

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 538.945;621.317.445;620.192.63

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КВАНТОВЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ
ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2016 г. М. И. Фалей^{1,2}, Ю. В. Масленников^{1,3}, В. П. Кошелец¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

²Институт Петера Грюнберга Исследовательского центра Юлих,
Федеративная Республика Германия, 52425, Юлих

³ООО “НПО КРИОТОН”

Российская Федерация, 101000, Москва, Старосадский пер., 8, стр. 1

E-mail: valery@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 04.08.2015 г.

Разработаны сверхпроводящие квантовые интерферометрические детекторы (СКВИДы) с рабочей температурой 77 К на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, которые могут быть использованы для измерительных систем неразрушающего контроля магнитным и вихретоковым методами. Достигнуты динамический диапазон по амплитуде измеряемого сигнала около 120 дБ и пространственное разрешение ~10 мкм для измерительной системы с ВТСП СКВИДом, имеющим размер приемной петли, равный 50 мкм, и расположенным на расстоянии ~0.3 мм от находящегося при комнатной температуре исследуемого объекта. Получена чувствительность по магнитному полю около $4 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 77 К для ВТСП СКВИД-магнитометров с многослойными сверхпроводящими трансформаторами потока, достаточная для применений в таких биомагнитных измерениях как магнитокардиография и магнитоэнцефаллография. Созданы ВТСП СКВИД-градиентометры с многослойными сверхпроводящими трансформаторами потока, стабильно работающие в магнитно-неэкранированном пространстве и имеющие чувствительность к градиенту магнитного поля около $15 \text{ фТ}/\text{см}\sqrt{\text{Гц}}$ при 77 К, достаточную для детектирования единичных магнитных частиц размером около 10 мкм на расстоянии около 15 мм.

DOI: 10.7868/S0033849415120062

ВВЕДЕНИЕ

При помощи методов неразрушающего контроля (НК) проводят проверку надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов/узлов, не требующую выведения объекта из работы либо его демонтажа. Целью НК является выявление и определение местоположения дефектов в объекте контроля, а также измерение их параметров. В настоящее время методы НК используются также для обнаружения аномальных отклонений в структуре биообъектов, что позволяет проводить исследования живых организмов и тканей, не приводя к потере их жизненной активности. Одними из наиболее щадящих методов НК являются магнитный и вихретоковый методы, которые основаны на регистрации магнитных аномалий, обусловленных искомыми дефектами в объекте, или на определении магнитных свойств объекта

контроля. Магнитный метод НК состоит в пассивной регистрации магнитных сигналов, исходящих от исследуемого объекта, тогда как вихретоковый метод НК основан на возбуждении вихревых индукционных токов (токов Фуко) в электропроводящем объекте и анализе производимого ими электромагнитного поля. Одной из основных проблем НК является улучшение отношения сигнал/шум за счет повышения чувствительности детекторов и/или уменьшения шумов и паразитных сигналов. Решением данной проблемы может стать использование сверхпроводниковых квантовых интерферометрических детекторов (СКВИДов), обладающих наилучшей в настоящее время чувствительностью к магнитному полю и высоким динамическим диапазоном по амплитуде измеряемого сигнала. Измерительные системы на основе СКВИДов могут быть использованы для дистанционного измерения магнитных аномалий в технических материалах и инженерных

конструкциях на их основе. Практический интерес представляет, в частности, тестирование многослойных конструкций, где стандартные методы НК типа ультразвуковой диагностики имеют ограниченные возможности применения.

Принцип работы СКВИДа основан на регистрации выходного напряжения $V_{\text{вых}}$, индуцированного проходящим через петлю СКВИДа магнитным потоком $\Phi_{\text{СКВИД}}$, с коэффициентом преобразования $\partial V_{\text{вых}}/\partial \Phi_{\text{СКВИД}} > 10^{10}$ В/Вб, связывающим входной магнитный поток в СКВИДе и выходное напряжение на сигнальной характеристике $V_{\text{вых}}(\Phi_{\text{СКВИД}})$. Преимуществами СКВИДов при использовании их в методах НК являются:

1) векторные свойства магнитометров на основе СКВИДов – способность измерять компоненты магнитного поля;

2) широкий частотный диапазон – от 0 до ~1 ГГц;

3) непревзойденная чувствительность по магнитному полю, что позволяет измерять целый ряд физических величин, которые могут быть преобразованы в магнитное поле;

4) высокая чувствительность к изменениям магнитного поля, которая не теряется при значительных уровнях фоновых помех;

5) относительно высокая чувствительность к потоку магнитного поля, которая сохраняется даже при малых размерах СКВИДа;

6) возможность создания детекторов в виде интегрированных градиентометров различного порядка с хорошим подавлением паразитных сигналов от удаленных источников.

СКВИДы на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) имеют относительно высокую рабочую температуру 77 К, более простое и дешевое охлаждение, и лучшую энергоэффективность по сравнению со СКВИДами на основе пленок низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), имеющих рабочую температуру 4.2 К. Благодаря более высокой рабочей температуре удается реализовать меньшее расстояние между детектором и объектом, что оказывается важным для увеличения отношения сигнал/шум и улучшения пространственного разрешения в магнитной микроскопии при детектировании магнитных включений и других малых дипольных источников. При помощи ВТСП СКВИДов была достигнута сравнимая с НТСП СКВИДами чувствительность по магнитному полю вплоть до значений ~ 4 фТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ [1–4]. Благодаря тому, что теплота испарения жидкого азота (161 кДж/л) значительно выше теплоты испарения жидкого гелия (2.68 кДж/л), в криостатах сравнимых раз-

меров скорость испарения жидкого азота оказывается на порядок меньше скорости испарения жидкого гелия. Кроме того, использование криогенной жидкости и/или криокулеров проще и дешевле при рабочей температуре 77 К, чем при 4.2 К. Использование жидкого азота в качестве хладагента упрощает поддержание СКВИД систем в рабочем состоянии, что расширяет область их применения от единичных лабораторных систем до измерительных систем, работающих также в промышленных и полевых условиях.

Разработанные и изготовленные одним из авторов в Исследовательском центре г. Юлих (Германия) ВТСП СКВИДы были с успехом опробованы в измерительных системах НК для проверки целостности арматуры в железобетонных конструкциях [5], для проверки на наличие скрытых трещин во внутренних слоях обшивки самолетов и внутри ободов самолетных колес [6], исследованиях целостности армированных углеродной тканью пластиковых конструкций [7], а также при бесконтактном тестировании полупроводниковых структур при помощи лазерного СКВИД микроскопа [8, 9]. В данной работе рассмотрены ВТСП СКВИД магнитометры и градиентометры, предназначенные для систем НК материалов, магнитной микроскопии и биомагнитных исследований.

1. АВТОНОМНЫЕ ВТСП СКВИДЫ С РАЗМЕРОМ ПРИЕМНОЙ ПЕТЛИ 50 мкм

Одним из простейших вариантов датчика магнитного поля на основе ВТСП СКВИДа является петля из эпитаксиальной пленки ВТСП с двумя джозефсоновскими переходами, представленная на рис. 1. СКВИДы данного типа измеряют магнитное поле без использования дополнительных трансформаторов магнитного потока и поэтому часто называются автономными. В случае автономного СКВИДа с круглой петлей его эффективная площадь в первом приближении совпадает с геометрической площадью, что оптимально с точки зрения чувствительности и пространственного разрешения. Внутренний диаметр петли указанного СКВИДа был ~50 мкм, а внешний диаметр составлял ~70 мкм. Увеличение внешнего диаметра петли СКВИДа позволяет пропорционально улучшить чувствительность СКВИДа к магнитному полю, однако ухудшает пространственное разрешение и уменьшает динамический диапазон СКВИДа в магнитных полях. Используемые для СКВИДов пленки ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) имели c -ориентацию кристаллической решетки, критическую плотность тока около 5×10^6 А/см² при 77 К и температуру сверхпроводящего пере-

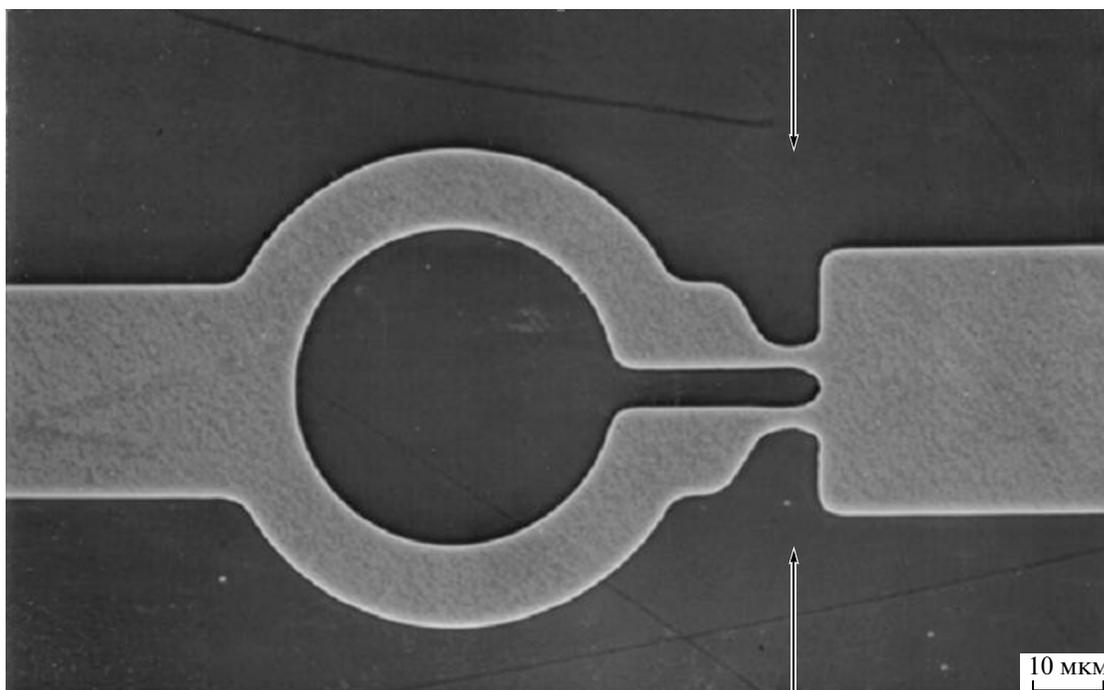


Рис. 1. Изображение автономного ВТСП СКВИДа с бикристаллическими переходами, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Стрелками указано положение бикристаллической границы в подложке и ВТСП пленке.

хода ~ 91 К. Большинство джозефсоновских переходов изготавливали на бикристаллических подложках с разориентацией в плоскости подложки 24° . Такие бикристаллические переходы имели ширину ~ 1 мкм, критический ток перехода $I_{кр} \sim 30$ мкА и характерное напряжение $I_{кр}R_n \sim 400$ мкВ при 77 К, где R_n – сопротивление перехода в нормальном состоянии. В последнее время для использования в ВТСП СКВИДах были разработаны джозефсоновские переходы на ступеньке (см. работу [4] и соответствующие ссылки в ней), которые отличаются более высоким характерным напряжением до ~ 600 мкВ при 77 К и являются более практичными с точки зрения стоимости и доступности исходных подложек.

В данной работе были исследованы различные модификации СКВИДа постоянного тока (ПТ-СКВИДа), представляющего собой петлю из сверхпроводящей пленки с двумя джозефсоновскими переходами. Основными измеряемыми характеристиками ПТ-СКВИДов являются сигнальная характеристика $V_{вых}(\Phi_{СКВИД})$ и чувствительность, определяемая спектральной плотностью шумов по магнитному полю $b(f)$. Сигнальная характеристика ПТ-СКВИДа периодична по $\Phi_{СКВИД}$ с периодом, равным кванту магнитного потока $\Phi_0 \approx 2.068 \times 10^{-15} \text{ Т м}^2 = 2.068 \text{ нТ мкм}^2$. Принято выражать чувствительность СКВИДа к магнитному

полю $b(f)$ в виде спектральной плотности шумов на выходе измерительной системы, пересчитанной на ее вход. При этом величина $b(f)$ складывается из собственных шумов СКВИДа $b_{СКВИД}(f)$, шумов управляющей электроники $b_{эл}(f)$ и шумов окружающей среды $b_{окр}(f)$ в отсутствии измеряемого сигнала. Величина $b_{сис}(f) = b_{СКВИД}(f) + b_{эл}(f)$ является пределом снизу для чувствительности измерительной системы и определяется по формуле $b_{сис}(f) = \sqrt{S_B(f)} = k\sqrt{S_\Phi(f)}$, где $\sqrt{S_B(f)}$ и $\sqrt{S_\Phi(f)}$ – спектральные плотности шумов СКВИДа по магнитному полю и потоку с учетом шумов управляющей электроники, а коэффициент преобразования измеряемого магнитного поля $V_{изм}$ в магнитный поток $\Phi_{СКВИД}$ через петлю СКВИДа $k = \partial V_{изм} / \partial \Phi_{СКВИД}$ [нТ/ Φ_0] наглядно показывает, какое измеряемое поле соответствует одному периоду сигнальной характеристики $V_{вых}(\Phi_{СКВИД})$.

Линеаризацию сигнальной характеристики ПТ-СКВИДа производили при помощи электроники с отрицательной обратной связью, компенсирующей отклонение магнитного потока $\Phi_{СК}$ через петлю СКВИДа от рабочей точки на зависимости $V_{вых}(\Phi_{СКВИД})$, в которой производная $\partial V_{вых} / \partial \Phi_{СКВИД}$ максимальна. Выходной сигнал магнитометра при этом оказывается пропорционален току обратной связи и, соответственно, изменению внешнего магнитного потока через пет-

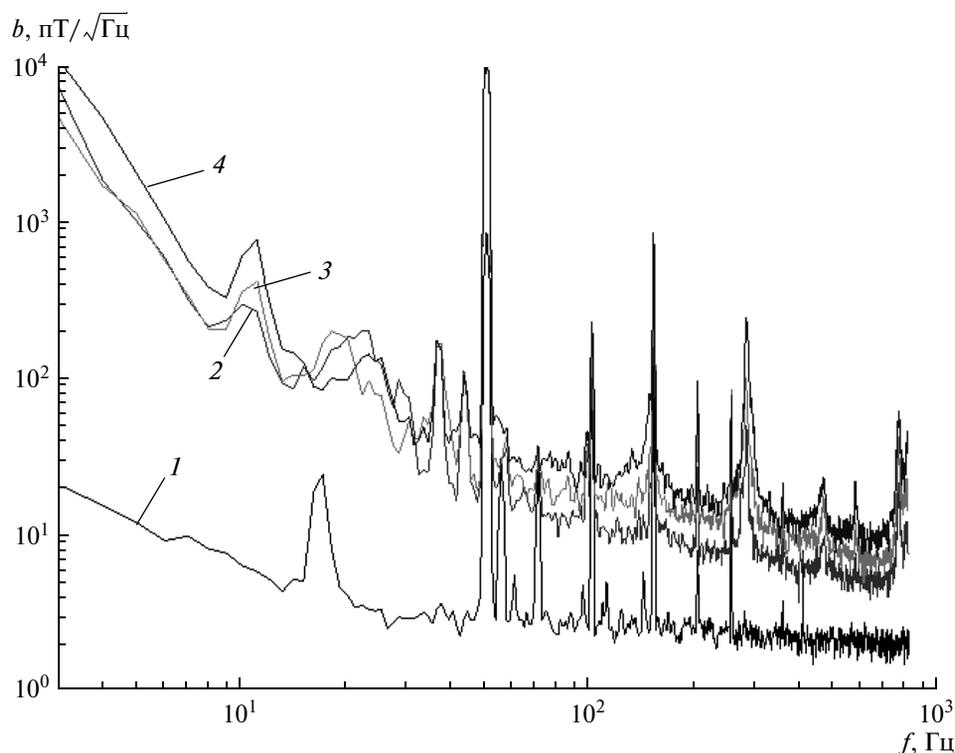


Рис. 2. Спектральная плотность шумов $b(f)$ автономного ВТСП СКВИДа в магнитном поле, создаваемом электромагнитом с железным сердечником и источником питания со стабилизацией тока. Кривые 1–4 соответствуют величине магнитного поля B : 0, 4, 8, 13 мТ.

лю СКВИДа. Максимальный наклон сигнальной характеристики определяется, главным образом, индуктивностью петли СКВИДа $L_{\text{СКВИД}}$ и величиной $R_{\text{н}}$, согласно выражению [10]:

$$\frac{\partial V_{\text{вых}}}{\partial \Phi_{\text{СКВИД}}} = \frac{4}{\Phi_0} \frac{I_{\text{кр}} R_{\text{н}}}{1 + \frac{2L_{\text{СКВИД}} I_{\text{кр}}}{\Phi_0}} \exp\left(-3.57\pi^2 \frac{k_{\text{Б}} T L_{\text{СКВИД}}}{\Phi_0}\right), \quad (1)$$

где $k_{\text{Б}} = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Калибровку коэффициента преобразования k проводили в трехслойном магнитном экране, имеющем внутренний диаметр ~ 33 см. Для представленного на рис. 1 автономного СКВИДа значение коэффициента преобразования внешнего магнитного поля в магнитный поток в СКВИДе составило величину $k \approx 500$ нТ/ Φ_0 , а амплитуда модуляции сигнальной характеристики $\Delta V_{\text{вых}}$ составляла около 30 мкВ. На рис. 2 представлены спектральные плотности шумов по магнитному полю $b(f)$ измерительной системы с автономным СКВИДОм, измеренные в условиях магнитной экранировки и в различных по величине магнит-

ных полях в магнитно-неэкранированном пространстве. Большая часть $1/f$ шумов $b(f)$ в магнитных полях связана с дрейфом источника питания электромагнита и движением вихрей магнитного поля в сверхпроводящей пленке, составляющей тело СКВИДа.

Автономные ВТСП СКВИДы подобного типа, помимо представленных выше применений [5, 6], были использованы также для магнитной микроскопии [11]. Использование СКВИДов в последнем случае обусловлено уникальной комбинацией их чувствительности, пространственного разрешения и практическим отсутствием обратного магнитного воздействия СКВИДа на объект исследования.

С ВТСП СКВИДАми подобного типа был достигнут динамический диапазон магнитометрической системы около 120 дБ по амплитуде измеряемого сигнала [12]. При расстоянии ~ 0.3 мм от работающего при температуре 77 К СКВИДа до находящегося при комнатной температуре исследуемого объекта было достигнуто пространственное разрешение ~ 10 мкм [11]. Достаточное разрешение по магнитному полю, хорошее пространственное разрешение и возможность перемещения в магнитном поле Земли без потери обратной связи в

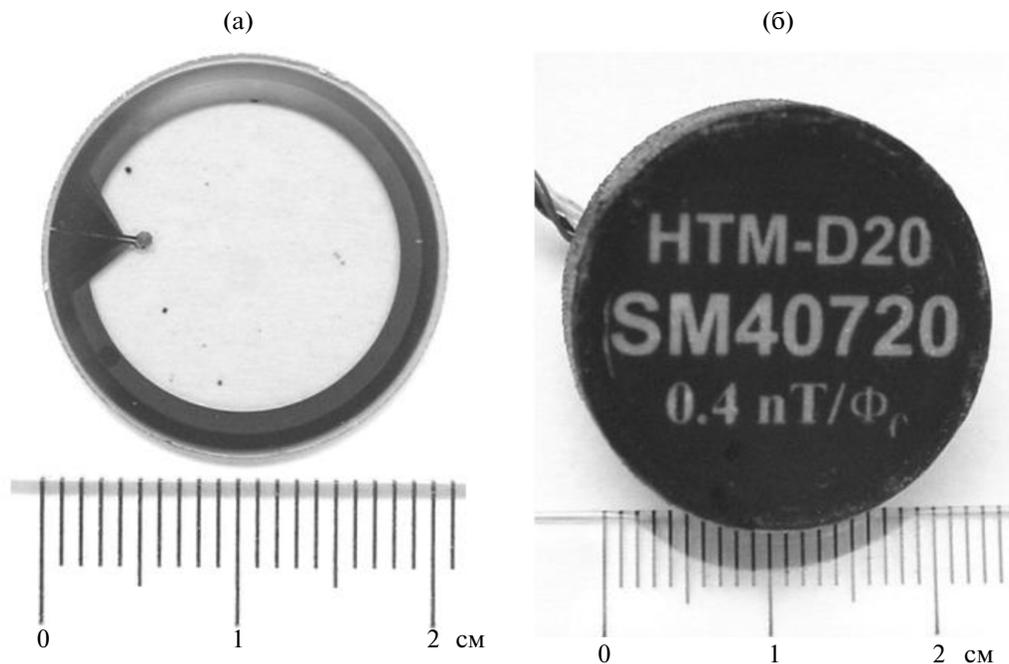


Рис. 3. Многослойный ВТСП трансформатор потока с 20-мм приемной петлей и 14-ти витковой катушкой связи (а) и закапсулированный СКВИД-магнитометр, содержащий такой трансформатор потока (б) [13].

стандартной управляющей электронике СКВИДов делают магнитометры данного типа интересными для многих практических задач НК. Типичная чувствительность по магнитному полю автономных ВТСП СКВИДов $\sim 10 \text{ пТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ оказывается достаточной для зондирования вихревыми токами обшивки самолетов и проверки целостности арматуры железобетонных конструкций методом их намагничивания: при амплитуде зондирующего сигнала $\sim 10 \text{ мТ}$ возможно измерение магнитного отклика амплитудой 1 нТ с отношением сигнал/шум ~ 100 .

2. ВТСП СКВИД-МАГНИТОМЕТРЫ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПОТОКА

Наилучшая чувствительность СКВИД-магнитометров по магнитному полю достигается применением сверхпроводящих трансформаторов магнитного потока с относительно большой площадью приемной петли и многовитковой катушкой связи, обеспечивающей максимальную передачу магнитного потока в петлю СКВИДа. Наиболее практичная конфигурация ВТСП ПТ-СКВИД-магнитометра представляет собой “флип-чип” соединение изготовленных на отдельных подложках СКВИДа и трансформатора потока. Для приемной петли трансформатора потока размером $16 \text{ мм} \times 16 \text{ мм}$ было достигнуто

наилучшее значение разрешения по магнитному полю для “флип-чип” магнитометров $\sim 4 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ при 77 К при коэффициенте преобразования $k = 0.45 \text{ нТ}/\Phi_0$ [3, 4]. Последняя модификация ВТСП ПТ-СКВИД-магнитометра данного типа, показанная на рис. 3, содержит трансформатор потока с круглой 20-мм приемной петлей, и в закапсулированном виде имеет внешний диаметр 24 мм [13]. Коэффициент преобразования данной системы $k = 0.4 \text{ нТ}/\Phi_0$.

Предельная чувствительность по магнитному полю измерительной системы со СКВИДом, индуктивно связанным с многовитковой входной катушкой сверхпроводящего трансформатора потока, может быть оценена по формуле:

$$b = b_{\text{сис}} + b_{\text{окр}} \approx b_{\text{сис}} = \sqrt{S_B} = \frac{L_{\text{пр}} + L_{\text{св}}}{\alpha A_{\text{пр}} \sqrt{L_{\text{св}} L_{\text{СКВИД}}}} \sqrt{S_{\Phi}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{пр}}$ и $L_{\text{пр}}$ – площадь и индуктивность приемной петли трансформатора потока, α – коэффициент связи между СКВИДом и катушкой связи трансформатора потока, а $L_{\text{св}}$ – индуктивность катушки связи трансформатора потока. Спектральная плотность шумов СКВИДа и управляющей электроники по потоку $\sqrt{S_{\Phi}}$ определяется, главным образом тепловыми флуктуациями в джозефсоновских переходах, максимальной кру-

тизной сигнальной характеристики и шумом предусилителя управляющей электроники $S_{эл} \approx 0.04$ (нВ)²:

$$S_{\Phi} = S_V / \left(\frac{\partial V_{\text{вых}}}{\partial \Phi_{\text{СКВИД}}} \right)^2 \approx \left\{ \frac{12k_B T}{R_n} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{R_n^2}{2} + \frac{L_{\text{СКВИД}}^2}{4} \left(\frac{\partial V_{\text{вых}}}{\partial \Phi_{\text{СКВИД}}} \right)^2 \right] + S_{эл} \right\} / \left(\frac{\partial V_{\text{вых}}}{\partial \Phi_{\text{СКВИД}}} \right)^2. \quad (3)$$

Описанные в данном разделе сверхчувствительные датчики магнитного поля могут быть использованы в измерительных системах для НК биообъектов. В работе [14] была продемонстрирована измерительная система для магнитокардиографии на основе подобных магнитометров, а в работах [4, 13, 15] — использование их для магнитоэнцефалографии. Другим применением ВТСП СКВИДов данного типа могут являться сканирующие системы измерения магнитной восприимчивости биообъектов для оперативного обнаружения (предоперационно и интраоперационно) злокачественных опухолей, используя маркирование раковых клеток магнитными наночастицами в качестве контрастного средства [16]. Данные СКВИДы могут найти применение в системах обнаружения металлических и магнитных примесей в конвейерных линиях производства пищевых продуктов [17]. ВТСП СКВИД-магнитометры также могут быть полезны для проверки литиевых батарей на наличие в них примесей железа, чтобы избежать в дальнейшем диссоциации этих примесей в электролит с последующим коротким замыканием батареи.

3. ВТСП СКВИД-ГРАДИЕНТОМЕТРЫ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПОТОКА

Одна из основных физических проблем, возникающая при практическом использовании СКВИДов для НК, состоит в выделении сравнительно малых измеряемых сигналов на фоне значительно больших посторонних магнитных шумов. Чувствительные измерения магнитных сигналов в магнитно-неэкранированном пространстве сильно усложнены наличием больших магнитных наводок сетевой частоты с гармониками сетевой частоты и низкочастотных шумов различного происхождения. Чувствительность датчиков магнитного поля на основе ВТСП ПТ-СКВИДов в данный момент достигает значений <10 фТ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при рабочей температуре 77 К. В тоже время типичный магнитный шум в лабораторных условиях составляет более 100 нТ, а магнитное поле Земли составляет ~50 мкТ. Посторонние сигналы, возникающие из-за маг-

нитной наводки на СКВИД-датчик или из-за перемещений (вибраций) датчика в магнитном поле Земли, могут, таким образом, на десять порядков превышать исследуемый сигнал.

Наиболее эффективным и широко распространенным методом исключения посторонних шумов является пространственная фильтрация сигнала при помощи градиентометрических измерений. Магнитное поле B источников, расположенных далеко от измерительной системы, как правило, более пространственно однородно по сравнению с полем от близкорасположенного источника, то есть величина его градиентных компонент $\partial^n B / \partial r^n$ (где $n = 1, 2, \dots$ — порядок градиентометра) значительно меньше соответствующих градиентных компонент поля от близкорасположенного источника. Например, поле B магнитного диполя убывает с расстоянием по закону $1/r^3$, тогда как его градиенты $\partial^n B / \partial r^n$ убывают с расстоянием значительно быстрее — по закону $1/r^{3+n}$. Измерения градиентных компонент магнитного поля позволяют регистрировать магнитный сигнал близкого источника, избегая примешивания существенной части магнитных шумов от далеко расположенных источников.

В условиях сильных магнитных шумов и отсутствии магнитной экранировки можно использовать планарный ВТСП СКВИД-градиентометр первого порядка, имеющий градиентометрический многослойный сверхпроводящий трансформатор потока с размером базы около 1 см (см. рис. 4). ВТСП СКВИД-градиентометр подобного типа был использован в работах [18, 19] для детектирования магнитных примесей в конструкционных материалах в лабораторных условиях без магнитной экранировки.

Однородное магнитное поле наводит экранирующие токи по периметру градиентометра, не давая вклад в ток через катушку связи. Только неоднородное магнитное поле может индуцировать сверхток, протекающий через находящуюся на диагонали трансформатора потока катушку связи. Индуцированный в катушке связи сверхток равен разности сверхтоков, индуцированных в петлях приемной катушки и, таким образом, пропорционален градиенту внешнего магнитного поля.

В зависимости от конкретных применений возможны различные варианты конфигурации приемной петли градиентометров. Как и в случае флип-чип магнитометров, рассмотренных в предыдущем разделе, использование многослойной многovitковой катушки связи существенно улучшает согласование по индуктивности приемной петли и СКВИДа в градиентометре. Примеры спектральных плотностей шумов градиента



Рис. 4. Фотография ВТСП СКВИД градиентометра с многослойным трансформатором потока и длиной базы около 1 см.

магнитного поля $g(f)$ такого градиентометра, измеренных в магнитном экране и магнитно-неэкранированном пространстве представлены на рис. 5. Так же, как и в случае спектральной плотности шумов магнитометра $b(f)$, рассмотренной в предыдущем разделе, величина $g(f)$ содержит собственные шумы измерительной системы и шумы окружающей среды.

Калибровку чувствительности градиентометра $(\partial B_z / \partial x) / \Phi_0$ производили вне магнитной экранировки с использованием двух параллельных проволок, расположенных на расстоянии $2d$ друг от друга, по которым в одну и ту же сторону пропускались равные токи I . Создаваемая на высоте h над проволоками вертикальная компонента магнитного поля B_z описывается по формуле:

$$B_z(x) = -\frac{\mu_0 I}{2} \left(\frac{x+d}{(x+d)^2 + h^2} + \frac{x-d}{(x-d)^2 + h^2} \right), \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн м. При значениях $I = 1$ мА, $h = 3.7$ см и $d = 1.6$ см градиент поля $\partial B_z / \partial x$ был с достаточной степенью постоянен и равен около 1.7 нТ/см в области значений x от -1 см до 1 см. Измеренное значение $(\partial B_z / \partial x) / \Phi_0$ для ВТСП СКВИД-градиентометра с представленным на рис. 4 трансформатором потока составляло около 1 нТ/(см Φ_0).

При помощи измерительной системы с использованием ВТСП СКВИД-градиентометров были обнаружены и локализованы с миллиметровой точностью единичные магнитные частицы размером до нескольких десятков микрон. Также оказалось возможным определить величину магнитного дипольного момента этих магнитных частиц. Количественный анализ данных сканирования был проведен на основании формулы распределения магнитного поля \vec{B} магнитного диполя:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{P} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{P}}{r^3} \right], \quad (5)$$

где \vec{P} [А м²] – магнитный момент диполя, а \vec{r} [м] – расстояние от диполя до точки измерений. Согласно оценкам, приведенным в работе [20], минимальный размер детектируемых магнитных частиц составляет около 10 мкм, что хорошо соответствует результатам наблюдений.

Для достижения наилучшей чувствительности градиентометров необходимо максимально увеличить площадь приемных петель и расстояние между ними. И то и другое ограничивается размером подложки и возможностями современной технологии формирования многослойных металлооксидных пленок и их структурирования. На сегодняшний день разработана технология изготовления многослойных ВТСП-структур на под-

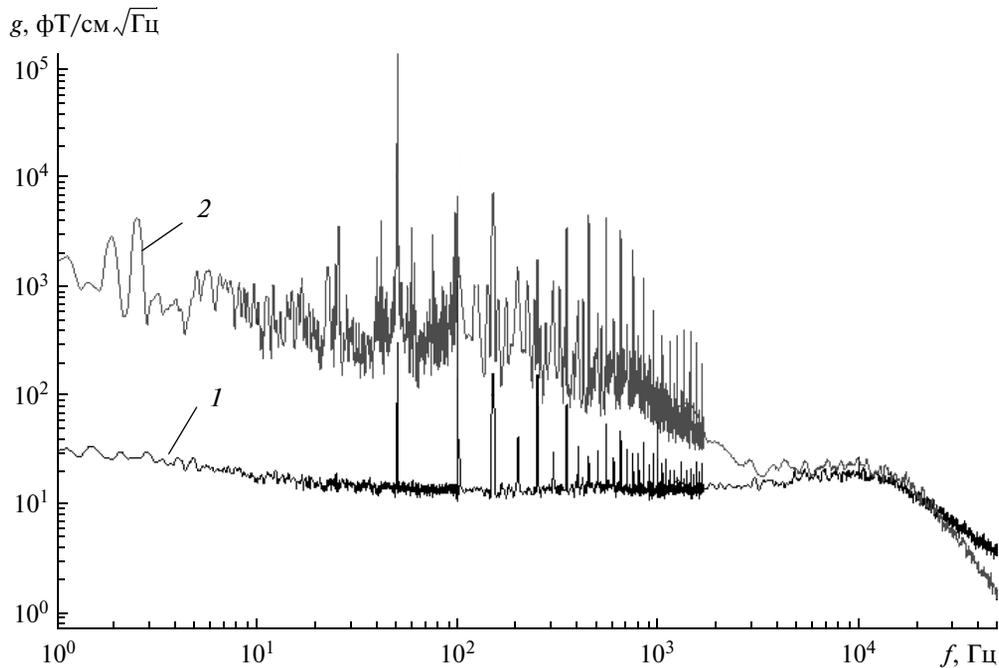


Рис. 5. Спектральные плотности шумов по градиенту магнитного поля $g(f)$ планарного ВТСП СКВИД-градиентометра с размером базы около 1 см измеренные в магнитном экране (кривая 1) и магнитно неэкранированном пространстве (кривая 2).

ложках диаметром до 30 мм. При этом наиболее оптимальными оказываются структуры с внешним диаметром до 25 мм так как качество ВТСП пленок в пределах ~ 1 мм от края подложки, как правило, хуже, чем в ее центральной части. В перспективе возможно изготовление планарных ВТСП градиентометров с многослойным трансформатором потока на монокристаллических подложках MgO размером до 100 мм. Использование ВТСП градиентометров планарного типа является вынужденной мерой ввиду отсутствия достаточно тонкой и гибкой ВТСП-провода, необходимой для изготовления различного типа аксиальных градиентометрических трансформаторов потока, которые наиболее часто используются в НТСП СКВИД градиентометрических системах, предназначенных для работы в магнитно-неэкранированных условиях [21, 22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны и исследованы ВТСП СКВИДы для широкого круга практических приложений, включая биомагнитные диагностические системы и устройства для бесконтактного тестирования полупроводниковых структур с помощью лазерного СКВИД микроскопа. Полученные значения отношения сигнал/шум оказались одного порядка со значениями, реализованными при помощи систем

на основе НТСП СКВИДов. Показано, что эти достижения, наряду с уже полученными результатами по использованию НК СКВИД-систем, открывают возможность создания практических устройств с рабочей температурой до 77 К, предназначенных для неразрушающего контроля материалов и промышленных изделий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Faley M.I., Poppe U., Urban K. et al. // IEEE Trans. 2001. V. AS-11. № 1. P. 1383.
2. Фалей М.И. // РЭ. 2005. Т. 50. № 4. С. 496.
3. Faley M.I., Jia C.L., Poppe U. et al. // Superconductor Sci. and Technology. 2006. V. 19. № 3. P. S195.
4. Faley M.I., Poppe U., Dunin-Borkowski R.E. et al. // IEEE Trans. 2013. V. AS-23. № 3. Pt. 1. P. 1600705.
5. Krause H.-J., Wolf W., Glaas W. et al. // Physica C. 2002. V. 386. № 1–4. P. 91.
6. Krause H.-J., Zhang Y., Hohmann R. et al. // Inst. Phys. Conf. Ser. № 158. Appl. Superconductivity. 1997. V. 1. P. 775.
7. Valentino M., Ruosi A., Peluso G., Pepe G.P. // Physica C. 2002. V. 372–376. № 1. P. 201.
8. Daibo M., Shikoda A., Yoshizawa M. // Physica C. 2002. V. 372–376. № 1. P. 263.
9. Daibo M., Kamiwano D. // IEEE Trans. 2005. V. AS-15. № 2. P. 684.

10. *Enpuku K., Tokita G., Maruo T., Minotani T.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 5. P. 3498.
11. *Faley M.I., Pratt K., Reineman R. et al.* // Superconductor Sci. and Technology. 2004. V. 17. № 5. P. S324.
12. *Faley M.I., Poppe U., Urban K. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. AS-9. № 2. P. 3386.
13. *Faley M.I., Gerasimov I.A., Faley O.M. et al.* // IEEE Trans. 2015. V. AS-25. № 3. Pt. 1. P. 1601605.
14. *Faley M.I., Poppe U., Urban K. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. № 13. P. 2406.
15. *Dammers J., Chocholacs H., Eich E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 21. P. 213705.
16. *Huang K.-W., Chieh J.-J., Lin I.-T. et al.* // Nanoscale Research Lett. 2013. V. 8. № 10. P. 413.
17. *Tanaka S., Fujita H., Hatsukade Y. et al.* // IEEE Trans. 2007. V. AS-17. № 2. P. 756.
18. *Faley M.I., Poppe U., Slobodchikov V.Yu. et al.* // Superconductor Sci. and Technology. 2004. V. 17. № 5. P. S301.
19. *Фалей М.И., Масленников Ю.В.* // РЭ. 2005. Т. 50. № 6. С. 759.
20. *Фалей М.И., Масленников Ю.В., Кошелец В.П.* // Радиотехника. 2012. № 12. С. 5.
21. *Масленников Ю.В., Слободчиков В.Ю.* // Биомедицинская радиоэлектроника. 2000. № 8. С. 31.
22. *Vrba J., Robinson S.E.* // Superconductor Sci. and Technology. 2002. V. 15. № 9. P. R51.