

На рис. 2 видно, что зависимость $U_{CD}(H_0)$ при величинах развертки H_0 в пределах 140, 7 и 1 Oe начинается не с нулевой отметки. Это объясняется недостаточной компенсацией магнитного поля Земли или недостаточным размагничиванием железных экранов. При тщательном устранении указанных недостатков зависимость $U_{CD}(H_0)$ имеет нулевое значение при $H_0 = 0$.

Исследование зависимости $U_{CD}(H_0)$ проводилось также на цилиндрических образцах иттриевой керамики диаметром 2 мм и длиной 20 мм. Конструкция датчика не менялась (рис. 1), менялись только намоточные данные. При этом качественно зависимость $U_{CD}(H_0)$ осталась прежней. В количественном же отношении напряжение U_{CD} было гораздо больше для датчиков диаметром 9 мм, чем для датчиков диаметром 2 мм.

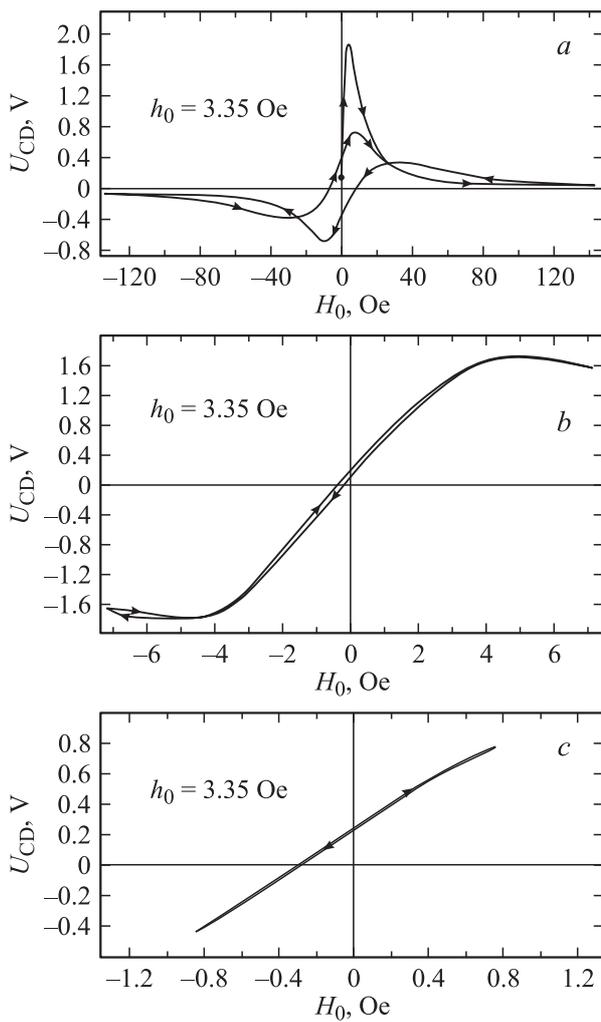


Рис. 2. Зависимость $U_{CD}(H_0)$ синфазной компоненты второй гармоники при амплитуде переменного магнитного поля $h_0 = 3.35$ Oe, частоте $f = 100$ kHz и развертке постоянного поля H_0 , Oe: $a - 140$, $b - 7$, $c - 1$.

Подобные описанным выше исследования проводились для частоты 10 kHz. Полученные в этом случае результаты в качественном отношении аналогичны результатам измерений для частоты 100 kHz.

Датчик магнитного поля

Датчик функционирует при наличии по крайней мере двух внешних магнитных полей — постоянного или медленно изменяющегося измеряемого поля и вспомогательного переменного поля, создаваемого переменным током $I(t)$ (рис. 1), протекающим по токовой обмотке. В общем случае суперпозиция напряженностей этих полей дается выражением $\mathbf{H}_\Sigma(t) = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1(t)$, где \mathbf{H}_0 — напряженность постоянного измеряемого поля, $\mathbf{H}_1(t)$ — напряженность вспомогательного переменного поля. Можно записать $H_\Sigma = H_0 \cos \alpha + H_1$; $\alpha = 0-90^\circ$, где α — угол между векторами \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_0 . Ограничимся

рассмотрением работы датчика для случая взаимно параллельных полей:

$$\alpha = 0^\circ, \quad H_\Sigma = H_0 + H_1. \quad (1)$$

В слабых постоянных полях можно пренебречь явлениями анизотропии и гистерезиса в сердечнике (зависимость $U_{CD}(H_0)$ на рис. 2 при развертке \mathbf{H}_0 в пределах 1 Oe), тогда вектор магнитной индукции \mathbf{B} , действующей внутри сердечника ВТСП, можно найти на основе зависимости

$$\mathbf{B} = f(H_\Sigma). \quad (2)$$

Магнитная индукция в каждой половинке сердечника (рис. 2) в соответствии с формулами (1) и (2) будет

$$\begin{aligned} B' &= f(H_0 + H_1), \\ B'' &= f(H_0 - H_1). \end{aligned} \quad (3)$$

Эдс, наводимая в измерительной (сигнальной) обмотке датчика, равна

$$e(t) = -w_2 s \frac{d}{dt} (B' + B''), \quad (4)$$

где w_2 — число витков сигнальной обмотки, s — площадь поперечного сечения сердечника.

Аппроксимируем зависимость $B(H)$ выражением $B = aH + bH^3$, где a и b — коэффициенты аппроксимации. Тогда с учетом выражений (3) получим

$$B' + B - 2aH_0 + 2bH_0^3 + \underline{6bH_0H_1^2}. \quad (5)$$

Подчеркнутый член формулы (5) отвечает за появление эдс в измерительной обмотке датчика, которая при $H_1(t) = H_m \sin(\omega t)$, согласно (4), будет иметь вид

$$e(t) = f 6bsw_2 H_0 H_m^2 \omega \sin(2\omega t). \quad (6)$$

В общем случае вектор магнитной индукции \mathbf{B} , действующей внутри сердечника ВТСП, можно найти на основе зависимости $\mathbf{B} = \Pi((\mathbf{H}_\Sigma))$. Здесь Π — тензор, описывающий анизотропные и нелинейные свойства сердечника; квадратные скобки указывают на многозначность, обусловленную гистерезисными явлениями (зависимость $U_{CD}(H_0)$ на рис. 2 при развертке H_0 в пределах 140 и 7 Oe). Однако в данный момент такой режим работы датчика не представляет интереса для исследования, поскольку гистерезис не способствует точности измерений магнитного поля.

Оценка чувствительности датчика

Предельная чувствительность измерительных систем определяется уровнем шума. Под термином „шум“ в данном случае понимается наличие беспорядочных колебаний магнитного потока (шумовой поток). Весьма

важно оценить уровень шумового потока нашего датчика [3–5] в рабочих условиях, так как он определяет минимально обнаружимый внешний поток. Основной элемент в конструкции датчика — сердечник из керамики ВТСП. Шум сердечника является определяющим фактором чувствительности датчика, пределом, к которому можно приблизиться.

Теория шума одноконтактного низкотемпературного ($T = 4.2\text{ К}$) сквида [8] является общепризнанной. С помощью некоторых предположений представим цилиндрический сердечник 5 датчика из керамики ВТСП как систему одноконтактных сквидов, а затем оценим чувствительность такой системы.

Общепризнанно представление керамики ВТСП множеством сверхпроводящих гранул, соединенных слабыми связями. Материал гранул имеет свойства сверхпроводника второго рода, магнитное поле в который проникает в виде абрикосовских вихрей. Средний размер гранул L^* по порядку величины совпадает с физическими размерами кристаллитов, имеющими типичное значение порядка $10\ \mu\text{м}$ [9], что дает возможность считать выполненным условие $L^* \gg \lambda_L$, где λ_L — лондоновская глубина проникновения поля в гранулы, составляющая при $T = 77\text{ К}$ величину порядка 10^{-5} см [9]. В образце существуют и точечные, и протяженные слабые связи (джозефсоновские контакты), также имеются пустоты между крупными гранулами либо области, заполненные мелкими кристаллитами $L^* < \lambda_L$. Схематически это показано на рис. 3, где штриховкой обозначены пустоты между гранулами. Первое критическое поле гранулы H_{c1}^g составляет величину порядка $50\text{--}100\text{ Ое}$ при 77 К [10].

Таким образом, магнитное поле, меньшее H_{c1}^g , проникает от края цилиндра к его центру по джозефсоновским переходам. Некоторые из таких переходов выделены жирными линиями (рис. 3 слева). Внутри керамического образца протекает экранирующий (мейсснеровский) ток j . В некотором виде такая картина напоминает кольцо, и естественно предположить, что экранирующий ток j протекает по сверхпроводящему кольцу со множеством джозефсоновских переходов $JC1 \dots JCn$, как показано на рис. 3 в центре. Далее можно предположить, что экранирующий ток j протекает по такому же сверхпроводящему кольцу, но с одним джозефсоновским контактом JC_Σ , сопротивление R_Σ которого равно сумме сопротивлений переходов $JC1 \dots JCn$ (рис. 3). Цилиндр керамики ВТСП будет представляться системой колец с переходами JC_Σ , расположенных одно под другим (рис. 4).

В работе [8] получено выражение, представляющее так называемый классический предел минимально обнаружимого магнитного потока для одноконтактного низкотемпературного сквида:

$$(\delta\Phi)_{\text{class}} = \langle \delta\Phi_N^2 \rangle^{1/2} = L \left(\frac{4k_B T \delta v}{R} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где $\langle \delta\Phi_N^2 \rangle$ — среднеквадратичная величина шумового потока, L — индуктивность сверхпроводящего кольца,

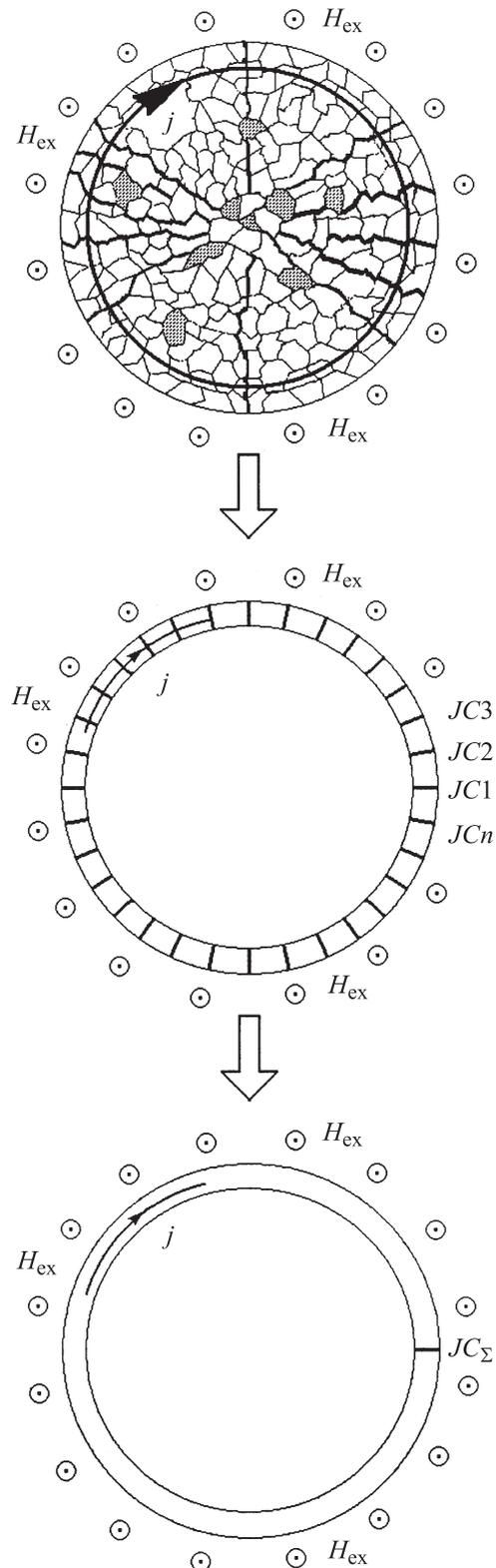


Рис. 3. Структура образца керамики ВТСП во внешнем магнитном поле как сверхпроводящее кольцо со слабыми связями (схематично). Жирные линии — протяженные слабые связи между гранулами.

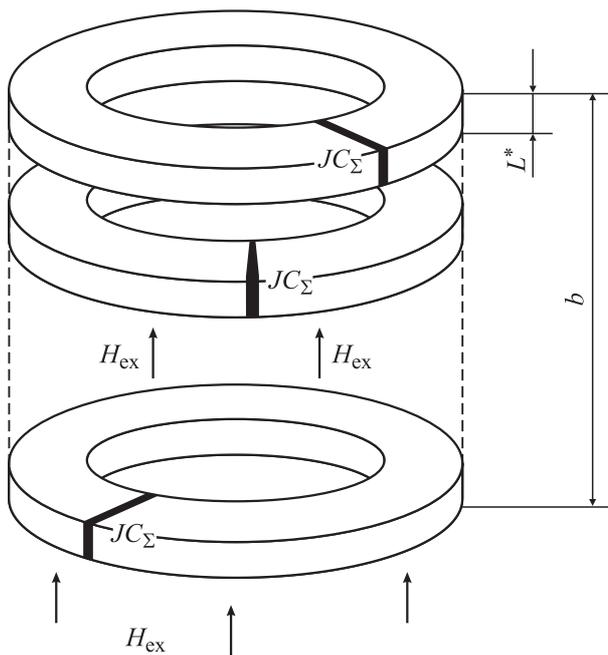


Рис. 4. Цилиндр керамики ВТСП как система колец с переходами $J_{C\Sigma}$.

T — температура в Кельвинах, R — нормальное сопротивление слабой связи, $\delta\nu = \delta\omega/(2\pi)$ — полоса частот, k_B — постоянная Больцмана.

Для типичных значений $L = 10^{-10}$ Н, $r = 5$ Ohm и $T = 4$ К чувствительность сквида к потоку составляет $3.2 \cdot 10^{-7} \Phi_0 \text{ Hz}^{1/2}$, где Φ_0 — квант магнитного потока [8]. Типичные значения индуктивности получены для диаметра сверхпроводящего кольца 1–2 мм, а типичные значения величины R для площади туннельных контактов 1–100 μm^2 [8]. Реальные сквиды имеют чувствительность к потоку на 1–2 порядка меньше подсчитанной, так как существуют другие механизмы, увеличивающие собственный шум устройства [8].

С помощью выражения (7) оценим чувствительность к потоку датчика для цилиндрического сердечника состава YBaCuO диаметром 2 мм. Поскольку магнитное поле сосредоточено в межзеренных контактах, то, учитывая размеры зерен, лондоновскую глубину проникновения и толщину диэлектрического слоя между зёрнами, найдем приблизительное значение индуктивности $L \approx 2.5 \cdot 10^{-10}$ Н, а величина T будет равна 77 К.

В нашем случае сопротивление R_{Σ} джозефсоновского контакта $J_{C\Sigma}$ будет значительно больше. Нормальное сопротивление межзеренного контакта в массивных образцах (согласно данным [11]) лежит в пределах 0.1–10 Ohm. Для наших расчетов значение нормального сопротивления межзеренного контакта примем равным 10 Ohm.

Оптимальная амплитуда h_0 находится в пределах от 0.3 до 11 Oe, поэтому далее для расчета R_{Σ} необходимо учитывать два случая проникновения магнитного поля в джозефсоновский переход: случай слабого и

случай сильного внешнего магнитного поля. В случае слабого внешнего поля все джозефсоновские контакты цилиндрического образца будут в сверхпроводящем состоянии, диссипация будет отсутствовать и использование выражения (7) для оценки уровня шума не представляется возможным.

В любой гранулированной системе с увеличением сверхтока (случай сильного магнитного поля) происходит сначала постепенное разрушение отдельных, более слабых участков джозефсоновского перехода [11], т.е. эти участки переходят в нормальное состояние. Поэтому гранулированную систему в этом случае назвать бездиссипативной нельзя, а значит, использование при оценке уровня шума сердечника выражения (7) является оправданным.

Существование в образце керамики ВТСП протяженных джозефсоновских контактов различной длины, пустот между крупными гранулами, областей, заполненных мелкими кристаллитами $L^* < \lambda_1$, а также точечных слабых связей в совокупности определяет ширину сверхпроводящего кольца (рис. 3 в центре и справа). Выберем ширину кольца равной $22 \cdot 10^{-6}$ м. Исходя из этого, найдем $R_{\Sigma} \approx 3 \cdot 10^3$ Ohm. В итоге получаем $1.5 \cdot 10^{-7} \Phi_0 \text{ Hz}^{1/2}$ для контакта $J_{C\Sigma}$ (рис. 3 справа).

Кольца с контактами $J_{C\Sigma}$ расположены одно под другим (рис. 4), поэтому их шумовые потоки суммируются. Чем длиннее сердечник, тем хуже чувствительность датчика. Без ущерба для технических характеристик и сложности изготовления можно создать датчик длиной $b = 5$ мм. Чувствительность к потоку такого датчика составит $7.3 \cdot 10^{-5} \Phi_0 \text{ Hz}^{1/2}$, а чувствительность к магнитному полю достигнет величины $8.1 \cdot 10^{-9} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$.

Если считать ширину сверхпроводящего кольца равной радиусу образца, то, согласно расчету, чувствительность к магнитному полю такого датчика будет $1.7 \cdot 10^{-7} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$.

Обсуждение результатов

При экспериментальном исследовании образцов ВТСП состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ логично проводить оценку уровня шума сердечника датчика такого же химического состава. Для рассмотрения возможностей датчиков с сердечниками другого химического состава необходимы дополнительные исследования.

Полученные результаты расчетов не противоречат экспериментальным данным [1–5], где использованы образцы такого же химического состава и технологии изготовления. Действительно, в работе [4] для цилиндрического образца ВТСП диаметром 1.5 мм и длиной 15 мм приведенный ко входу эквивалентный шум прибора составляет $(2–3) \cdot 10^{-6} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$, наша оценка дает величину $3.9 \cdot 10^{-8} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$. В работе [5] для цилиндрического образца ВТСП диаметром 9 мм и длиной 18 мм приведенный ко входу эквивалентный шум прибора составляет $(2–3) \cdot 10^{-7} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$, наша оценка дает величину $3.3 \cdot 10^{-9} \text{ Oe/Hz}^{1/2}$. Заметим, что

оценка дает шум только сердечника ВТСП без учета шума намотанных катушек и шума измерительной системы, а данные [4,5] как раз включают в себя шумы катушек и измерительной системы. Для цилиндрического образца ВТСП диаметром 20 мм и длиной 10 мм, взятого из работы [2], чувствительность датчика составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Ое/Гц^{1/2}, взятая из [1], наша оценка будет $5.5 \cdot 10^{-10}$ Ое/Гц^{1/2}. Приведенные выше оценки сделаны для ширины кольца, равной $22 \cdot 10^{-6}$ м.

Если рассчитать ширину сверхпроводящего кольца равной радиусу образца, то для образца диаметром 1.5 мм и длиной 15 мм получаем значение $6.6 \cdot 10^{-7}$ Ое/Гц^{1/2}, для образца диаметром 9 мм и длиной 18 мм наша оценка будет $1.4 \cdot 10^{-7}$ Ое/Гц^{1/2}, а для образца диаметром 20 мм и длиной 10 мм получаем величину $3.4 \cdot 10^{-8}$ Ое/Гц^{1/2}.

Из вышесказанного, а также работ [3–5] видно, что конструкция датчика дает возможность абсолютного измерения слабых магнитных полей, другими словами, датчик реагирует непосредственно на величину напряженности самого магнитного поля, а не на его изменение, как сквид. Данное высказывание согласуется с работой [1], где исследовалась работа похожего, но не аналогичного датчика. Отличие датчика [1] в том, что его сердечник расположен в одной из двух встречно включенных и расположенных рядом катушек, которые составляют измерительную (сигнальную) катушку. Катушка возбуждения (токовая) в [1] не имеет встречно намотанных секций. В нашем случае две встречно включенные и расположенные рядом катушки намотаны на один сердечник и представляют собой катушку возбуждения (токовую), а измерительная (сигнальная) катушка не имеет встречно намотанных секций. Это обстоятельство создает различие в принципе работы датчиков, а также сходство в возможности абсолютного измерения слабых магнитных полей.

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты не противоречат данным [1] в том, что в нашем и их датчиках могут наблюдаться гистерезисные свойства. Действительно, в [1] сообщается, что „при работе в магнитных полях $H_0 \leq 5-20$ Ое датчик гистерезисных свойств, связанных с захватом магнитного потока, не обнаруживает“, „в случае попадания датчика в магнитные поля $H_0 > 10-50$ Ое сверхпроводящий сердечник... захватывает магнитный поток“.

Линейный участок зависимости $U_{CD}(H_0)$ наблюдается в пределах изменения H_0 от -4 до $+4$ (рис. 2). Линейный участок „зависимости величины напряжения второй гармоники сигнала отклика поликристалла YBaCuO от постоянного магнитного поля“ [1] находится в пределах изменения постоянного магнитного поля от нуля до ~ 4 Ое (см. рис. 1 работы [1]). И здесь наблюдается хорошее совпадение результатов.

Авторы [1] утверждают, что „можно отградуировать датчик на случай замороженного магнитного потока и работать, не переводя сверхпроводящий поликристалл

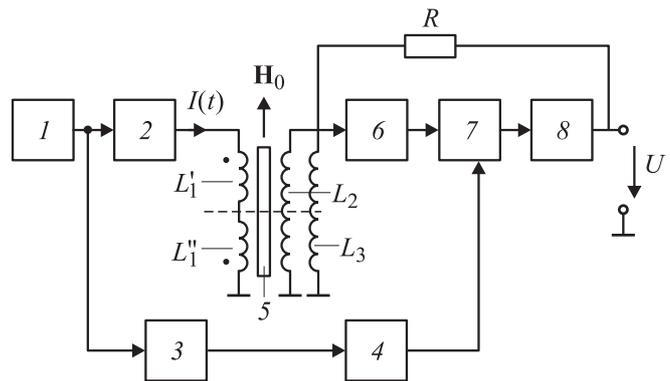


Рис. 5. Функциональная схема сверхпроводящего магнитометра с отрицательной обратной связью по магнитному полю.

в нормальное состояние, так как нелинейные свойства намагниченности сохраняются“. Но как это сделать, если ширина гистерезиса увеличивается с величиной развертки H_0 ? Даже если это и можно сделать, то данное обстоятельство сильно усложнит пользование „простым чувствительным устройством“ [1]. Действительно, если (отградуировав, согласно рис. 2, показания измерителя второй гармоники в эрстедах) вначале измерить магнитное поле в пределах $H_0 \approx 0.1$ Ое, затем в пределах $H_0 \approx 7$ Ое, далее, не переводя сверхпроводящий поликристалл в нормальное состояние, снова в пределах $H_0 \approx 0.1$ Ое, то разница с первым измерением составит примерно 0.03 Ое. Понятно, что такая ошибка гораздо больше чувствительности датчика, даже в случае снижения этой чувствительности в 1.5–2 раза при захвате магнитного потока. А если датчик попадет в магнитные поля $H_0 > 10-15$ Ое, то последующее измерение магнитного поля в пределах $H_0 \approx 0.1$ Ое будет проведено с еще большей ошибкой.

Устранить указанные недостатки позволяет отрицательная обратная связь по магнитному полю, как показано на рис. 5. Магнитометр с такой обратной связью по сравнению с синхронным измерителем (рис. 1) дополнительно содержит усилитель постоянного тока 8, резистор R и катушку обратной связи L_3 . С выхода синхродетектора 7 сигнал поступает на усилитель постоянного тока 8, выход которого через резистор R соединяется с катушкой L_3 , намотанной поверх токовой L_1 и сигнальной L_2 катушек, замыкая цепь отрицательной обратной связи по магнитному полю.

Катушка L_3 включена так, что магнитный поток, создаваемый ею, вычитается из магнитного потока, созданного измеряемым полем H_0 в сигнальной катушке. Тот факт, что магнитное поле катушки обратной связи L_3 воздействует на измеряемое („входное“) магнитное поле H_0 , причем так, что это влияние направлено в сторону, противоположную изменениям измеряемой („входной“) величины, и есть проявление отрицательной обратной связи по магнитному полю. Коэффициент

преобразования такого магнитометра

$$\frac{U}{H_0} = \frac{R\sqrt{l^2 + d^2}}{w}, \quad (8)$$

где U — напряжение на выходе магнитометра при замкнутой обратной связи по магнитному полю, w — число витков катушки L_3 , l — длина L_3 , R — сопротивление резистора обратной связи, d — диаметр L_3 . Выражение (8) получено для общего случая, когда соотношение $l \gg d$ не выполняется. Такая обратная связь не только делает зависимость напряжения на выходе магнитометра от напряженности изменяемого поля H_0 линейной и расчетной (как видно из выражения (8)), но и не допускает захвата магнитного потока, тем самым увеличивая точность измерения магнитного поля до уровня чувствительности датчика.

Заключение

В результате проведенных выше исследований можно выделить следующие основные свойства второй гармоники: 1) многозначность функции $U_{CD}(H_0)$ при развертке H_0 в пределах 140 и 7 Ое, 2) отсутствие гистерезиса в зависимости $U_{CD}(H_0)$ при развертке H_0 в пределах 1 Ое, 3) зависимость $U_{CD}(H_0)$ меняет знак при изменении знака H_0 . Указанные свойства обнаружены на частотах 10 и 100 кГц. С большой долей уверенности можно предположить, что эти свойства будут присутствовать и на гораздо более высоких частотах.

Для измерения магнитных полей можно использовать только второе и третье (из перечисленных выше) свойства второй гармоники. Захват магнитного потока сверхпроводящим сердечником крайне нежелателен для измерения магнитных полей. Это также означает, что в магнитометрах для линеаризации их характеристик и повышения точности измерения необходимо использовать отрицательную обратную связь по магнитному полю.

Согласно уравнению (6), выходная эдс датчика пропорциональна частоте ω вспомогательного переменного поля, поэтому всегда имеется резерв пропорционального повышения чувствительности (коэффициента преобразования) датчика за счет увеличения частоты переменного поля (тока). Конструкция предложенной обратной связи магнитометра не препятствует повышению частоты вспомогательного переменного поля, расширяет диапазон измеряемых магнитных полей и дает возможность абсолютного измерения слабых магнитных полей. В настоящее время слабые (10^{-6} Ое) постоянные и медленно меняющиеся магнитные поля измеряются феррозондовыми, оптическими квантовыми, прецессионными ЯМР-магнетометрами, а также сквидами. Однако сквиды, как и оптические и ЯМР-магнетометры, по сути измеряют приращение магнитного поля и в этом смысле не являются абсолютными для измерения слабого постоянного поля.

Используя малошумящие полупроводниковые элементы (для уменьшения шума самого тока), повышая рабочую частоту тока [6] и оптимизируя размеры ВТСП-сердечника, можно добиться чувствительности $\sim 10^8$ Ое/Гц^{1/2} и выше. Для сравнения чувствительность обычного сквида 10^{-9} Ое/Гц^{1/2} [1], а у лучших феррозондов 10^{-5} Ое/Гц^{1/2} [1].

Сквиды из обычных сверхпроводников имеют сложные конструкции криостатов (и их высокую стоимость), поскольку работают только при гелиевых температурах. Сквиды на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников также не отличаются простотой изготовления и долговечностью. Изготовленный на основе ВТСП состава YBaCuO датчик магнитного поля отличается простотой конструкции, более надежен и долговечен. Разработанный датчик, имея преимущества феррозонда (абсолютное измерение слабых магнитных полей, выраженная диаграмма направленности, достаточно широкий диапазон измеряемых полей), обладает на два-три порядка большей чувствительностью.

Как недостаток, свойственный и сквидам, и феррозондам, следует указать чувствительность устройства к фоновым магнитным полям, в том числе к магнитному полю Земли. Однако данное обстоятельство не снижает уверенности, что эти приборы могут быть использованы, например, в геологоразведке и изучении пространственно-временной структуры магнитных возмущений в биомедицинских измерениях.

Список литературы

- [1] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 3. С. 81–85.
- [2] Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 59–62.
- [3] Игнатъев В.К., Черных С.В. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1994. Т. 7. № 8–9. С. 1411–1416.
- [4] Игнатъев В.К., Черных С.В. // ПТЭ. 1996. № 2. С. 124–126.
- [5] Белодедов М.В., Черных С.В. // ПТЭ. 2001. № 4. С. 157–161.
- [6] Белодедов М.В., Черных С.В. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 2. С. 75–80.
- [7] Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979. 320 с.
- [8] Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона: физика и применения. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 640 с.
- [9] Дзугутов В.М., Подлевских Н.А., Фишек Л.М. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1990. Т. 3. № 1. С. 52–61.
- [10] Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников. Пер. с англ. / Под ред. Д.М. Гинзберга. М.: Мир, 1990. 543 с.
- [11] Куприянов М.Ю., Лихарев К.К. // УФН. 1990. Т. 160. Вып. 5. С. 49–87.