

УДК 538.945; 621.317.445

## Измерительные системы на ВТСП СКВИД

© Авторы, 2012

**М.И. Фалей** – д.ф.-м.н., доцент, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: faley@hitec.cplire.ru

**Ю.В. Масленников** – к.ф.-м.н., доцент, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: cryoton@inbox.ru

**В.П. Кошелец** – д.ф.-м.н., профессор, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: valery@hitec.cplire.ru

Разработаны измерительные системы на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИД) для неразрушающего контроля материалов, магнитной микроскопии и биомгнитных исследований. Система для неразрушающего контроля материалов с тонкопленочным СКВИД-градиометром стабильно работала в магнитно-неэкранированном пространстве с чувствительностью около  $15 \text{ фТл/см} \cdot \sqrt{\text{Гц}}$ . Магнитные микроскопы на автономных ВТСП СКВИД с ферромагнитной антенной магнитного потока показали чувствительность по магнитному полю около  $1 \text{ пТл} / \sqrt{\text{Гц}}$  и пространственное разрешение около  $1 \text{ мкм}$ . Система для биомгнитных измерений продемонстрировала достаточную чувствительность для применений в магнитокардиографии и магнитоцефалографии.

**Ключевые слова:** ВТСП, СКВИД, измерительные системы.

Measuring systems based on superconducting quantum interferometers (SQUIDs) for nondestructive testing of materials, magnetic microscopy and biomagnetic research were developed. System for nondestructive testing of materials with thin-film SQUID gradiometer operated stably in the magnetically unshielded space with sensitivity of about  $15 \text{ fT/cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}$ . Magnetic microscope based on autonomous HTc SQUID with a ferromagnetic antenna has shown the magnetic field sensitivity of about  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  and a spatial resolution of about  $1 \text{ micron}$ . System for biomagnetic measurements demonstrated sufficient sensitivity for application in magnetocardiography and magnetoencephalography.

**Keywords:** High-Tc SQUIDs, magnetic field, measuring systems.

## Введение

Системы на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров используются во множестве научных экспериментов для проведения высокочувствительных измерений в широком диапазоне частот от 1 Гц до 1 ГГц [1, 2]. Данные интерферометры регистрируют проходящий через него поток магнитного поля  $\Phi$  с коэффициентом преобразования  $\partial\Phi/\partial V > 1010$  вольт/вебер в выходное напряжение  $V$  и служат для измерения трансформируемых в магнитный поток физических характеристик. Наиболее широкое распространение СКВИД получили в измерительных системах для радиоастрономии, для неразрушающего контроля и измерений магнитных свойств материалов, магнитной микроскопии микроструктур и электрических микросхем, в измерительных системах для геомагнитных и биомгнитных исследований.

Применение СКВИД на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП СКВИД) позволило уредить их рабочую температуру с температуры жидкого гелия  $4,2 \text{ К}$  до температуры кипения жидкого азота  $77,4 \text{ К}$ . Благодаря тому, что теплота испарения жидкого азота ( $161 \text{ кДж/литр}$ ) значительно выше теплоты испарения жидкого гелия ( $2,68 \text{ кДж/литр}$ ) в криостатах

сравнимых размеров 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  $77 \text{ К}$  чем при  $4,2 \text{ К}$ . При этом чувствительность измерительных систем на ВТСП СКВИД в некоторых случаях оказывается не хуже аналогичных систем, работающих при гелиевых температурах, главным образом благодаря возможности использования более тонкой и менее шумящей теплоизоляции в ВТСП системах. Использование жидкого азота в качестве охладителя 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 произведенные одним из авторов в Исследовательском центре г. Юлих (Германия) ВТСП СКВИД [3, 4, 49] были с успехом опробованы в измерительных системах для геомагнитных исследований [5, 6], для проверки целостности железной арматуры в железобетонных конструкциях [7], для проверки на наличие скрытых трещин во внутренних слоях обшивки самолетов и внутри ободов самолетных колес [8], в исследованиях целостности армированных углерод-

ной тканью пластиковых конструкций [9], при бесконтактном тестировании полупроводниковых структур с помощью лазерного СКВИД микроскопа [10, 11], а также для дистанционного измерения параметров радиоизотопных пучков в ускорителях [12, 13]. Цель работы – *провести краткий обзор измерительных систем на основе ВТСП ПТ-СКВИД магнитометров и градиометров, предназначенных для неразрушающего контроля материалов, магнитной микроскопии и биоманнитных исследований.*

### 1. Измерительные системы для неразрушающего контроля материалов

Множество потенциальных применений СКВИД относится к неразрушающему контролю материалов. В данном случае СКВИД-системы 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 неразрушающего контроля типа ультразвуковой диагностики имеют ограниченные возможности применения. При так называемом активном тестировании зондирующий сигнал приводит к возбуждению магнитного отклика в исследуемом объекте. В качестве примеров можно привести зондирование вихревыми токами обшивки самолетов и проверку целостности арматуры железобетонных конструкций методом их намагничивания. Основным преимуществом СКВИД для данных применений является их большой динамический диапазон (~ 120 дБ) и относительно высокая чувствительность на низких частотах, что позволяет проводить зондирование на большую глубину и в присутствии сильных фоновых сигналов, например, от ферромагнитных деталей. Чувствительность СКВИД без сверхпроводящего трансформатора потока ~  $10 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  оказывается достаточной для данных измерений: при амплитуде зондирующего сигнала ~ 10 мТл возможно выполнять измерение отклика амплитудой 1 нТл с отношением сигнал-шум ~ 100.

Большое значение при неразрушающем контроле материалов имеет также пассивное дистанционное детектирование слабых магнитных сигналов от магнитных неоднородностей или примесей в конструкционных материалах. В частности, разработка и изготовление чувствительных систем измерения магнитных характеристик требует ре-

гулярного контроля (используемых конструкционных материалов (в основном, стеклопластиковых деталей) на наличие магнитных примесей. Наличие магнитного загрязнения вблизи чувствительного элемента деградирует шумовые свойства системы и увеличивает нежелательную чувствительность системы по отношению к вибрациям. Источником такого магнитного загрязнения может служить, например, пыль, содержащая иногда мельчайшие частицы магнитных соединений железа, кобальта или никеля. Частицы размером до ~ 100 микрон могут задерживаться в микротрещинах, под поверхностью и в неоднородностях конструкционных деталей измерительной системы и оставаться, таким образом, необнаруживаемыми при стандартном визуальном контроле. Измерительная система для таких рутинных инспекций должна обеспечивать необходимое разрешение на расстоянии в несколько сантиметров от таких магнитных частиц, не требовать особого внимания на поддержание ее в рабочем состоянии и стабильно функционировать в магнитно-неэкранированных лабораторных условиях. Представленная в данном разделе градиометрическая ВТСП СКВИД система применялась для различных измерений в лабораторных условиях без использования магнитной экранировки [14, 50].

На рис. 1 показан закапсулированный планарный ВТСП СКВИД градиометр с многослойным трансформатором потока и длиной базы около 1 см. Он дает возможность проводить чувствительные измерения в условиях сильных магнитных шумов на расстояниях (1...10) см от датчика до исследуемого объема и поэтому представляется наиболее подходящим для детектирования данных примесей. В градиометре использовались бикри-

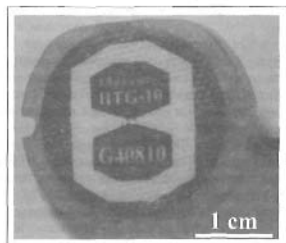


Рис. 1

сталлические переходы шириной 1 мкм, изготовленные на симметричных 24° бикристаллах SrTiO<sub>3</sub> (100) посредством стандартной фотолитографии с AZ5214 фоторезистом и ионным травлением. Тонкопленочный сверхпроводящий трансформатор потока градиометра имел градиометрическую приемную катушку диаметром 25 мм и 14-витковую катушку связи диаметром около 1 мм, расположенную в центре градиометра. Градиометр был вакуумно-плотно закапсулирован в стеклопластиковом корпусе вместе с платиновым термометром-нагревателем и медной катушкой, используемой для модуляции и обратной связи.

Расположенный на торце стеклопластиковой вставки ВТСП градиометр прижимался к внутренней поверхности дна азотного стеклопластикового криостата производства НИО «КРИОТОН» параллельной горизонтальной плоскости  $x, y$ . Направление оси  $x$  системы координат измерений было выбрано вдоль бьзы градиометра. Криостат имел высоту 60 см и вмещал 1,5 литра жидкого азота. Была продемонстрирована стабильная работа измерительной системы с данным стеклопластиковым криостатом в течение более недели без долива жидкого азота. Для более универсальной работы данной измерительной системы магнитная экранировка криостата и образцов не применялась.

Использование СКВИД в магнитно-неэкранированном объеме обычно сталкивается с проблемой выделения исследуемого сигнала на фоне значительно больших внешних помех. Так, например, типичная величина магнитного сигнала 50 Гц в лаборатории составляет около 100 нТл, а уровень магнитного сигнала от общественного транспорта в городских условиях часто превышает 1 мкТл. При вибрациях, перемещениях и, в особенности, вращениях сенсора в магнитном поле Земли амплитуда изменения поля может достигать величин порядка 100 мкТл. Все это накладывает строгие требования на динамический диапазон, линейность и быстродействие СКВИД электроники в случае использования градиометрических сенсоров.

Для выделения полезного сигнала в присутствии большого и однородного в пространстве фоновго сигнала используются градиометрические схемы в виде а) вычитания выходных сигналов магнитометров (электронный градиометр), один из которых является референсным и расположен достаточно далеко от исследуемого объекта, б) вычитание фоновго сигнала непосредственно в трансформаторе потока СКВИД за счет градиометрической конфигурации приемной ка-

тушки. В первом случае возможно произвольное взаимное расположение магнитометров, но одновременно возникает множество проблем, связанных с имеющимися ограничениями по динамическому диапазону, линейности и быстродействию магнитометров и электроники. Во втором случае, наоборот, основной проблемой является существенные ограничения на взаимное расположение петель градиометрической приемной катушки, так как в случае ВТСП трансформаторов потока обе петли расположены на одной монокристаллической подложке, образуя планарный градиометр. Размер и чувствительность планарного ВТСП градиометра ограничены размером монокристаллической подложки. При использовании многослойного многослойного трансформатора на подложке диаметром 30 мм в работе [6] удалось достигнуть чувствительности около 30 фТл/см $\sqrt{Гц}$  на частотах выше 10 Гц и около 100 фТл/см $\sqrt{Гц}$  на частоте 1 Гц.

Присутствующее в городских условиях электромагнитное излучение способно нарушить стабильность работы и ухудшить чувствительность СКВИД [15]. Чтобы избежать данной деградации характеристик СКВИД требуется обеспечивать тщательное высокочастотное плотное электромагнитное экранирование. Для защиты от электромагнитных помех частотой выше ~40 кГц была использована высокочастотная экранировка криостата, имеющая уровень собственных тепловых магнитных шумов менее 30 фТл $\sqrt{Гц}$  в области детектора. Весь криостат был обернут в алюминиевую фольгу толщиной  $d \sim 10$  мкм. Благодаря скин-эффекту в алюминии данной толщины наведенные токи экранируют внутренний объем от электромагнитных наводок частотой свыше ~40 МГц. Фольга заземлялась последовательно через оплетку кабеля и корпус СКВИД электроники.

Радиочастотная экранировка улучшила стабильность и шумовые характеристики системы при работе в неэкранированном помещении. Однако шумы системы несколько превосходили шумы, измеренные при помещении датчика в сверхпроводящий экран. В области белого шума это различие объясняется тепловыми шумами фольги. В месте расположения градиометра амплитуда  $B_N$  магнитного шума, обусловленного тепловыми шумовыми токами в алюминиевой фольге, составляет ~20 фТл $\sqrt{Гц}$  согласно уравнению [16, 17]:

$$B_N = \frac{1}{2} \mu_0 \sqrt{\frac{kT}{2\pi r z(z+d)}}, \quad (1)$$

где  $\rho \sim 2,7 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление алюминия,  $z \sim 15 \text{ мм}$  – расстояние между фольгой и градиометром, определяемое толщиной капсулы градиометра и толщиной дна криостата. Толщина дна криостата составляла  $\sim 10 \text{ мм}$  и была обусловлена наличием множества слоев, покрытых алюминием майларовых пленок, выполнявших роль радиационных экранов. При использовании градиометра с разрешением  $\sim 40 \text{ фТл/см} \sqrt{\text{Гц}}$  шумы фольги увеличивают шумы системы на приемлемую величину  $\sim 10 \%$ .

В типичных лабораторных условиях имеется магнитный шум амплитудой до нескольких микроТесла на частотах ниже  $1 \text{ кГц}$ . Для проведения чувствительных измерений без магнитной экранировки необходимо использовать хорошо сбалансированный градиометр и фильтровать выходной сигнал от наводки сетевой частоты и ее гармоник. Благодаря градиометрической конфигурации приемной катушки СКВИД значительная часть внешних шумов автоматически вычитается, что значительно упрощает требования для СКВИД электроники по быстрейшему и динамическому диапазону. Баланс градиометра  $\sim 1400$  был достигнут посредством дополнительной коррекции с помощью отрезка пермаллоевой фольги размером  $1 \times 5 \text{ см}$ , зафиксированного на внешней поверхности криостата. Для фильтрации выходного сигнала СКВИД электроники также использовался синхронный фильтр производства НПО «КРИОТОН», позволяющий подавить паразитные сигналы сетевой частоты и ее гармоник улучшив, таким образом, на два порядка отношение сигнал-шум градиометра.

Рутинные проверки конструкционных материалов (стеклопластиковых и медных деталей, криостата, кабелей, вставки и других) с помощью ВТСП СКВИД системы были проведены в магнитно-неэкранированной лабораторной обстановке. Находящейся в руке деталью просто проводили под дном криостата и наблюдали отклик градиометра на экране осциллографа. Такое сканирование является наиболее быстрым и простым тестом на наличие в образцах различных форм и размеров малых магнитных частиц и других загрязнений. При этом чувствительность ВТСП СКВИД системы на более чем два порядка величины превосходила разрешение других измерительных систем, например, основанных на феррозонде (флакскрейте).

С помощью ВТСП СКВИД системы были обнаружены и локализованы с миллиметровой точностью магнитные частицы размером до несколь-

ких микрон. Также оказалось возможным определить величину магнитного дипольного момента этих магнитных частиц. Количественный анализ данных сканирования был проведен на основании формулы распределения магнитного поля  $\mathbf{B}$  [Т] магнитного диполя:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{Pr})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{P}}{r^3} \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{P}$  [ $\text{А} \cdot \text{м}^2$ ] – магнитный момент диполя, а  $r$  [м] – расстояние от диполя до точки измерений. Для магнитного момента, перпендикулярного плоскости градиометра, измеренный сигнал описывается следующей зависимостью:

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}(x, y = 0) = \frac{3\mu_0 x (x^2 - 4z^2) P}{4\pi (x^2 + z^2)^{7/2}}, \quad (3)$$

тогда как для случая  $\mathbf{P}$  параллельного оси сканирования  $x$  (рис. 2, где приведен пример измерения ВТСП СКВИД градиометром сигнала магнитной частицы с магнитным моментом, ориентированном параллельно оси  $x$ ):

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}(x, y = 0) = \frac{3\mu_0 x (z^2 - 4x^2) P}{4\pi (x^2 + z^2)^{7/2}}. \quad (4)$$

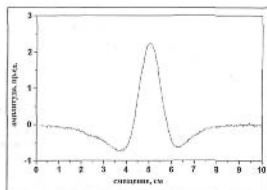


Рис. 2

В обоих случаях учитывалось, что база градиометра параллельна оси  $x$ , а плоскость градиометра лежит в горизонтальной плоскости  $x, y$  на высоте  $z$ .

В случае сферической формы частицы из  $\text{SnCo}_2$  ее удельный магнитный момент составляет величину  $\sim 0,07 \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{г}$ . Частица диаметром  $\sim 10 \text{ мкм}$  имеет массу  $\sim 7 \text{ нг}$  и, соответственно, магнитный момент  $P \sim 0,5 \text{ нА} \cdot \text{м}^2$ . Максимальное магнитное поле такой частицы, расположенной на расстоянии  $\sim 15 \text{ мм}$ , составляет  $\sim 30 \text{ пТл}$ . Градиент магнитного поля  $\partial B_z / \partial x$  [Т/м] на данном расстоянии от

частицы составляет  $\sim 0,64 \mu_0 P / \pi^2 \sim 25$  пТл/см. С учетом частотного диапазона ( $\sim 100$  Гц), приемлемого отношения сигнал-шум  $\sim 10$  и измеренной спектральной плотности шумов получаем, что для рутинных измерений минимальный детектируемый градиент магнитного поля составляет  $\sim 30$  пТл/см. Таким образом, согласно данным оценкам, минимальный размер наблюдаемых частиц составляет  $\sim 10$  мкм, что хорошо соответствует результатам наблюдений. В случае стальных частиц их удельный магнитный момент в  $\sim 10$  раз меньше удельного магнитного момента  $\text{SmCo}_5$ . Соответственно, минимальный размер детектируемых частиц из стали составляет  $\sim 20$  микрон.

Описанная выше измерительная система обеспечивала необходимое разрешение при быстрых проверках конструкционных материалов и была проста в обращении при работе в магнитно-неэкранированных условиях лаборатории. В перспективе, увеличение базовой длины гратометра и проведение сканирования по плоскости позволит лучше характеризовать свойства магнитных частиц.

## 2. Применение ВТСП СКВИД системы для магнитной микроскопии

Одним из первых применений СКВИД практически сразу после их изобретения было изучение распределения квантов магнитного потока в проволочке диаметром  $\sim 50$  мкм [18]. Использование СКВИД в данном случае обусловлено уникальной комбинацией их чувствительности, пространственного разрешения и практически отсутствием обратного воздействия на объект исследования. Возможность представления двумерного распределения определенной компоненты магнитного поля с пространственным разрешением лучше 100 мкм позволяет говорить о соответствующем устройстве, имеющем СКВИД в качестве чувствительного элемента, как о СКВИД микроскопе. Отличительной чертой СКВИД микроскопа является возможность количественного измерения слабого магнитного поля с разрешением по магнитному моменту малых объектов до значений  $\sim 10^{-15}$  А·м<sup>2</sup>/√Гц [19] и его пространственного распределения. Интересными применениями СКВИД микроскопа являются, в частности, изучение  $d$ -симметрии волновой функции в ВТСП [20, 21], магнитных пленок [22, 23] и других фундаментальных исследований [24].

В современном СКВИД микроскопе образец перемещается вблизи СКВИД, в то время как ком-

пьютер записывает сигнал СКВИД в зависимости от всех трех координат ( $x, y, z$ ) образца. Так как магнитное поле микробъектов быстро падает с расстоянием, то основная проблема, ограничивающая чувствительность и пространственное разрешение СКВИД микроскопа, состоит в уменьшении расстояния между объектом и СКВИД. В большинстве случаев пространственное разрешение ограничивается размерами приемной петли СКВИД и/или расстоянием от нее до исследуемого объекта. Наименьшее расстояние может быть достигнуто в случае, когда СКВИД и объект находятся в общем объеме – в криогенной жидкости или вакууме. Однако это затрудняет использование данных СКВИД микроскопов: в дополнение к ограничениям на выбор объекта исследования имеются трудности с позиционированием образца относительно СКВИД и при перезагрузке образцов.

С развитием ВТСП стала возможной работа СКВИД при азотных температурах, что расширило круг исследований и стимулировало коммерческие применения СКВИД микроскопов [25]. Открылась возможность использования более простых, охлаждаемых жидким азотом или криокулером криостатов, имеющих меньшее расстояние между находящимся в вакуумном объеме СКВИД и внешней поверхностью криостата. Таким образом облегчилось изучение объектов, находящихся в воздухе при комнатной температуре. Данное обстоятельство особенно важно, например, при биомгнитных исследованиях, а также при изучении локального распределения магнитной восприимчивости в геологических образцах или конструкционных материалах, закороток и токов утечки в интегральных схемах, однородности намагниченности пленок магнитных структур в спинтронике и так далее. Для дальнейшего улучшения чувствительности и пространственного разрешения СКВИД микроскопа между СКВИД и исследуемым объектом используются проводники магнитного потока из пермаллоевой проволоки [26–30] или пермаллоевой фольги [31].

В данном разделе описано применение ВТСП СКВИД для магнитной микроскопии объектов, находящихся вне криостата при комнатной температуре с помощью СКВИД микроскопов двух типов: сканирующего СКВИД микроскопа (ССМ) с регистрацией магнитного поля автономным СКВИД и сканирующего СКВИД микроскопа с проводником магнитного потока (ССМ с ПМП) из аморфной пермаллоевой фольги. В первом случае

основной проблемой является обеспечение наименьшего расстояния между объектом и СКВИД, тогда как во втором случае основная задача состояла в обеспечении наилучшей связи по магнитному потоку между проводником магнитного потока и СКВИДОМ.

**Сканирующий СКВИД микроскоп.** При разработке сканирующего СКВИД микроскопа (ССМ) основной проблемой является обеспечение минимального расстояния между находящимся вне криостата при комнатной температуре измеряемым объектом и СКВИД. Охлаждаемый хладопроводом СКВИД помещается в вакууме рядом с тонким окном во внешней стенке криостата. Из соображений механической стабильности и минимизации прогиба окна уменьшение его толщины желательно проводить при одновременном уменьшении его диаметра. Соответственно, для того чтобы максимально приблизить СКВИД к окну необходимо было также существенно уменьшить размер СКВИД и его подложки. Механическая юстировка СКВИД относительно окна практически ограничена на размерах  $\sim 100$  мкм. На данном масштабе использование трансформаторов потока оказывается неэффективно и это определило выбор автономного СКВИД для ССМ [32]. В качестве джозефсоновских переходов были выбраны бикристаллические переходы как наиболее простые в изготовлении и имеющие большее характерное напряжение.

В случае автономного СКВИД 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 СКВИД был  $\sim 50$  мкм, а внешний диаметр петли СКВИД составлял  $\sim 70$  мкм. Увеличение внешнего диаметра петли СКВИД позволяет пропорционально улучшить поле-потоковую чувствительность СКВИД, однако ухудшает пространственное разрешение и уменьшает динамический диапазон СКВИД в магнитных полях.

Для ССМ ВТСП ПТ-СКВИД были разработаны и изготовлены в Исследовательском центре Юлих (Германия). СКВИД были изготовлены на бикристаллической подложке  $\text{SrTiO}_3$  (100) с симметричной разориентировкой  $2 \times 12^\circ = 24^\circ$  в плоскости подложки. Ширина бикристаллических джозефсоновских переходов составляла  $\sim 1$  мкм, критический ток  $(10 \dots 30)$  мкА, а характерное напряжение  $I_c R_n$  – до 400 мкВ при 77,4 К. Коэффициент преобразования поле-поток данного СКВИД со-

ставлял  $\sim 500$   $\mu\text{T}/\Phi_0$ , а амплитуда модулирующей вольт-поточковой характеристики составляла  $\sim 30$  мкВ. Для защиты во время механической обработки СКВИД пассивировался пленками  $\text{SiO}_2$  и электроотрицательного фоторезиста.

После разделения подложки один из СКВИД был приклеен двухкомпонентным клеем на торце сапфирового теплопровода и шлифован с четырех сторон до размеров  $0,5 \times 0,7$  мм. Контактные площадки токовыводов СКВИД были вынесены на боковую поверхность сапфирового хладопровода серебряными пленками толщиной  $\sim 200$  нм. На рис. 3,а приведена фотография данного СКВИД с тонкопленочными токовыводами, расположенного на острие сапфирового хладопровода. Катушка обратной связи и нагреватель наклеивались на сапфировый хладопровод на расстоянии  $\sim 1$  мм от СКВИД.

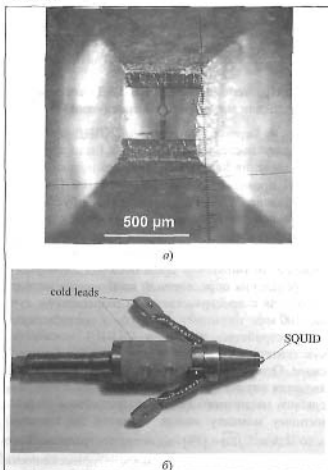


Рис. 3

Сапфировый хладопровод с расположенным на нем СКВИД был вклеен в медный держатель, имеющий распилы вдоль оси для уменьшения в нем токов Фуко и тепловых магнитных шумов. На

медном держателе крепились окружающий сапфировый хладопровод радиационный экран и гибкие хладопроводы из жгутов медных проволок. В свою очередь, медный держатель наклеивался на стеклопластиковый корпус, содержащий электрическую схему согласования импеданса и 10-ти штырьковый разъем LEMO. Весь ВТСП ПТ-СКВИД сенсор для ССМ в сборе и с присоединенным криокабелем представлен на рис. 3,б. Долговременная химическая стабильность СКВИД обеспечивалась его хранением в вакууме вакуумной рубашки криостата. Гибкие медные хладопроводы обеспечивали тепловой контакт и охлаждающие сенсора от резервуара с жидким азотом. Уступ на медном радиационном экране служил пьедесталом для стеклопластикового крепления, помогающего автоматически поддерживать микронное расстояние между СКВИД и окном.

На рис. 4 представлена спектральная плотность СКВИД сенсора ССМ, измеренная в магнитном экране (сплошная кривая) и вне магнитного экрана (пунктирная кривая). В обоих случаях было получено разрешение по магнитному полю  $\sim 8 \text{ пТ}/\sqrt{\text{Гц}}$  в области белого шума на частотах более 100 Гц. На частотах ниже 70 Гц шумы неэкранированного СКВИД представляли собой типичный шум магнитного поля в лаборатории, что подтверждалось измерениями с другими датчиками магнитного поля, в том числе и более чувствительными СКВИД. Чувствительность сенсора на частоте  $\sim 1 \text{ Гц}$  составляла  $\sim 20 \text{ пТ}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

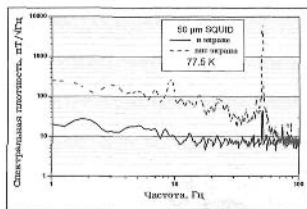


Рис. 4

Данный СКВИД был установлен в ССМ при помощи устройства автоматической поддержки микронного расстояния между СКВИД и окном, разработанного фирмой «Tristan Technologies inc.» (патент US2003042898). Данное расстояние устанавливалось единожды на фирме и не требовало

дальнейшей юстировки пользователем. Дополнительным преимуществом данной конструкции является безопасность для СКВИД и окна даже в случае непредвиденного отогрева дьюара, сопровождаемого термическим расширением холодных частей криостата.

На рис. 5 представлен ССМ фирмы «Tristan Technologies inc.», содержащий описанный выше ВТСП ПТ-СКВИД в качестве чувствительного элемента. Характерными особенностями данного микроскопа являются термическая изоляция сенсора и дьюара, а также расположение сканирующей платформы на виброационно-изолированном столе. На дополнительном столе располагались СКВИД электроника, мониторы и компьютер. С помощью лазерного профилометра, видеотелескопа высокого разрешения и сканирующей платформы достигалась микронная точность позиционирования образца под сенсором.



Рис. 5

Виброационно-изолирующий стол ССМ держал систему активного демпфирования, компенсирующую с помощью соответствующей обратной связи большую часть внешних вибраций и шумов шаговых двигателей. Тем не менее несмотря на данные предосторожности движение моторов приводило к дополнительному увеличению шумов сенсора в  $\sim 10$  раз на частоте 1 Гц.

Расстояние между СКВИД и окном калибровалось в откаченном и охлажденном состоянии при помощи метода магнитной петли. Через две расположенные на определенном расстоянии параллельные проволоки пропускался определенный ток в противоположных направлениях. При помощи подгонки теоретических оценок к экспериментальной кривой было получено, что минимальное расстояние между СКВИД и находящимся вне криостата образцом составляло  $\sim 400 \text{ мкм}$ .

Эффективную чувствительность системы можно характеризовать по минимальному детектируемому изменению поля, которое может быть зарегистрировано в присутствии окружающего шума. При минимальном расстоянии была получена амплитуда сигнала  $\sim 120$  мкВ от переменного тока частотой 200 Гц и амплитудой  $\sim 600$  нА, протекающего через описанную выше пару параллельных проводов. В стандартных неэкранированных лабораторных условиях уровень шума составлял  $\sim 7,5$  мкВ. С учетом использованного времени усреднения  $\tau \sim 1$  с получаем величину наименьшего детектируемого тока  $\sim 75$  нА, что соответствует разрешению системы по магнитному полю  $\sim 25$  пТ/√Гц. Измерения в экранированных условиях позволили бы детектировать более слабые поля в соответствии с приведенным на рис. 4 спектром.

На рис. 6 представлен профиль магнитного поля, полученный в результате сканирования расположенного в непосредственной близости к СКВИДУ ряда параллельных проводов с током  $\sim 600$  нА с целью определения чувствительности и пространственного разрешения ССМ.

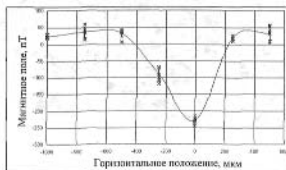


Рис. 6

Пространственное разрешение системы оценивалось из чувствительности СКВИД и полученного в результате данного измерения максимального градиента магнитного поля  $\partial B_z/\partial x$ . В лабораторных условиях при постоянной времени  $\tau \sim 1$  с разрешение по магнитному полю составляло  $\partial B \sim 25$  пТ. На основании полученных данных было получено пространственное разрешение  $\Delta x = \partial B/(\partial B_z/\partial x) \sim 25$  мкм. Это значение было улучшено до  $\sim 10$  мкм при пропускании через проводки большего тока.

Данный ССМ может быть использован для изучения распределения статического магнитного поля других объектов, таких как, например, шлифов геологических проб, мягкомагнитных пленок

или магнитных лент. Наблюдаемое при этом пространственное разрешение аналогично полученному на проводах с током разрешения.

В данном ССМ имеется возможность проводить бесконтактное картографирование распределения проводимости методом вихревых токов и измерения магнитной восприимчивости. С этой целью на дне криостата устанавливались катушка или кольцевой постоянный магнит, создающие однородное магнитное поле величиной до  $\sim 10$  гаусс в месте расположения сенсора и образца. После сканирования образца в присутствии магнитного поля проводилось вычитание из данных результатов сканирования без магнитного поля. Полученная разностная карта отображала локальное распределение статической восприимчивости образца.

Таким образом, благодаря использованному ПТ-СКВИД с субмикронными джозефсоновскими переходами и конструкции криостата описанный выше ССМ дал возможность проводить картографирование локальной магнитной восприимчивости. Это выгодно отличало данный ССМ от ССМ с ферромагнитной антенной, так как обычно применяемый в качестве материала ферромагнитной антенны пермаллой насыщается в полях  $\sim 100$  мТл.

**СКВИД микроскоп с проводником магнитного потока.** Пространственное разрешение ССМ в основном ограничено расстоянием между СКВИД и находящимся вне криостата образцом. Эффективным методом улучшения пространственного разрешения является ССМ с проводником магнитного потока (ПМП) из ферромагнитного материала [26]. В подавляющем большинстве случаев в качестве ПМП использовался отрезок пермаллоевой проволоки диаметром  $\sim 0,1$  мм, заостренный с помощью химического травления со стороны образца до диаметра  $\sim 0,1$  мкм. Противоположный торец проволоки упирался в петлю СКВИД. Таким образом было получено разрешение  $\sim 0,3$  мкм при сканировании содержащего ферромагнитные микрочастицы холодного образца [28]. Существенными недостатками данной конструкции являются относительно большие потери в чувствительности из-за отсутствия проводника магнитного потока через петлю СКВИД и обратно к образцу, а также плохое пространственное разрешение при исследовании магнитных полей токов. Магнитное поле тока, протекающего по тонкому проводнику, убывает с расстоянием  $r$  по относительно слабому закону  $\sim 1/r$ , при котором ферромагнитная антенна улавливает большую часть магнитного потока по всей своей



длине, и только небольшая его часть детектируется на острие [33]. Соответственно, пространственное разрешение микроскопа для данного объекта опять же определяется расстоянием от объекта до СКВИД. Магнитное поле ферромагнитных микро-частиц убывает с расстоянием по достаточно быстрому закону  $\sim 1/r^3$ , при котором детектируется главным образом магнитное поле объекта, расположенного вблизи острия ферромагнитной антенны.

Повышение чувствительности и пространственного разрешения ССМ с ПМП было выполнено [31] замыканием ПМП по всему пути от образца через СКВИД и обратно к образцу. С этой целью был разработан магнитометр с автономной связью, имеющий приемную петлю размером  $\sim 3 \times 1,5$  мм. С помощью ультразвукового дробления внутри приемной петли насквозь через подложку было изготовлено отверстие размером  $\sim 0,1 \times 1$  мм, достаточное для пропускания через него магнитной антенны из заостренной полоски фольги аморфного сплава  $(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Mo})_{73}(\text{Si}, \text{B})_{27}$  (Vitrovac 6025F фирмы «Vacuumschmelze GmbH», Германия) шириной  $\sim 1$  мм и толщиной  $\sim 25$  мкм (рис. 7). Магнитная антенна была проложена от исследуемого объекта через данное отверстие и обратно к объекту, что позволило минимизировать потери магнитного потока и улучшить пространственное разрешение.

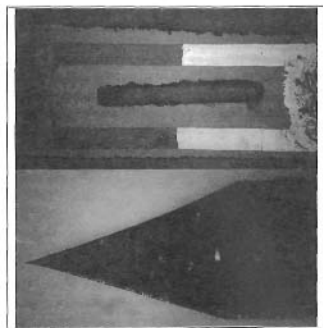


Рис. 7

Выбор фольги из аморфного пермаллоя для ПМП обосновывался высоким значением магнитной восприимчивости ( $\mu_r \sim 10^5$ ), малым гистерези-

сом (коэрцитивное поле меньше 10 мкТл) и достаточно малыми шумами. Направление среза фольги было перпендикулярно направлению ее максимальной магнитной восприимчивости, что обеспечивало линейное намагничивание вдоль ПМП при монотонном изменении ориентации доменов [34] и минимизировало, таким образом, шумы Баркгаузена ферромагнитного ПМП.

Было проведено сравнение между ПМП из используемой другими группами ферромагнитной проволоки диаметром  $\sim 100$  мкм и данной пермаллоевой фольгой. Получено, что пермаллоевая фольга проводит на  $\sim 2$  порядка больший магнитный поток по сравнению с использованной в работе [28] ферромагнитной проволокой из того же материала, что соответствует отношению произведенной их поперечного сечения и магнитной восприимчивости.

На рис. 8 приведены спектральные плотности собственных шумов используемого для ССМ с ПМП представленного на рис. 7 магнитометра, измеренная в магнитном экране вместе с ПМП (а) и без ПМП (б). Кривые приведены с учетом изменения коэффициента преобразования поле-поток при введении ПМП. Видно, что наличие ПМП достаточно мало меняет шумы измерительной системы.

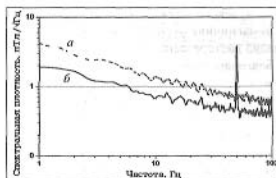


Рис. 8

Уровень термически возбужденных магнитных шумов в нулевом поле можно оценить согласно полученному теоретически в работе [35] уравнению:

$$\langle H_B^2 \rangle^{1/2} \approx \sqrt{\frac{4k_B T}{V \mu}} \approx 10 \phi T / \sqrt{\mu}, \quad (4)$$

где  $V$  – объём ПМП;  $\mu$  – коэффициент магнитной восприимчивости ПМП на нулевой частоте. Полученная величина на порядки меньше наблюдаемых экспериментально магнитных шумов, что свидетельствует о наличии более существенного источника шумов в ПМП. Наиболее вероятным из

таких источников магнитных шумов может быть релаксация неоднородной остаточной намагниченности ПМП.

СКВИД с ПМП был расположен на торце сапфирового теплопровода в вакуумном зазоре азотного криостата. Расстояние между СКВИД и сапфировым окном составляло  $\sim 2$  мм. Изготовленный из пермаллоевой фольги ПМП проходил через сапфировое окно и был в него вакуумно-плотно вклеен с помощью эпоксидного клея. Расстояние между СКВИД и острием ПМП составляло  $\sim 3$  мм, рабочая температура СКВИД  $\sim 78$  К.

Проводник магнитного потока и СКВИД были дополнительно заэкранированы дополнительной пермаллоевой фольгой «Vitrovac» со всех сторон за исключением небольшого круглого отверстия диаметром  $\sim 70$  мм, в центре которого располагался заостренный конец ПМП. В данной конфигурации только магнитный поток из области острия передается к СКВИД. Нижняя часть криостата, содержащая СКВИД и ПМП, окружалась дополнительным пермаллоевым экраном, который уменьшал в  $\sim 50$  раз влияние внешних магнитных полей, возникающих от движения сканирующего стола, вибраций в поле Земли и интерференции сетевой частоты 50 Гц. Это также гарантировало, что ПМП работал вблизи нулевого поля на линейном участке кривой намагничивания вдали от насыщения и не проявлял гистерезисных эффектов.

Благодаря высокому удельному сопротивлению и малой толщине фольги аморфного пермаллоя из которого был изготовлен ПМП эффект вихревых токов на частотах ниже  $\sim 10$  кГц был пренебрежимо мал. Низкая теплопроводность данной фольги ограничивала теплоподвод по ней к СКВИД. Общая оптимизация теплозащиты 0,8-литрового криостата фирмы «ЛК» (Германия) позволяла проводить измерения в течение двух дней без долива жидкого азота.

Образец передвигался с помощью сканирующей платформы по всем трем координатам  $x, y$  и  $z$  с точностью позиционирования лучше  $\sim 1$  мкм при площади сканирования в плоскости  $xy$  более  $15 \times 15$  см. На рис. 9 показан ССМ с ПМП и позиционной сканирующей платформой. При этом использовался более компактный криостат фирмы ЛК (Германия) вместимостью  $\sim 200$  мл жидкого азота, имеющем ресурс работы  $\sim 4$  ч.

Почти постоянное расстояние в несколько микрометров между поверхностью образца и ост-

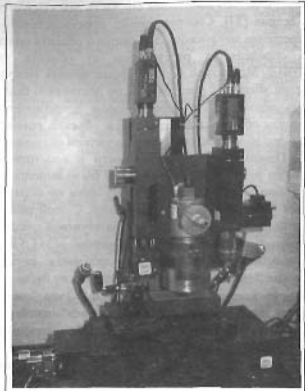


Рис. 9

рием ПМП достигалось немагнитным столиком, имеющим механическую подстройку уровня, и двух оптических телескопов. Сервомоторы сканирующей платформы располагались на расстоянии более 40 см от острия ПМП и имели дополнительную магнитную экранировку. Диапазон сканирования и его скорость, а также сбор данных и их представление в графическом виде осуществлялись при помощи персонального компьютера.

Работа СКВИД обеспечивалась СКВИД электронной производствa НИО «КРИОТОН», работающей с переменным током смещения в режиме замкнутой обратной связи. Сигнал модуляции СКВИД по потоку был выполнен при помощи маленькой катушки из медной проволоки, намотанной на ферромагнитную проволоку диаметром  $\sim 25$  мкм, которая также проходила через отверстие в приемной катушке СКВИД. Выходной сигнал СКВИД электроники в режиме замкнутой обратной связи был пропорционален магнитному потоку, передаваемому посредством ПМП от его острия через приемную катушку СКВИД.

Выходной сигнал СКВИД электроники дополнительно отфильтровывался при помощи синхронного фильтра производства НИО «КРИОТОН». Данный фильтр удалял практически полностью интерференцию сигнала сетевой частоты 50 Гц и

ее гармоник, что было особенно важным при детектировании статических магнитных полей образцов. При изучении магнитных полей токов использовалась модуляция токов и техника синхронного детектирования на частоте  $\sim 1$  кГц, на которой собственные шумы СКВИД, внешние магнитные шумы и механические вибрации были минимальны.

Тестовые тонкопленочные образцы, содержащие петли и меандры различного размера, были изготовлены при помощи литографии платиновых пленок толщиной  $\sim 100$  нм, осажденных методом магнетронного распыления. Также исследовалось распределение магнитного поля над поверхностью различных магнитных носителей информации многократного использования, таких как, например, жесткие диски для персонального компьютера или различные ферромагнитные пленки, содержащие слои железа или кобальта толщиной в несколько нанометров. Подобные магнитные пленки используются для магнитоэлектронных приборов, в частности, в спинтронике.

Пространственное разрешение и чувствительность ССМ с ПМП проверялись путем измерения магнитных полей тонкопленочных структур, несущих заданный ток. В левой части рис. 10 показан результат измерения магнитного поля петли с током, имеющей внутренний диаметр  $\sim 80$  мкм и ширину полоски проводника  $\sim 10$  мкм, а в правой – фотография данной петли. Величина магнитного поля представлена в данном случае отщесками серого цвета. Максимальная величина магнитного поля в центре петли составляла  $\sim 1$  мкТл при величине пропускаемого через петлю переменного тока  $\sim 74$  мкА, имеющего частоту  $\sim 1,6$  кГц. Постоянная интегрирования синхродетектора составляла  $\sim 10$  мс.

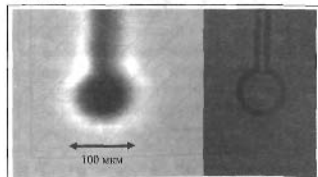


Рис. 10

Представленная в левой части рис. 10 область сканирования составляла  $400 \times 400$  мкм и складывалась из 100 линий сканирования по 1300 точ-

кам измерения на каждой из линий. При скорости сканирования  $\sim 0,5$  мм/сек время измерения данного изображения составляло  $\sim 2$  мин.

На рис. 11 представлен результат линейного сканирования магнитного поля через центр тонкопленочной петли, имеющей внутренний диаметр  $\sim 80$  мкм и ширину полоски проводника  $\sim 10$  мкм, по которой протекал переменный ток  $\sim 7,4$  мкА. При данном токе расчетная амплитуда магнитного поля в центре петли составляла  $\sim 0,1$  мкТл, что с учетом использованной полосы измерений  $\sim 100$  Гц и наблюдаемого отношения сигнала-шум приводит к оценке чувствительности данного ССМ с ПМП на уровне  $\sim 0,6$  нТл/√Гц. При увеличении отверстия в экране вокруг острия ПМП чувствительность ССМ улучшается до значений собственных шумов СКВИД со вставленным ПМП, так как ПМП собирает магнитный поток с большей эффективной площади. По этой же причине увеличение отверстия в экране приводит к ухудшению пространственного разрешения ССМ.

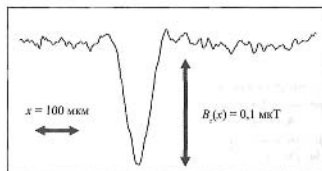


Рис. 11

Пространственное разрешение характеризовалось двумя методами: визуальным и расчетным. В качестве тестового объекта использовался тонкопленочный меандр, по которому пропускался переменный ток  $\sim 90$  мкА частотой  $\sim 1,6$  кГц. Токи соседних полосок создавали магнитные поля противоположного направления. В левой части рис. 12 приведено измеренное распределение магнитного поля  $B_z(x, y)$  над меандром, имеющем расстояние между полосками тока  $\sim 10$  мкм (область сканирования  $400 \times 1600$  мкм). Сразу бросается в глаза короткое замыкание тока в левой части меандра. Данное замыкание было обнаружено на маске для литографии уже после инспекции магнитных полей структуры, так как в оптическом микроскопе оно значительно менее различимо.

Визуально, по распределению магнитного поля в различных участках меандра на рис. 12 можно распознать отдельные пути и направления токов, что демонстрирует улучшение пространственного разрешения в ~ 5 раз по сравнению с типичным визуальным пространственным разрешением, достигнутым для ССМ без ПМП при изучении находящихся вне криостата объектов.



Рис. 12

Метод математической реконструкции протекающих по поверхности токов  $I(x,y)$  по результатам измерений распределения нормальной компоненты магнитного поля  $B_z(x,y)$  способен более чем в ~ 20 раз улучшить пространственное разрешение ССМ [36]. Следовательно, в случае применения адаптированного для ССМ с ПМП метода математической реконструкции можно ожидать улучшения пространственного разрешения до значений ~ 0,5 мкм.

Аналогичные оценки можно сделать применяя описанный в предыдущем подразделе метод. На рис. 13 приведено распределение магнитного поля в направлении поперек токового меандра в бездефектной области. Положение полосок с током указано стрелками, а направление токов отмечено в кружках. Приняв наблюдаемую ширину шумовой дорожки  $\delta B = 1$  ед., из рис. 13 получаем максимальный градиент по полю  $\delta B/\delta x \sim 63$  ед./20 мкм, что формально соответствует пространственному

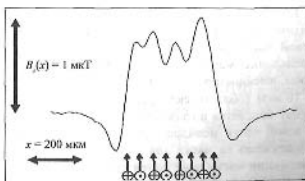


Рис. 13

разрешению  $\delta x \sim \delta B/(\partial B/\partial x) \sim 0,3$  мкм. С более острым наконечником ПМП и меньшим отверстием в пермаллоевом экране возможно дальнейшее увеличение как визуального, так и расчетного пространственного разрешения данного ССМ.

На рис. 14 приведено сравнение сканирующей ВТСП СКВИД микроскопа с ферромагнитной антенной (FASSM) по чувствительности и пространственному разрешению с приведенными в работе [37] другими методами магнитной микроскопии по чувствительности и пространственному разрешению различных методов магнитной микроскопии: декорацией магнитными частицами (DMP); сканирующим электронным микроскопом (SEM); GaAs датчиком Холла (Hall); микроскопом магнитных сил (MFM); датчиками на гигантском магнеторезистивном эффекте (GMR); сканирующим СКВИД (SS); сканирующим НТСП СКВИД микроскопом (SSM). Данные по сканирующему СКВИД приведены для случая НТСП СКВИД и объекта, находящегося при гелиевой температуре в непосредственном контакте со СКВИД. В отличие от микроскопа магнитных сил, который имеет гораздо лучшее пространственное разрешение, ССМ с мягкоматричным ПМП имеет значительно лучшую чувствительность по магнитному полю и не перемагничивает исследуемые магнитные пленки.

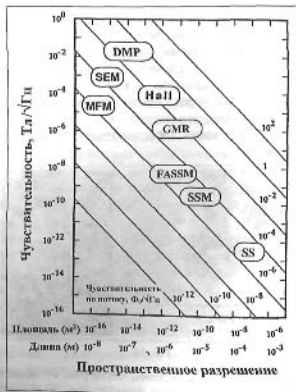


Рис. 14

### 3. Биоманнитные измерения

В биоманнитных исследованиях преимущества СКВИД систем проявляются наиболее полно, так как при этом возможен только метод пассивного детектирования с чувствительностью, определяемой собственными шумами датчиков. Для локализации и характеристики источников магнитных полей в биоманнитных исследованиях требуется сочетание предельно возможных полевой чувствительности и пространственного разрешения измерительных систем, возможно только при использовании СКВИД. Пространственное разрешение СКВИД магнетометров определяется достаточно малым размером приемной петли сверхпроводящего трансформатора потока, что позволяет их использование для большинства биоманнитных исследований.

Магнитокардиография (МКГ) обеспечивает более полную по сравнению с электрокардиографией (ЭКГ) информацию о состоянии сердца человека [38], однако накладывает строгие требования на чувствительность и частотный диапазон измерительной системы. Для получения информации, имеющей медицинскую ценность, частотный диапазон составляет 0,1...300 Гц. Хотя исследуемые МКГ-сигналы имеют амплитуду  $> 1$  нТл, чувствительность датчиков необходимо обеспечить на уровне  $\sim 10$  фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах порядка 10 Гц. Более того, для получения сигнала МКГ, сравнимого по отношению сигнал-шум с сигналом ЭКГ высокого разрешения, необходимо иметь чувствительность магнитометра на уровне  $\sim 5$  фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Данное разрешение может быть обеспечено с помощью разработанных в Юдихе 16-ти миллиметровых ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнитометров при рабочей температуре 77 К.

Для магнитоэнцефалографии (МЭГ) чувствительность измерительной системы по магнитному полю должна быть также лучше 10 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Коммерчески доступные СКВИД системы на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) имеют типичное разрешение  $\sim 5$  фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  при рисовой петле 20×20 мм. Одним из вариантов развития данных систем при условии сохранения их чувствительности является переход на высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше температуры кипения жидкого азота 77 К. На ВТСП системах такие параметры уже рассмотрены.

**Измерительная система для магнитокардиографии.** В качестве первой демонстрации использования ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнетометров в биоманнитных исследованиях была разработана и опробована система измерений для магнитокардиографии (МКГ) [39, 51]. Данная часть работы была выполнена в рамках соглашения о сотрудничестве между Институтом радиотехники и электроники РАН и Институтом твердотельных исследований Исследовательского центра Юлиус (Германия) о разработках ВТСП СКВИД систем.

Измерения магнитокардиограмм были проведены в магнитно-экранированной комнате (МЭК) клиники «Franz-Volhard» (г. Берлин). При закрытой двери в данной МЭК был измерен коэффициент экранирования  $\sim 10$  на частоте менее 0,1 Гц и более 10000 на частотах выше 50 Гц. В дневное время суток внутри МЭК наблюдался низкочастотный ( $\tau \sim 10$  с) дрейф магнитного поля на уровне до  $\sim 5$  нТл, частично связанный с движением автотранспорта и лифта. Активная система подавления низкочастотных шумов не использовалась. Амплитуда паразитного магнитного сигнала частотой 50 Гц составляла в МЭК менее 10 нТл.

С учетом данной магнитной обстановки в МЭК в качестве чувствительных элементов МКГ системы были выбраны ВТСП ПТ-СКВИД флип-чип магнитометры с приемной катушкой трансформаторов потока размером 16×16 мм, обеспечивающие разрешение  $\sim 6$  фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  при 77,4 К [39]. На рис. 15,а представлен внешний вид измерительной системы. Двухканальная электроника НПО «КРИОТОН» была использована для одновременной работы пары магнитометров, расположенных в криостате так, как схематично представлено на рис. 15,б (один из магнитометров представлена на вставке). Вычет сигнала верхнего магнитометра из сигнала нижнего магнитометра приводит к образованию электронного градиометра первого порядка. База градиометра определяется расстоянием между трансформаторами потока магнитометров, расположенных параллельно друг другу на оси стеклопластиковой трубки, и составляла  $\sim 10$  см. Для охлаждения магнитометров был использован криостат фирмы «КРИОТОН», вмещающий  $\sim 1,5$  литра жидкого азота. Время полного испарения азота около 10 дней при установленной вставке с магнитометрами. Расстояние между холодной и теплой стенками криостата  $\sim 10$  мм, а расстояние от теплой стенки до плоскости трансформатора потока нижнего магнитометра  $\sim 15$  мм.

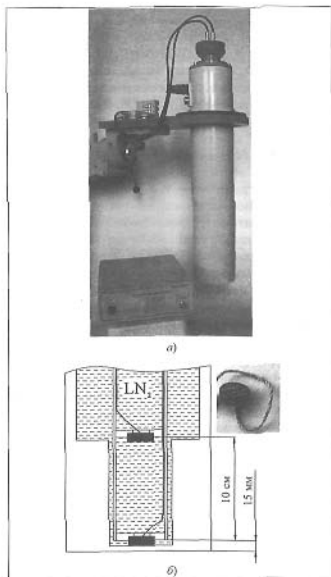


Рис. 15

Спектральные плотности шумов магнитометров и разностного сигнала, измеренные в МЭК, представлены на рис. 16 (кривые 1, 2). Кривая 3 представляет спектральную плотность шумов одного из магнитометров в сверхпроводящем экране и приведена здесь для сравнения. В сверхпроводящем экране оба магнитометра имеют разрешение лучше  $\sim 10 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах выше  $\sim 10 \text{ Гц}$ . На частоте 1 Гц собственные шумы магнитометров увеличиваются до  $\sim 20 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Наблюдаемый в камере дрейф магнитного поля отражается увеличением спектральной плотности сигнала магнитометров на частотах ниже 10 Гц. Магнитные сигналы в камере в диапазоне частот от 10 до 30 Гц главным образом обусловлены вибрациями здания.

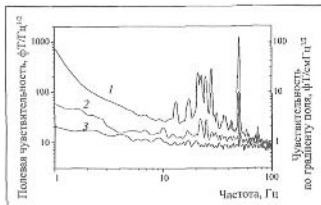


Рис. 16

Вычитание сигнала референсного магнитометра позволило устранить большую часть низко-частотных шумов, вибрационных эффектов и паразитной 50 Гц интерференции. Спектральная плотность разностного сигнала представлена на рис. 16 в единицах  $[\text{фТл}/\text{см}\sqrt{\text{Гц}}]$  с учетом базы  $\sim 10 \text{ см}$  электронного градиометра. В результате получено разрешение по градиенту лучше  $\sim 1 \text{ фТл}/\text{см}\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах выше 100 Гц и лучше  $2 \text{ фТл}/\text{см}\sqrt{\text{Гц}}$  на частотах выше 4 Гц. Паразитный сигнал интерференции частотой 50 Гц с гармониками во время измерений не отфильтровался. Значительного уменьшения низкочастотных ( $\sim 1 \text{ Гц}$ ) шумов можно ожидать при использовании системы активного шумоподавления.

Для рутинных клинических применений необходимо обеспечить достаточную чувствительность МКГ системы чтобы обследовать в том числе и пациентов со сравнительно слабым сердцем, имеющим амплитуду магнитного сигнала менее 30 пТл. Поэтому были проведены измерения с помощью ВТСП системы главным образом на пациентах и добровольцах с максимальной амплитудой магнитного сигнала QRS комплекса  $\sim 30 \text{ пТл}$ . Результаты измерений контролировались с помощью градиометрической НТСН МКГ-системы второго порядка.

Сигналы обоих магнитометров измерялись одновременно с записью и обработкой разностного сигнала. Измеренный в данной МЭК магнитометрический сигнал имеет весьма ограниченную медицинскую значимость. Из-за сильного низкочастотного дрейфа магнитного поля в МЭК для регистрации представленного на рис. 17 МКГ-сигнала нижнего магнитометра необходимо было использовать фильтр верхних частот с частотой среза  $\sim 1 \text{ Гц}$ , что частично деформировало полезный сигнал. Суммарная амплитуда сигнала интер-

ференции 50 Гц и сигнала, связанного с вибрациями,  $\sim 7$  пТл. Эта величина составляет около четверти МКГ-сигнала магнитометра, дополнительно сильно затрудняя интерпретацию усредненного сигнала. По этой причине только разностный сигнал, полученный в полосе частот 0,03...125 Гц, использовался для дальнейших исследований. Неусредненный МКГ-сигнал электронного градиометра представлен на рис. 17. Измерения проводились в полосе частот 0,03...125 Гц, которая покрывает наиболее значимый для МКГ диапазон частот сигнала сердца.

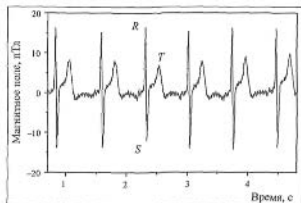


Рис. 17

Некомпенсированная часть магнитной наводки 50 Гц со всеми гармониками были подавлены адаптивным синхронным фильтром сетевой частоты. Наблюдаемая ширина шумовой дорожки (рис. 17) составляла  $\sim 500$  фТл, что соответствовало эффективному разрешению  $S_{eff}^{1/2} \sim 0,7 \cdot 500 / (2\Delta f)^{1/2} \sim \sim 17$  фТл  $\sqrt{\text{Гц}}$  в исследованном частотном диапазоне.

Стабильность системы оказалась достаточной для проведения 2D-картографирования МКГ сигнала по стандартной методике [40]. Для этого были проведены измерения в 36 узлах прямоугольной сетки  $6 \times 6$  с расстоянием между узлами  $\sim 4$  см в обоих направлениях (рис. 18). Таким образом, площадь сканирования составляет  $20 \times 20$  см. В каждой точке проводилось усреднение МКГ-сигнала в течение  $\sim 30$  с; R-пики одновременно с МКГ измеримой электрокардиограммы (ЭКГ) служили триггером при усреднении МКГ сигналов.

Суммарное время измерений по всем точкам составляло около 30 мин. Магнитометры демонстрировали стабильную работу и отсутствие изменений в шумовых характеристиках в течение всего времени измерений. Это позволило получить с хорошим разрешением и воспроизводимостью 2D-распределение магнитного поля сердца (рис. 19, где а - R-, б - S-, в - T-пики). Представленные на

рис. 19 эквидивизионные карты 2D-распределения магнитного поля были получены на основе приведенные на рис. 19 результатов измерений с использованием интерполяции значений магнитного поля методом минимальной кривизны поверхности. Обнаружено, что измеренный с помощью электронного ВТСП градиометра первого порядка МКГ-сигнал слабее спадает к периферии области сканирования по сравнению с соответствующими данными, полученными с помощью НТСП градиометрической системы второго порядка [40].

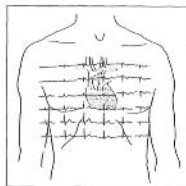


Рис. 18

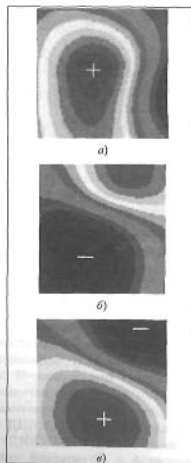


Рис. 19

**Измерительная система для магнитоэнцефалографии.** Магнитоэнцефалография (МЭГ) является неинвазивным методом, который дополняет другие функциональные методы визуализации деятельности головного мозга и несёт ценную информацию о динамике нейронной активности живого мозга человека с превосходным (порядка миллисекунды) временным разрешением. Некоторые из магнитных полей, которые были измерены с помощью МЭГ, вызваны активностью коры головного мозга и имеют характерные амплитуды в диапазоне нескольких сотен фемтотесла. Магнитоэнцефалография является методом, дополняющим электроэнцефалографию в том смысле, что обе технологии имеют разную чувствительность к различной ориентации нейронных токов.

Чувствительными элементами МЭГ систем в настоящее время служат НТСП СКВИД, охлаждаемые жидким гелием. Однако высокая стоимость жидкого гелия и неудобства его использования для охлаждения датчиков представляют собой препятствия, мешающие более широкому использованию МЭГ системы в клинической практике. Кроме того, в соответствии с американским законодательным актом («Helium Privatization Act of 1996») запасы гелия в национальных подземных хранилищах Cliffside (Amarillo, Texas, USA), составляющие половину мировых запасов гелия, стремительно сокращаются, и ожидается резкий рост его цены после 2015 г. [41, 42]. Эти проблемы указывают на необходимость разработки датчиков магнитного поля, которые представляли бы собой альтернативу охлаждаемым гелием НТСП СКВИД в системах регистрации МЭГ.

Датчики для применения в МЭГ должны иметь разрешение по магнитному полю не хуже  $10 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и размер приемной катушки менее 20 мм. Однослойные ВТСП-СКВИД [43, 44] с собственными шумами, значительно превышающими  $10 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при 77,5 К, были ранее испытаны для записи сигналов МЭГ. Как отмечалось в [44], для достижения отношения сигнал-шум около 3 оказалось необходимым проведение около 2000 усреднений сигнала МЭГ, вызванного периодическими звуковыми импульсами. В результате время измерения МЭГ с такими датчиками получило неприемлемо долгим для практики.

На многослойных ВТСП СКВИД магнитометрах постоянного тока (ПТ-СКВИД) с 16-мм приемной катушкой и 12-витковой входной катушкой тонкопленочного ВТСП трансформатора

потока было продемонстрировано разрешение по магнитному полю около  $4 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$  при 77 К [45]. Такие датчики в принципе могли бы послужить заменой НТСП СКВИД в измерительных системах для МЭГ. Такая замена позволила бы сделать МЭГ системы независимыми от поставок гелия, удобнее для пользователей и сэкономить около 100 000 евро в год на эксплуатационных расходах каждой системы. В этом разделе описывается тестирование многослойных ВТСП СКВИД магнитометров для МЭГ при непосредственном сравнении с измерениями, проведенными с использованием коммерческой МЭГ системы на НТСП СКВИД [46].

Изготовленные согласно приведенному в [4] описанию 16-ти миллиметровые ВТСП СКВИД магнитометры были расположены на вставке в полуторалитровом азотном стеклопластиковом криостате производства НПО «КРИОТОН». Для измерений использовались ВТСП и НТСП системы с разрешением по магнитному полю около  $5 \text{ фТ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и рабочими температурами, соответственно, 77 К и 4,2 К. Работа ВТСП СКВИД обеспечивалась СКВИД электропиткой с переменным током смещения (НПО «КРИОТОН»), что позволило уменьшить в 3 раза низкочастотные шумы, вызванные флуктуациями критического тока джозефсоновских переходов. Спектральная плотность собственных шумов ВТСП системы, измеренная с ВТСП СКВИД, помещенным в ВТСП экран, представлена на рис. 20,а. Расстояние между приемной катушкой сигнального магнитометра и дном криостата составляла около 19 мм для НТСП системы и около 15 мм для ВТСП системы. Измерения были проведены в магнитно-экранированной комнате с использованием одноканальной ВТСП системы и коммерческой 248-канальной МЭГ-системы «Magnes<sup>o</sup> 3600 WH» фирмы 4D-Neuroimaging. Аналоговый выход ВТСП системы был присоединен ко входу 16-битного цифрового преобразователя, имеющегося на НТСП системе, и обрабатывался аналогично сигналу НТСП СКВИД.

Сначала были проведены измерения с макетом головы, содержащем калибровочные токовые диполи в солевом растворе. Фотография, снятая в процессе измерения ВТСП системой на макете и с НТСП системой на заднем плане, представлена на рис. 20,б.

На рис. 21 приведены результаты измерений магнитного поля от заполненного солевым раствором макета головы, полученные с помощью: а – НТСП СКВИД и б – ВТСП СКВИД.



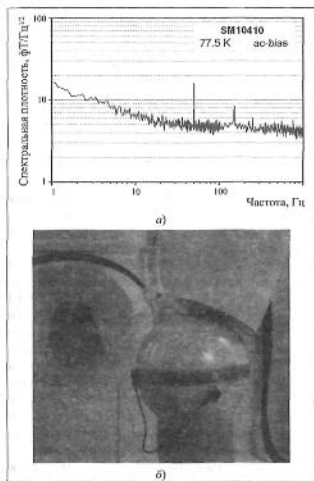


Рис. 20

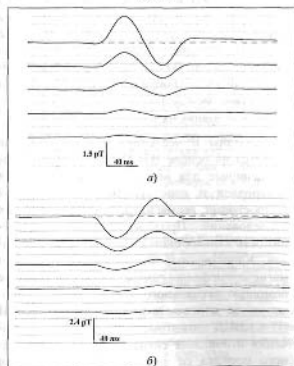


Рис. 21

Представленные на рисунке графики измерений были выполнены с амплитудами возбуждения токового диполя, уменьшенными в 2 раза для каждой последующей записи. Для НТСП системы пиковые значения амплитуды магнитного поля составляли, соответственно, 3,2  $\mu\text{T}$ ; 1,6  $\mu\text{T}$ ; 800 фТ, 400 фТ и 200 фТ. Для получения сравнимых результатов компенсация шумов для обеих систем не производилась. Данные, полученные с помощью как НТСП, так и ВТСП систем, чисто магнетометрические и были результатом усреднения по 100 измерениям и отфильтрованы полосовым фильтром в диапазоне частот от 3 до 30 Гц.

Фотография, снятая во время измерения МЭГ с помощью ВТСП системы, представлена на рис. 22,а, а на рис. 22,б показано сравнение данных, полученных в один день с использованием ВТСП (две верхние кривые) и НТСП (две нижние кривые) систем в двух точках, расположенных на расстоянии несколько сантиметров друг от друга. Все данные были получены с частотой и полосой считывания 678 Гц и 200 Гц соответственно и усреднены по 300 сигналам.

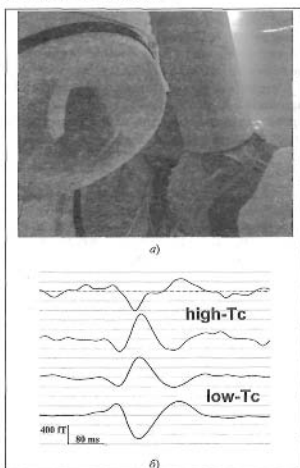


Рис. 22

Графики измерения, представленные на рис. 21 и 22, демонстрируют достаточную чувствительность 16-миллиметровых ВТСП СКВИД магнитометров, работающих при 77 К, для МЭГ измерений с относительно небольшим количеством усреднений и коротким временем считывания. Несмотря на то, что эти ВТСП магнитометры по размеру значительно меньше 21-миллиметровых магнитометров коммерческой системы для МЭГ фирмы Etekta Neutomag<sup>®</sup>, они показали аналогичную чувствительность по магнитному полю [45]. Использование меньшего числа радиационных экранов в азотном криостате привело к меньшим магнитным шумам, которые часто превосходят собственные шумы НТСП СКВИД [47]. Тепловые магнитные шумы магнитоэкранированной комнаты [47] также могут увеличивать шумы измерительной системы, уменьшая, таким образом, разницу между разрешением по магнитному полю двух систем. Более тонкая теплоизоляция азотного криостата позволяет расположить датчики более близко к объекту, что также способствует увеличению отношения сигнал-шум данных, полученных с помощью ВТСП МЭГ системы. Тем не менее желательнее дальнейшее улучшение чувствительности ВТСП СКВИД при условии сохранения их пространственного разрешения и малого взаимовлияния датчиков во многоканальных системах.

Разрешение по магнитному полю индуктивно связанного с многооборотной входной катушкой сверхпроводящего трансформатора потока может быть оценено по формуле:

$$B_N = \frac{L_{in} + L_i}{kA_{in} \sqrt{L_i L_S}} S_{\Phi}^{1/2}, \quad (5)$$

где  $A_{in}$  и  $L_{in}$  – площадь и индуктивность приемной петли трансформатора потока;  $k$  – коэффициент связи между СКВИД и входной катушкой трансформатора потока;  $S_{\Phi}$  – белый шум по потоку, который определяется главным образом тепловыми флуктуациями в джозефсоновских переходах, максимальным откликом по напряжению на магнитный поток  $|\partial V / \partial \Phi|$  и шумом предусилителя  $S_{Vc} \approx (0,2 \text{ нВ})^2$ :

$$S_{\Phi} = S_V / \left( \frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2 \approx \left[ \frac{12k_B T}{R_N} \left[ \frac{R_N^2}{2} + \frac{L_S^2}{4} \left( \frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2 \right] + S_{Vc} \right] / \left( \frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2, \quad (6)$$

где  $R_N$  – нормальное сопротивление джозефсоновских переходов;  $k_B$  – постоянная Больцмана.

В принципе, уровень белого шума ВТСП СКВИД может быть уменьшен, например, с использованием последовательных цепочек СКВИД, в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  – число СКВИД в цепочке. При достаточно больших  $N$  и достаточно большой приемной петле разрешение ВТСП СКВИД магнитометров может достигнуть значений меньше  $1 \text{ фТ} / \sqrt{\text{Гц}}$  при 77,5 К. По нашим оценкам согласно уравнениям (5) и (6) разрешение  $1 \text{ фТ} / \sqrt{\text{Гц}}$  при 77,5 К может быть получено при последовательном соединении двух СКВИД ( $N=2$ ) диаметром приемной петли многовиткового трансформатора потока 30 мм и индуктивностью петли СКВИД от 40 нГн до 80 нГн.

Последовательное соединение двух ПТ-СКВИД в комбинации двойного СКВИД представляет собой первый шаг к применению ВТСП ПТ-СКВИД цепочек [48]. При тестировании схемы двойного СКВИД наблюдалось удвоение модуляционного сигнала СКВИД и уменьшение шумов по сравнению с характеристиками единичного СКВИД при аналогичных размерах СКВИД и параметрах джозефсоновских переходов. Две петли двойного СКВИД могут быть индуктивно связаны с многослойными приемными катушками трансформатора потока для обеспечения улучшенной чувствительности датчика к магнитному полю [4]. Ожидается, что применение сигнала модуляции непосредственно к взаимосвязанной петле двойного СКВИД уменьшит связь между датчиками в сравнении со случаем приложения сигнала к приемной петле СКВИД магнитометров. Дальнейшие эксперименты с многоканальными ВТСП МЭГ системами требуются для того чтобы определить насколько мало взаимодействие между ВТСП ПТ-СКВИД магнитометрами в условиях их близкого расположения.

● Разработаны и исследованы измерительные системы на основе ВТСП ПТ-СКВИД, предназначенные для неразрушающего контроля материалов и конструкций, для магнитной микроскопии, геомагнитных и биомгнитных исследований. Продемонстрирована применимость данных систем для поставленных задач. Качественные магнетоквардиограммы и магнитоэнцефалограммы были получены с помощью аксиального электроинного градиометра на основе 16-миллиметровых ВТСП ПТ-СКВИД магнитометров. Полученные значения отношения сигнал-шум оказались одного порядка со значениями, получаемыми при помощи низкотемпературных систем.

Это открывает возможность повышения рабочей температуры до 77 К для данных измерительных СКВИД систем широкого применения.

## Литература

1. Clarke J. SQUIDS for everything // *Nature Materials*. 2011. V. 10. P. 262–263.
2. Fagaly R.L. Superconducting quantum interference device instruments and applications // *Rev. Sci. Instr.* 2006. V. 77. 101101(45).
3. Faley M.L., Poppe U., Urban K., Paulson D.N., Starr T., & Fagaly R.L. Low noise HTS dc-SQUID chip magnetometers and gradiometers // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2001. V. 11. № 1. P. 1383–1386.
4. Фалей М.И. Магнитометры и градиометры на основе гетероструктур оксидных сверхпроводников // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50. № 3. С. 1–8.
5. Faley M.L., Poppe U., Urban K., Zimmermann E., Glaas W., Halling H., Biek M., Paulson D.N., Starr T., and Fagaly R.L. Operation of the HTS dc-SQUID Sensors in High Magnetic Fields // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 1999. V. 9. № 2. P. 3386–3391.
6. [http://www.tristatech.com/prod\\_geomagnetic.html](http://www.tristatech.com/prod_geomagnetic.html)
7. Krause H.-J., Wolf W., Glaas W., Zimmermann E., Faley M.L., Sawade G., Matheus R., Neundorfer G., Gompertz U., Krieger J. SQUID Array For Magnetic Inspection of Prestressed Concrete Bridges // *Physica C: Superconductivity*. 2002. V. 368. № 1–4. P. 91–95.
8. Krause H.-J., Zhang Y., Hohmann R., Grünekle M., Faley M.L., Komarski D., Maus M., Bousack H., Braginiski A.I. Eddy Current Aircraft Testing with Mobile HTS-SQUID Gradiometer System // *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1997. № 158. P. 775.
9. Valentino M., Ruosi A., Peluso G., & Pepe G.P. Structural health monitoring of materials by high critical temperature SQUID // *Physica C*. 2002. V. 372–376. № 1. P. 201–208.
10. Doibo M., Shikoda A., & Yashizawa M. Non-contact evaluation of semiconductors using a laser SQUID microscope // *Physica C*. 2002. V. 372–376. № 1. P. 263–266.
11. Doibo M., & Kamimura D. Examination of relationship between resistivity and photocurrent induced magnetic field in silicon wafers using laser SQUID // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2005. V. 15. № 2. P. 684–687.
12. Watanabe T., Watanabe S., Iwata T., Kase M., Sasaki Y., Kawaguchi T., & Katayama T. A prototype of a highly sensitive cryogenic current comparator with a HTS SQUID and HTS magnetic shield // *Supercond. Sci. Technol.* 2004. V. 17. P. S450–S455.
13. Watanabe T., Fukumishi N., Sasaki Y., Kase M., Goto A., & Kamigaito O. Development of beam current monitor with high-Te SQUID at RIBF // *Proc. of Beam Instrumentation Workshop (BIW10)*, La Fonda on the Plaza Santa Fe. New Mexico, USA. May 2–6. 2010. Invited talk. 10 pages.
14. Faley M.L., Poppe U., Slobodchikov V.Ya., Martlemkov Yu.V., and Urban K. HTS dc-SQUID planar Gradiometer Measurement System for routine Inspections // *Superconductor Science and Technology*. 2004. V. 17. P. S301–S304.
15. Koch R.H., Foglietti V., Rosen J.R., Stawitz G.G., Ketchen M.B., Lathrop D.K., Sun J.Z., and Gallagher W.J. Effects of radio frequency radiation on the dc SQUID // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65. № 1. P. 100–102.
16. Varpala T. and Poutanen T. Magnetic field fluctuations arising from thermal motion of electric charge in conductors // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 55. № 11. P. 4015–4021.
17. Kasai N., Sasaki K., Kiryu S., and Suzuki Y. Thermal magnetic noise of dewars for biomagnetic measurements // *Cryogenics*. 1993. V. 33. P. 175–179.
18. Zimmerman J.E. and Mercereau J.E. Quantized Flux Pinning in Superconducting Niobium // *Phys. Rev. Lett.* 1964. V. 13. № 4. P. 125–126.
19. Сидярев О.В. Сверхчувствительный СКВИД-магнитометрия // *Успехи физических наук*. 1999. Т. 169. № 2. С. 221–223.
20. Tsai C.C., Kirtley J.R., Chi C.C., Yu-Jahnes L.S., Gupta A., Shaw T., Sun J.Z., and Ketchen M.B. Pairing Symmetry and Flux Quantization in a Tri-crystal Superconducting Ring of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. № 4. P. 593–596.
21. Kirtley J.R., Tsai C.C., Sun J.Z., Chi C.C., Yu-Jahnes L.S., Gupta A., Rupp M., Ketchen M.B. Symmetry of the order parameter in the high-Te superconductor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> // *Nature*. 1995. V. 373. № 6511. P. 225–228.
22. Snigirev O.V., Andreev K.E., Tishin A.M., Gudoshnikov S.A., and Bohr J. Magnetic properties of thin Ni films measured by a dc SQUID-based magnetic microscope // *Phys. Rev. B*. 1997. V. 55. № 21. P. 14429–14433.
23. Сидярев О.В., Тшин А.М., Гудошников С.А., Андреев К.Е. и Бор Я. Магнитные свойства ультратонких пленок Ni // *Физика твердого тела*. 1998. Т. 40. № 9. С. 1681–1685.
24. Kirtley J.R. SQUID microscopy for fundamental studies // *Physica C*. 2002. V. 368. P. 55–65.
25. Fleet E.F., Chatriphorn S., Wellstood F.C., Knauis L.A., Green S.M. Closed-cycle refrigerator-cooled scanning SQUID microscope for room-temperature samples // *Review of Scientific Instruments*. 2001. V. 72. № 8. P. 3281–3290.
26. Bondarenko S.I. Ferromagnetic fluxgate for measurement of weak magnetic field structure with use of HTSC-SQUID // *Proc. of ICEC 16/ICMC*. 1996. Part 2. P. 1177–1180.
27. Bondarenko S.I., Shablo A.A. High-Te SQUIDS with a ferromagnetic antenna for a magnetic microscope // *Non-linear electromagnetic systems*. V. Kose, J. Sievert editors. Amsterdam: IOS Press. 1998. P. 91–104.
28. Pitzius F., Dvorak F., Hartmann U. Ultra-high Resolution Scanning SQUID Microscope. Extended Abstract of the 6th Int. Supercond. Electr. Conf., ISEC'97. Berlin, Germany. 1997. P. 395–398.
29. Gudoshnikov S.A., Lisbinov B.Ya., Matveets L.V., Mikhailenko A.P., Deryuzhkin Yu.V., Simov Yu.S., Snigirev O.P. Flux guide for high-Te SQUID microscope with high spatial resolution // *Physica C*. 2002. V. 368. P. 66–69.
30. Gudoshnikov S.A., Lisbinov B.Ya., Matveets L.V., Snigirev O.P., Maresov A.G., Prokoshin A.F., Borisov Y.T., Usov N.A. Study of amorphous ferromagnetic microwires using a scanning SQUID microscope // *Physica C*. 2002. V. 376. P. 271–276.
31. Poppe U., Faley M. I., Bruning I., Speen R., Urban K., Zimmermann E., Glaas W., and Halling H. HTS dc-SQUID Microscope with soft-magnetic Flux Guide // *Superconductor Science and Technology*. 2004. V. 17. P. S191–S195.
32. Faley M.L., Prant K., Reinsman R., Schurig D., Golt S., Sawinski R.E., Paulson D.N., Starr T.N., and Fagaly R.L. HTS

- de-SQUID Micro-Susceptometer for Room Temperature Objects // *Superconductor Science and Technology*. 2004. V. 17. P. S324-S327.
33. Jungbluth B. Simulationen und Experimente zur Optimierung eines hochpermeablen Magnetfeldleiters für den Einsatz in einem SQUID-Mikroskop // *Diplomarbeit in Physik*. Jülich. 2000.
  34. Roosenboom P., Bloemen P.J.H., Klaassens W., van de Riet E.G.J., and Donkers J.J.T.M. Soft-magnetic fluxguide materials // *Philips J. Res.* 1998. V. 51. № 1. P. 59-91.
  35. Vitale S., Prodi G.A., Cerdonio M. Thermal magnetic noise in rf SQUIDs coupled to ferromagnetic cores // *J. Appl. Phys.* 1989. V. 65. № 5. P. 2130-2136.
  36. Chutrophorn S., Fleet E.F., and Wellstood P.C. Relationship between spatial resolution and noise in scanning superconducting quantum interference device microscopy // *Journal of Applied Physics*. 2002. V. 92. № 8. P. 4731-4740.
  37. Vu L.N. and Van Hartlingen D.J. Design and implementation of a scanning SQUID microscope // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 1993. V. 3. № 1. P. 1918-1921.
  38. Lant J., Srobnik G., ten Voorde B., Horacek M., Montague T.J. Complementary nature of electrocardiographic and magnetocardiographic data in patients with ischemic heart disease // *Journal of Electrocardiology*. 1990. V. 23. № 4. P. 315-322.
  39. Faley M.I., Poppe U., Urban K., Slobodchikov V.Yu., Maslennikov Yu.V., Gapeplyuk A., Savitski B., and Schindkewan A. Operation of high-temperature superconductor magnetometer with submicrometer bicrystal junctions // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. № 13. P. 2406-2408.
  40. Gapeplyuk A., Copetti C.A., Schindkewan A., Schüt H., Wredemann M., Meyersfeldt U., Primin M.A., Maslennikov Yu.V. Invasive evaluation of MCG-localization results: importance of measured electrophysiological time intervals // *Biomag 96: Proceedings of the Tenth International Conference on Biomagnetism*. C.J. Alice, Y. Okada, G. Srobnik, S.J. Switcheby, C.C. Wood (eds.). New York: Springer-Verlag. 2000. V. 2. P. 464-466.
  41. *Witchalls C.* One minute with... Robert Richardson. *The New Scientist*, 2010; 207, issue 2773, 14 August. Page 29.
  42. *Witchalls C.* Nobel prizewinner: We are tuning out of helium. *New Scientist*. 18 August 2010.
  43. Zhang Y., Tavrin Y., Mück M., Bragin A.I., Heiden C., Hampson S. et al. Magnetoencephalography Using High Temperature rf SQUIDs. *Brain Topography*. 1993. No5(4). P. 379-382.
  44. Barthelmess H., Holterscheid M., Schiefelhävel B., Hein E., Schilling M., Zimmerman R. HTS-Multichannel-System for Magnetocardiography and Magnetoencephalography // *BIOMAG 2000 Conference* 2001. P. 927-930.
  45. Faley M.I., Jia C.L., Poppe U., Houben L., and Urban K. Meandering of the grain boundary and  $\delta$ -wave effects in high-Tc bicrystal Josephson junctions // *Superconductor Science and Technology*. 2006. V. 19. P. S195-S199.
  46. Faley M.I., Poppe U., Danin-Borkovski R.E., Schiek M., Boers F., H. Chocholac, Dammert J., Eich E., Shoh N.J., Ermakov A.B., Slobodchikov V.Yu., Maslennikov Yu.V., and Koshelets V.P. Magnetoencephalography using a multilayer high-Tc DC SQUID magnetometer // *Physics Procedia*. 2011. V. 27.
  47. Neunen J., Montonen J., and Kotila T. Thermal noise in biomagnetic measurements // *Rev.Sci.Instrum.* 1996. V. 67(6). P. 2397-2405.
  48. Chen K.L., Yang H.C., Ko P.C., Horng H.E. Characterization of dual high transition temperature superconducting quantum interference device first-order planar gradiometers on a chip // *J Appl Phys*. 2010. V. 108. No.064503(4).
  49. Faley M.I. Epitaxial oxide heterostructures for ultimate high-Tc quantum interferometers. Chapter in book «Applications of High-Tc Superconductivity». ISBN 978-953-307-308-8. Edited by Adir Luiz. InTech. Rijeka, Croatia. 2011. P. 147-176.
  50. Фалей М.И., Маслеников Ю.В. Сверхпроводниковая измерительная система для обнаружения магнитных примесей в конструкционных материалах // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50. №6. С. 759-765.
  51. Фалей М.И., Маслеников Ю.В. Чувствительная магнитокардиографическая измерительная система с рабочей температурой 77 К // *Биомедицинские технологии и радиотехника*. 2004. № 8-9. С. 82-87.

Поступила 10 июля 2012 г.

## Measuring systems based on HTc SQUIDS

© Authors, 2012

M.I. Faley, Y.V. Maslennikov, V.P. Koshelets

Measuring systems based on superconducting quantum interferometers (SQUIDS) for nondestructive testing of materials, magnetic microscopy and biomagnetic research were developed. The use of SQUID based on films of high temperature superconductors (HTc SQUID) made it possible to increase the sensitivity while maintaining their operating temperatures from 4,2 K to 77,4 K and a more subtle and less noisy insulation. System for nondestructive testing of materials with thin-film SQUID gradiometer operated stably in the magnetically unshielded space with sensitivity of about 15 fT/cm<sup>2</sup>Hz, which was sufficient for detection of magnetic particles measuring about 10 μm at a distance of about 15 mm. Magnetic microscope based on autonomous HTc SQUID with a ferromagnetic antenna has shown the magnetic field sensitivity of about 1 nT/√Hz and a spatial resolution of about 1 micron. System for biomagnetic measurements demonstrated sufficient sensitivity for application in magnetocardiography and magnetoencephalography.