

СКАНИРУЮЩАЯ МАГНИТОМЕТРИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КВАНТОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© 2001 г. С. А. Гудошников, Л. В. Матвеев, В. В. Мигулин,
О. В. Снигирев, А. М. Тишин

Поступила в редакцию 01.02.2001 г.

Представлен обзор методов и устройств на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (сквидов), предназначенных для измерения и визуализации магнитных полей рассеяния вблизи поверхности слабомagnetных физических объектов. Описаны принципы работы, конструктивные особенности и основные характеристики сканирующих сквид-магнитометров, рассмотрены их возможности для фундаментальных и практических применений. Проведено сравнение характеристик различных типов магнитных микроскопов.

ВВЕДЕНИЕ

В магнитометрии высокого разрешения входят приборы и методы исследований, позволяющие получать изображения распределения магнитного поля над поверхностью исследуемого объекта с пространственным разрешением от десятых долей микрометров до единиц миллиметров. Диапазон регистрируемых магнитных полей варьируется от нескольких тесла до долей пикотесла. Наряду с хорошо известными методами визуализации магнитных полей, с такими как магнитооптика и декорирование магнитными частицами (см., например, [1, 2]) в последнее десятилетие появились сканирующие магнитные микроскопы: магнитный силовой микроскоп [3–5] и микроскоп на основе микродатчиков Холла [6, 7].

В первой половине 90-х годов разработаны и реализованы сканирующие магнитометры, в которых в качестве чувствительного элемента используют сквиды (от англ. SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) [8–17]. Сквид является преобразователем действующего магнитного потока Φ , пронизывающего его кольцо, в напряжение. Типичное значение минимального регистрируемого потока составляет $10^{-5} \Phi_0 \Gamma^{1/2}$, где Φ_0 – квант магнитного потока, равный $2 \cdot 10^{-15}$ Вб. Даже при малых значениях эффективной площади сквида A , например 20 мкм², его чувствительность по магнитному полю $B_z = \Phi_0/A$ чрезвычайно высока и составляет 10^{-9} Тл.

В сканирующих магнитометрах на основе сквида, названных сканирующими сквид-микроскопами (ССМ), образец перемещается в плоскости X – Y относительно сквида, при этом сквид измеряет нормальную к поверхности образца компоненту магнитного поля B_z . Во время сканирования выходной сигнал сквида регистрируется в зависи-

мости от текущих координат и преобразуется при помощи компьютера в двумерное или трехмерное изображение распределения магнитного поля. Чувствительность по магнитному полю и пространственное разрешение ССМ являются взаимосвязанными и определяются размерами сквида и расстоянием h между сквидом и образцом. Оптимальное соотношение параметров достигается в том случае, когда образец находится от сквида на расстоянии, приблизительно равном линейному размеру петли сквида. ССМ могут работать в полях подмагничивания до 10^4 А/м, имеют широкий 0...200 кГц частотный диапазон. Специальные схемы регистрации сигналов сквида позволяют расширить частотный диапазон до десятков гигагерц.

Первый сканирующий сквид-микроскоп создан в начале 80-х годов в компании IBM (Thomas J. Watson Research Center). В то время фирма IBM поддерживала программу создания компьютера на основе сверхпроводящих джозефсоновских переходов. При работе над этой программой возникли затруднения, связанные с тем, что при охлаждении сверхпроводящих схем до температуры кипения жидкого гелия (4.2 К) наблюдали захват сверхпроводником магнитного потока, нарушающего работу джозефсоновских переходов. ССМ задуман и создан как диагностический инструмент, при помощи которого можно определить наличие магнитных вихрей. Получены линейные сканы индивидуальных вихрей магнитного потока, локализованных в отверстиях тонкой пленки индия, с отношением сигнал/шум, равным 5, и пространственным разрешением 500 мкм [8]. В 1984 г. разработка ССМ в компании IBM была приостановлена в связи с прекращением программы по созданию сверхпроводящего компьютера.

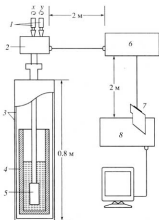


Рис. 1. Функциональная схема сканирующего сквид-микроскопа: 1 – шаговые двигатели; 2 – электроника сквида; 3 – магнитные экраны; 4 – криостат с жидким азотом; 5 – криосенная петля со сквидом, образцом и механизмом перемещения образца; 6 – блок электроники; 7 – АЦП; 8 – компьютер.

Дальнейшее развитие сканирующей сквид-магнитометрии в начале 90-х годов связано с успехами в технологии изготовления тонкопленочных сквидов. Появились низкотемпературные сверхпроводящие (НТСП) микросквиды с рабочей температурой порядка 4.2 К [14]. На основе микросквидов созданы ССМ, позволяющие получать магнитные изображения с пространственным разрешением в единицы микрометров. Эти ССМ использовали, в частности, для изучения вихревой структуры и динамики вихрей в сверхпроводящих решетках и кластерах при $T = 4.2$ К [15] и для выявления симметрии параметра порядка в высокотемпературных сверхпроводниках [16–18].

Открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости привело к созданию сквидов с рабочей температурой, равной температуре кипения жидкого азота: $T = 77$ К (ВТСП-сквиды). Первый ССМ на основе ВТСП-сквида [19], позволяющий получать изображения магнитных полей с пространственным разрешением порядка 50 мкм, появился в 1993 г. в США. Микроскоп использовали для регистрации магнитных полей рассеяния намагниченных образцов, визуализации вихревых токов проводящих объектов [20], получения

изображений распределения радиочастотных [21] и микроволновых [22] полей.

Сочетание высокой чувствительности с пространственным разрешением в единицы микрометров позволяет исследовать при помощи ССМ малоразмерные и слабомagneticные объекты. Достоинством ССМ является возможность проводить количественные измерения магнитных полей. В настоящее время эти устройства используются при исследовании магнитных свойств тонких сверхпроводящих и магнитных пленок, биологических объектов. Продемонстрированы их возможности в области неразрушающего контроля при поиске различных дефектов в материалах, металлических конструкциях и изделиях микроэлектроники.

В данной работе описаны принципы действия и конструктивные особенности наиболее важных узлов сканирующих сквид-микроскопов высокого разрешения. Рассмотрены их возможности для исследования объектов, находящихся при различных температурах. Проведено сравнение характеристик сканирующих сквид-микроскопов с магнитно-силовыми микроскопами и микроскопами на основе датчиков Холла.

1. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ССМ

Функциональная схема сквид-микроскопа для исследования охлаждаемых физических объектов приведена на рис. 1. Конструктивно ССМ состоит из нескольких основных узлов: сквид-датчика, сквид-электроники, криостата, системы магнитных экранов, механизма перемещения образца и персонального компьютера, обеспечивающего сбор данных и управление работой ССМ. Ниже рассмотрены требования к этим узлам и их основные особенности.

Сквиды, принципы работы. Сквид представляет собой сверхпроводниковый преобразователь воздействующего на него магнитного потока в напряжение [23]. Действие сквида основано на двух физических явлениях: эффекте Джозефсона и эффекте квантования магнитного потока. Конструктивно сквид представляет собой замкнутый сверхпроводящий контур, который содержит либо один (высокочастотный или ВЧ-сквид), либо два (сквид постоянного тока или ПТ-сквид) джозефсоновских переходов. В настоящее время наиболее распространены тонкопленочные ПТ-сквиды, поэтому только их и будем рассматривать в данной работе. Представим принципы действия на примере низкотемпературного ПТ-сквида с шунтированными туннельными джозефсоновскими переходами, эквивалентная схема которого приведена на рис. 2а.

Два перехода включены параллельно в сверхпроводящий контур с индуктивностью L . Каждый

из переходов зашунтирован резистором R для исключения гистерезиса на вольт-амперных характеристиках скивда. На рис. 2б приведены типичные вольт-амперные характеристики скивда для двух значений приложенного магнитного потока $\Phi_1 = n\Phi_0$ и $\Phi_2 = (n + 1/2)\Phi_0$, где $\Phi_0 = h/2e \approx \pm 2.07 \cdot 10^{-15}$ Вб – квант магнитного потока, n – целое число. При изменении потока Φ меняется как критический ток джозефсоновских переходов I_{cr} , так и положение гиперболических ветвей вольт-амперной характеристики. Это дает возможность регистрировать изменения магнитного потока $\Delta\Phi$ по изменению среднего напряжения на скивде при пропускании через него постоянного тока смещения $I_{cm} > I_{cr}$. Характерная осциллирующая зависимость напряжения на скивде от величины отношения Φ/Φ_0 при постоянном токе смещения, называемая его вольт-полевой характеристикой, $V(\Phi)$, приведена на рис. 2в. Как правило, рабочую точку скивда выбирают на крутой части вольт-полевой характеристики, где коэффициент преобразования $V_\Phi = (dV/d\Phi)$, максимален. В области низких частот чувствительность скивда характеризуется эквивалентным шумовым потоком Φ_Φ . Наилучшую чувствительность скинд имеет, если величина приведенной индуктивности $\beta_L = 2LI_{cr}/\Phi_0 = 1$. В этом случае оценка предельной спектральной плотности магнитного шумового потока приблизительно равна

$$S_\Phi = 18k_B T L^2 / R, \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – рабочая температура. При типичных значениях $L = 0.2$ нГ, $T = 4.2$ К и $R = 3$ Ом из (1) получим оценку среднеквадратичного значения шумового потока в единицах кванта магнитного потока $(S_\Phi)^{1/2} = 1.7$ мк $\Phi_0/\Gamma^{1/2}$, которая близка к уровню шумового потока в реальных НТСП-скивдах.

Современные низкотемпературные скинды постоянного тока представляют собой многослойные тонкопленочные структуры. Их изготавливают, применяя технологию фотолитографии и электронно-лучевой литографии. Наиболее распространены скинды из нобия с туннельными джозефсоновскими переходами: Nb/Al $_2$ O $_3$ /Nb, типичное устройство которых хорошо представлено в [15].

Современные ВТСП ПТ-скинды изготавливают в основном по однослойной технологии на основе пленок YBa $_2$ Cu $_3$ O $_{7-x}$. Пленку наносят на би-кристаллическую подложку из титаната стронция SrTiO $_3$, спаренную из двух кристаллов с различной ориентацией кристаллографических осей. Джозефсоновские переходы формируют на границе кристаллов в узких (1...5 мкм) сверхпроводящих мостиках, пересекающих сварной шов подложки [20]. В настоящее время ВТСП-скинды несколько уступают по чувствительности низкотемператур-

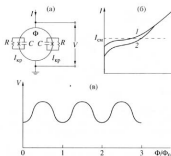


Рис. 2. Эквивалентная схема скивда постоянного тока (а); вольт-амперные характеристики скивда (б); зависимость напряжения скивда от величины отношения Φ/Φ_0 при постоянном токе смещения I_{cm} (в).

ным аналогам. Типичные значения шумового потока ВТСП-скивдов составляют 7...10 мк $\Phi_0/\Gamma^{1/2}$.

Скинды для сканирующих микроскопов имеют ряд конструктивных особенностей, связанных с требованием достижения наилучшего пространственного разрешения и хорошей чувствительности по магнитному полю. Контур скивда обычно выполняют в виде тонкого сверхпроводящего кольца, размер внутреннего отверстия которого выбирают равным минимальному расстоянию между образцом и скиндом [10–12]. Скинд формируют вблизи края подложки, а его контактные площадки удаляют к противоположному краю. По отношению к образцу подложку располагают в слабонаклонном положении так, чтобы скинд находился максимально близко к образцу [12, 13, 15, 19].

Скинд-электроника. Для регистрации сигналов скивда используют модуляционную потокозапирающую электронную схему [23], схематическое изображение которой приведено на рис. 3. На скинд I подают постоянный ток смещения I_{cm} , величина которого не намного превышает суммарный критический ток джозефсоновских контактов, а с генератора 6 в катушку 7 задают переменный ток с частотой f , лежащей обычно в пределах от 100 до 500 кГц. Создаваемый этой катушкой поток подмагничивания с амплитудой $\Phi_0/4$ и постоянный поток смещения Φ_{cm} , задающий положение рабочей точки, подводят к скинду. Возникающее при этом на скинде напряжение в силу периодичности его вольт-полевой характеристики содержит составляющие с частотой модуляционного сигнала и его второй гармоники. Скинд соединяют с предуслителем 3 через ох-

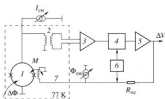


Рис. 3. Функциональная схема сквид-электроники: 1 – сквид; 2 – согласующий трансформатор; 3 – предварительный усилитель; 4 – синхронный детектор; 5 – интегратор; 6 – генератор; 7 – катушка обратной связи.

лаждаемый трансформатор 2. После предварительного усиления сигнал сквида регистрируют синхронным детектором 4 и подают на интегратор 5. Сглаженный сигнал выходного напряжения поступает на катушку 7 через последовательно включенный резистор обратной связи R_{oc} . Создаваемый катушкой магнитный поток воздействует на сквид, замыкая цепь отрицательной обратной связи. Выходным сигналом в этой схеме является напряжение V , связанное с регистрируемым потоком $\Delta\Phi$ соотношением

$$\Delta V \equiv \Delta\Phi(R_{oc}/M), \quad (2)$$

где M – коэффициент взаимной индукции между катушкой 7 и сквидом 1.

Такая схема позволяет измерять изменения потока в интервале от десятков микроделей одиночного кванта потока до уровня сотен квантов потока. Частотный диапазон схемы лежит в пределах от 0 до десятков килогерц, максимально отслеживаемая скорость изменения потока составляет $10^5 \Phi_0/\text{с}$.

Криогенное обеспечение ССМ. Для работы сквидов необходимы низкие температуры. Криогенную часть ССМ с охлаждаемым образцом (см. рис. 1) погружают в криостат с хладагентом [10, 11, 19, 24]. В качестве криостатов можно использовать стандартные транспортные дьюары с широкой горловиной (>40 мм) или пластиковые криостаты. В зависимости от объема криостата длительность непрерывной работы ССМ варьируется от одних суток до одного месяца. Достоинством таких систем являются простота конструкции, стабильность рабочей температуры и возможность обеспечения минимального расстояния между образцом и сквидом.

В случае, когда температуры датчика и образца различны, используют криостаты с вакуумированной камерой. Образец и сквид размещают внутри камеры; рабочую температуру сквида поддерживают при помощи хладопровода, возмож-

ность изменения температуры образца обеспечивают нагревательным элементом [12, 13, 15, 17].

Для изучения физических и биологических объектов, находящихся при комнатной температуре, необходимы специализированные азотные криостаты с вакуумной камерой и тонким окном, отделяющим вакуум от внешней атмосферы [25–28]. Сквид закрепляют на хладопроводе и размещают в вакуумном пространстве на минимальном расстоянии от окна, с другой стороны которого находится исследуемый образец.

Магнитное экранирование. Для реализации высокой чувствительности ССМ необходима защита от внешних магнитных полей и радиочастотных помех. К последним относится постоянное магнитное поле Земли, величина которого близка к 50 мкТл, помехи сетевой частоты 50 Гц (60 Гц) и ее гармоник, достигающие в обычных лабораторных условиях 10...300 нТл, а также высокочастотные помехи телевидения, радио, компьютеров, влияющие на процессы в джозефсоновских переходах сквидов и ухудшающие их характеристики.

В гелиевых системах, работающих при $T = 4.2$ К, обычно используют сверхпроводящие инометаллы и свинцовые экраны, обеспечивающие ослабление низкочастотных магнитных помех более чем в 1000 раз, этого вполне достаточно для работы сквида.

В азотных системах используют двухслойные и трехслойные экраны из пермаллоя, внутри которых располагают криостат. Степень требуемой экранировки зависит от размеров сквида, уровня его собственных шумов и полосы пропускания электроники. Например, при использовании сквида с эффективной площадью 50 мм $\times$ 50 мм желательно, чтобы величина остаточного постоянного магнитного поля в области расположения сквида не превышала 0,4 мкТл.

Механизмы позиционирования. Механизм перемещения образца (позиционирования) характеризуются максимальной площадью сканирования, минимальным шагом, скоростью движения и величиной механического гистерезиса. Все эти параметры зависят от типа механизма, условий эксплуатации и требуемой точности. В современных механизмах позиционирования управление движением и слежение за текущей координатой относительно выбранной начальной точки сканирования осуществляется автоматически при помощи персонального компьютера.

Движущиеся части механизма позиционирования в ССМ находящиеся вблизи сквида, должны быть выполнены из немагнитных и немагнитных материалов, чтобы минимизировать магнитный шум и не создавать паразитные поля рассеяния или поля, связанные с вихревыми токами.

Как правило, в ССМ осуществляется перемещение образца относительно скинда, так как движение скинда даже в слабых (но всегда присутствующих) остаточных магнитных полях вызывает появление паразитных сигналов. При исследовании больших объектов, когда необходимо перемещать датчик вдоль образца, используется градиометрическая конструкция скинда, при помощи которой компенсируется влияние однородного внешнего магнитного поля.

В скинд-микроскопах, предназначенных для измерения охлаждаемых образцов, главная часть механизма перемещения должна быть криогенной, ее размеры ограничиваются диаметром горловины криостата (обычно 40...80 мм). Поэтому площадь сканирования не превышает $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$, что вполне приемлемо для многих задач. Минимальный шаг перемещения в X -, Y -направлениях обычно составляет 0,5...1 мкм. В ряде ССМ перемещение образца осуществляется при помощи системы немагнитных толкающих стержней, приводимых в движение шаговыми двигателями [20, 24], достаточно удаленными от скинда, чтобы не создавать магнитные помехи. В гелиевых системах охлаждаемую часть герметизируют для защиты подвижных частей от оседания и замерзания конденсата (пары воды, кислород, азот и др.).

В микроскопах, предназначенных для исследования образцов с комнатной температурой, механизм перемещения может быть выполнен на основе готовых коммерческих модулей [25].

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ССМ

Используемый хладагент и температура образца определяют возможности и конструкцию ССМ. Чтобы отразить эти особенности, будем далее называть скинд-микроскопы ССМ-4,2, если скинд и образец охлаждаются жидким гелием, ССМ-77, если скинд и образец охлаждаются жидким азотом, и ССМ-300, если образец находится при комнатной температуре, вне зависимости от используемого скинда и хладагента.

ССМ-77. Функциональная схема сканирующего скинд-микроскопа на основе ВТСП-скинда для изучения физических объектов, находящихся при температуре жидкого азота, приведена на рис. 1. На примере ССМ-77, который изготовлен в 1994 г. в России [24, 29], рассмотрим подробнее устройство криогенной штанги 5, являющейся основной частью скинд-микроскопа. На верхнем конце штанги расположены два шаговых двигателя 1, которые вращают соответствующие микрометрические винты. Поступательное движение этих микровинтов передается через длинные тяги к X -, Y -стержням криогенного координатного механизма, перемещающего образец в плоскости X - Y . Координатный механизм схематически показан

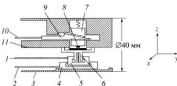


Рис. 4. Схематическое изображение криогенной части ССМ-77: 1 - X -стержень, 2 - Y -стержень, 3 - основание, 4 - Y -каретка, 5 - X -каретка, 6 - столик с образцом, 7 - держатель скинда, 8 - скинд, 9 - Z -клин, 10 - Z -стержень, 11 - базовая поверхность.

на рис. 4. Под действием Y -стержня 2 Y -каретка 4 может двигаться относительно основания 3 в направлении Y . Размещенная на Y -каретке X -каретка 5 перемещает столик с образцом 6. Перемещение X -каретки осуществляется при помощи X -клина (не показанного на рисунке), трансформирующего с отношением 2 : 1 перемещение X -стержня 1 вдоль оси Y в перемещение X -каретки вдоль оси X . Столик с образцом слегка подпружинен и во время перемещения прижимается к поверхности 11. Механизм обеспечивает максимальное перемещение 8 мм по каждой из координат и наименьший шаг сканирования порядка 1 мкм. Последний определяется минимальным углом поворота шагового двигателя и коэффициентом передачи микровинта (для координаты x необходимо учитывать коэффициент передачи клин-левой пары).

Дополнительный микрометрический винт, тягу, Z -стержень 9 и Z -клин 8 используют для перемещения держателя скинда 7 и регулировки расстояния скинд-образец вдоль координаты z . Держатель скинда перемещается в направлении z при помощи Z -клина, преобразующего движение стержня вдоль оси y в перемещение держателя вдоль оси z с отношением 4 : 1. Скинд 8 закрепляют на нижней плоскости держателя скинда. Расстояние между скиндом и образцом можно регулировать от 2 мм до касания подложки и образца с минимальным шагом 5 мкм.

Используемый в ССМ скинд изготавливается из тонкой $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ - пленки, нанесенной на бикристаллическую подложку из титаната стронция. Скинд имеет форму квадрата с внутренним квадратным отверстием. Джозефсоновские переходы образуются в месте пересечения шва бикристалла сверхпроводящими мостиками шириной 3 мкм. Общий вид чипа, на котором сформированы два скинда 1 и 2 и токовый виток 3, приведен на рис. 5а. Шов бикристаллической подложки проходит вертикально по центру чипа, скинды

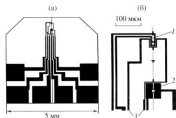


Рис. 5. Общий вид подложки с BTSP-скиндром (а); увеличенное изображение скиндров (б).

расположены вблизи заостренного края подложки, а контактные площадки смещены к противоположной стороне чипа. При размещении подложки под небольшим углом к образцу такая конструкция позволяет максимально приблизить скинд к поверхности образца. Увеличенное изображение скиндров приведено на рис. 5б. Скинд 1 с внешней стороны 20 мкм и внутренним отверстием 10 мкм расположен ближе к краю подложки и используется при измерениях, требующих наилучшего пространственного разрешения. Скинд 2 с соответствующими размерами 60 и 10 мкм имеет большую эффективную площадь и используется, когда необходимо увеличить чувствительность по магнитному полю.

При измерениях скинд работает в режиме замкнутой обратной связи. Полоса пропускания скинд-электроники составляет 5 кГц, эквивалентный шум магнитного потока в области частот 0,1...200 Гц изменяется как $1/f$ и на частоте $f = 1$ Гц равен $5 \cdot 10^{-6} \Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$. Динамический диапазон системы порядка $2 \cdot 10^5 \text{ Гц}^{1/2}$.

ССМ-4.2. Скинд-микроскопы гелиевого уровня охлаждения на основе низкотемпературных скиндров разработаны в США [12, 13]. В одной из конструкций скинд и образец располагаются в закрытой камере и охлаждаются газообразным гелием за счет контакта с заполненным жидким гелием резервуаром. Перемещение образца осуществляется через сифонное соединение при помощи специального манипулятора, расположенного при комнатной температуре. Это исключает заклинивание механизма позиционирования вследствие конденсации и замерзания паров воды. В этом ССМ используется скинд из нобия со стандартными туннельными джозефсоновскими переходами (Nb/AI₂O₃/Nb). Скинд закреплен на гибком шарнирном устройстве из майлара так, чтобы край подложки со скиндром под действием силы тяжести касался бы образца. Меняя координату z-образца, в пределах нескольких градусов

можно варьировать угол между образцом и подложкой датчика, изменяя расстояние датчик-образец вплоть до 5 мкм. Скинд и образец окружены сверхпроводящим экраном из свинца, расположенным внутри камеры, снаружи ССМ имеется одностойный экран из пермаллоя. Основные параметры ССМ-4.2 различных типов представлены в таблице.

ССМ-300. ССМ высокого разрешения на основе BTSP-скиндров для неразрушающего контроля и исследования образцов, находящихся при комнатной температуре [25–27], появились в 1996 г. Основой конструкции ССМ-300 является специализированный азотный криостат, обеспечивающий минимальное расстояние между BTSP-скиндром (рабочая температура 77 К) и образцом (300 К). Криостат представляет собой вакуумную камеру, в которой размещают резервуар для жидкого азота. На верхнем фланце азотного резервуара укрепляется хладопровод, составленный из медного стержня (внутри азотного резервуара) и скрепленных с ним сапфировых стержней (в вакуумированной части криостата). Последний сапфировый стержень проходит внутри юстировочного механизма с тонкому окну из нитрида кремния (Si₃N₄). Юстировочный механизм позволяет изменять положение тонкостенного окна и скиндром до нескольких десятков микрометров. Находящийся при комнатной температуре образец перемещается в непосредственной близости от окна при помощи X–Y-сканирующего устройства. Вся механическая часть ССМ-300 размещена внутри трехслойного экрана из пермаллоя. Шаговые двигатели, приводящие в движение координатный механизм, расположены вне экранов и соединяются с устройством посредством стержней из фиброгласса. Управление работой ССМ и сбор данных осуществляются при помощи персонального компьютера. Основные параметры ССМ-300 приведены в таблице.

Другие конструкции ССМ. В 1997 г. появились работы [29, 30], в которых описано использование в сочетании со скиндром ферромагнитной магнитомягкой иглы с целью повышения пространственного разрешения ССМ. Игла располагается между скиндром и образцом и является магнитопроводом, воспринимающим вариации магнитного потока вблизи поверхности образца и передающим его к ветке скинда. В такой конфигурации пространственное разрешение определяется диаметром острия иглы (при расстоянии до образца порядка диаметра иглы), а чувствительность по магнитному полю – параметрами скинда и коэффициентом связи иглы и скинда. Как показала экспериментальная оценка, пространственное разрешение прибора может достигать 100 нм, что сравнимо с разрешением магнитного сило-

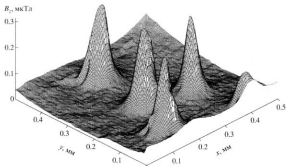


Рис. 6. Магнитное изображение отдельных квантов магнитного потока (вихрей) в пленке $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ при охлаждении ниже T_c в нулевом магнитном поле.

го микроскопа, но значительно превышает его чувствительность.

При решении ряда научных задач необходимо изучить магнитные свойства образца в широком интервале температур. Оригинальная конструкция ССМ, предназначенная для исследования образцов как при 77 К, так и при 300 К, создана в Японии [31]. В Швеции прошел испытания сканирующий сквид-микроскоп, позволяющий измерять образцы в интервале температур от 5 до 100 К [32].

Параметры нескольких сканирующих сквид-микроскопов различных типов приведены в таблице, где указаны температура, при которой находится исследуемый образец, рабочая температура датчика, тип датчика, его основные параметры, параметры системы перемещения образца и пространственное разрешение ССМ. Частотные и динамические характеристики не включены в таблицу, так как они близки у большинства ССМ:

динамический диапазон	100...130 дБ,
рабочая полоса частот	0...5 кГц,
скорость слежения	$10^5 \Phi_0/\text{с}$

Величина чувствительности ССМ с иглой (Германия) не приведена в оригинальной работе, поэтому ее оценка дана в соответствии с типичными параметрами ВТСП-сквида.

3. ПРИМЕНЕНИЯ ССМ

Сканирующие сквид-магнитометры высокого разрешения перспективны для исследований мало-

размерных и слабомагнитных объектов. В качестве иллюстрации возможных применений ССМ ниже приведены результаты, полученные авторами при помощи ССМ-77 (разд. 2), и кратко описаны исследования, проведенные с использованием других ССМ.

ВТСП пленки. Монокристаллические ВТСП-пленки с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше 90 К являются основой устройств высокотемпературной слаботочной сверхпроводниковой электроники, например сквид-магнитометров и градиентометров. ВТСП-пленки являются жесткими сверхпроводниками второго рода. Магнитное поле проникает в них в виде квантов магнитного потока (вихрей), которые закрепляются на структурных неоднородностях пленки. В реальных магнитометрических устройствах вихри могут приводить к появлению гистерезиса в кривых намагничивания и возникновению избыточного низкочастотного шума, вызываемого термически активированным передвижением вихрей.

ССМ-77 использовали для регистрации магнитных полей над поверхностью тонких сверхпроводящих монокристаллических пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в слабых магнитных полях при $T = 77 \text{ К}$. На рис. 6, представлено изображение распределения B_z -компоненты поля на расстоянии 20 мкм над пленкой, переведенной в сверхпроводящее состояние в квазиуловом магнитном поле величиной порядка 10^{-2} А/м . Резкие магнитные особенности на изображении соответствуют одиночным квантам магнитного потока, проникающим в пленку [33]. В некоторых случаях в изображениях однопред-

Основные параметры ССМ

Источник	Температура, К		Датчик			Сканирование			Пространственное разрешение, мкм
	Образец	Датчик	Тип датчика	$A_{эф}$, мкм ²	$\sqrt{S_{\Phi}}$, мкФ ₀ $\sqrt{\Gamma/\Omega}$, ($\sqrt{S_B}$, нТл $\sqrt{\Gamma/\Omega}$)	$A_{ск}$, мм ²	$\Delta x, \Delta y$, мкм	h , мкм	
Illinois, USA, 1993 [12, 13]	~5	~5	НТСП-скинд	100	100 (2)	10 × 10	<4	5	<10
New York, USA, 1995 [15]	4.2	4.2	НТСП-скинд	~75	2 (0.05)	0.4 × 0.4	~0.25	~10	10
Москва, Россия, 1994 [24]	77	77	ВТСП-скинд	600	20 (0.066)	10 × 10	5	50	50
Maryland, USA, 1993 [11]	77	77	ВТСП-скинд	12000	100 (0.166)	10 × 10	<10	60...1000	80
California, USA, 1996 [27]	293	77	ВТСП-скинд	260	18 (0.12)	25 × 25	5.77	15	15
Saarbrücken, Germany, 1997 [29]	77	77	ВТСП-скинд с иглой	~0.01	20 (4000)	0.015 × 0.015	0.1	0.1	0.1

Примечание: $A_{эф}$ – эффективная площадь датчика; $\sqrt{S_{\Phi}}$ – спектральная плотность шумового потока (белый шум); $\sqrt{S_B}$ – эквивалентная спектральная плотность магнитной индукции; $A_{ск}$ – максимальная площадь сканирования; $\Delta x, \Delta y$ – минимальный шаг при перемещении в направлениях x, y ; h – расстояние между образцом и датчиком.

менно наблюдали магнитные особенности различного знака. Изображение магнитного поля над YBaCuO-пленкой, охлажденной в магнитном поле порядка 50 мТл (близком к значению магнитного поля Земли), соответствует полному проникновению поля в пленку. Проникший в пленку магнитный поток удерживался при небольших изменениях внешнего поля.

Изучение особенностей проникновения магнитного потока в ВТСП-пленки позволяет судить об их сверхпроводящих свойствах и может дать важную информацию для улучшения свойств ВТСП магнитноизмерительных устройств [34].

Магнитные и токовые структуры. Эти структуры представляют наиболее широкий класс объектов, которые можно исследовать при помощи ССМ. К ним относятся, например, ультратонкие пленки, магнитные записывающие среды, содержащие микромагнитные частицы красители, токопроводящие тонкопленочные структуры.

При помощи ССМ-77 проведены исследования ультратонких пленок никеля [35, 36], интерес к которым вызван наблюдавшимися резкими изменениями свойств пленок при переходе от квази-объемной структуры к двумерной. Пленки Ni толщиной от 8 до 200 Å наносили на подложку Si (100) и покрывали слоем золота. Образцы представляли собой квадраты со стороной 600 мкм. Их исследовали в параллельном и перпендикуляр-

ном магнитных полях величиной до 4000 и 70 А/м соответственно.

Магнитное изображение пленки Ni толщиной 26 Å в поле, параллельном плоскости пленки, приведено на рис. 7а. Острые пики максимума и минимума B_z -компоненты магнитного поля зарегистрированы у противоположных краев исследуемой пленки, обозначенной на рисунке штриховой линией. Симметричность изображения указывает на то, что вектор намагниченности лежит в плоскости пленки и его направление совпадает с направлением приложенного поля. При отсутствии магнитного поля остаточная намагниченность 26 Å пленки мала. Магнитные изображения пленок толщиной 43, 84 и 200 Å, измеренные в нулевом магнитном поле, имели четкие пары симметричных максимумов и минимумов у противоположных углов квадрата пленки. При приложении параллельного магнитного поля величиной 4000 А/м магнитный момент пленки разворачивался и устанавливался вдоль направления поля, экстремумы сдвигались к положению, показанному на рис. 7а. От пленок толщиной 8 и 15 Å не удалось зарегистрировать сигнал ни при каких величинах поля подмагничивания. Рассчитанная зависимость намагниченности насыщения пленок от их толщины приведена на рис. 7б. Штриховой линией показана величина намагниченности насыщения объемного Ni. Видно, что 2D-3D-пере-

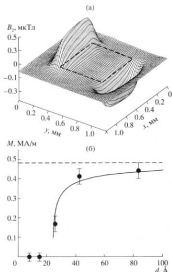


Рис. 7. Магнитное изображение пленки Ni толщиной 26 Å размером 0,6 мм × 0,6 мм в приложенном магнитном поле величины 4000 А/м, направленном параллельно оси y (а), и зависимость намагниченности насыщения от толщины d пленки (б).

код происходит при толщине пленки в интервале от 20 до 80 Å.

Ультратонкие магнитные пленки можно использовать в качестве своеобразных меток для защиты от подделок и установления подлинности ценных документов. Микроскопическую тонкопленочную структуру наносят в условленное место и закрывают каким-либо защитным слоем. Для установления подлинности документа метку намагничивают в небольшом по величине параллельном магнитном поле, а затем область, в которой расположена метка, сканируют сквид-микроскопом. Слабый магнитный сигнал метки обнаруживается только сквид-микроскопом и никаким другим методом он не может быть зафиксирован и измерен. По предложенному методу защиты ценных бумаг и других носителей информации получен патент [37].

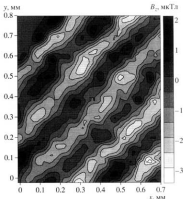


Рис. 8. Магнитное изображение фрагмента флоппи-диска с записанными данными (темные дорожки).

ССМ-77 использован для визуализации магнитных полей рассеяния стандартного флоппи-диска. Магнитная записывающая среда флоппи-диска представляет собой, как правило, слой Fe-Co-микрочастиц, каждая размером порядка 1 мкм. Частицы имеют ориентированный в плоскости пленки магнитный момент. В процессе процедуры форматирования флоппи-диск разбивают на 80 треков шириной 0,115 мм с периодом 0,2 мм. В процессе записи информации частицы перемагничиваются, образуя последовательность нулей и единиц, в которой нулю соответствует последовательная ориентация магнитных моментов, а единице – встречная ориентация моментов. На рис. 8 приведен пример магнитного изображения фрагмента стандартного 3-дюймового флоппи-диска с записанными данными, полученного на расстоянии 20 мкм от поверхности диска [38]. На рисунке хорошо видны более темные треки, разделенные светлыми промежутками порядка 0,1 мм. Темные пятна на треках соответствуют кластерам записанной на диске текстовой информации.

При помощи этого же ССМ-77 проведено сканирование фрагмента портрета Дж. Вашингтона на однодолларовой купюре. Магнитное изображение части рисунка (правого глаза) представлено на рис. 9а. Профиль магнитного поля, измеренный при $x = 1,48$ мм, приведен на рис. 9б. Величина измеренного сквидом магнитного поля изменялась от +60 до -20 мкТл на расстоянии 50 мкм от

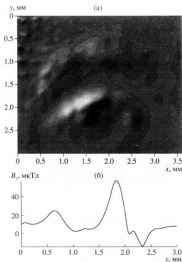


Рис. 9. Магнитное изображение части портрета Дж. Ваннингтона (глаз) на однодолларовой купюре (а); область регистрируемых магнитных полей; от 60 мТл (наиболее светлые части изображения) до -20 мТл (наиболее темные части) и отдельный скан вдоль оси y при $x = 1.48$ мм (б).

образца. Впервые подобное изображение с пространственным разрешением 70 мкм приведено в работе [20], затем подобная купюра была использована для демонстрации возможностей ССМ-300, пространственное разрешение которого составило 130 мкм [26]. Приведенные примеры показывают, что ССМ с теплым образцом можно применять для распознавания поддельных денежных купюр и ценных бумаг.

На рис. 10 представлено полученное при помощи ССМ-77 изображение B_z -компоненты магнитного поля, созданного постоянным током величиной 100 мА, протекающим по проводящему квадратному витку со стороной 400 мкм. Максимальный градиент поля на изображении соответствует текущему току. По картине распределения магнитных полей токов можно локализовать дефекты типа коротков в работающих многослойных модулях или других электронных цепях.

ССМ-4,2 применен для изучения тонкопленочных структур из низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников. В работе [13] представлены результаты исследования сверхпроводящих решеток из ниобия, охлажденных в слабых магнитных полях. В зависимости от величины приложенного магнитного поля получены изображения магнитных вихрей и связок вихрей, захваченных ячейками решетки. Цикл работ, выполненный в фирме IBM, позволил визуализировать джозефсоновские вихри с пространственным разрешением вплоть до 4 мкм. Эти вихри локализованы на границе двух сверхпроводящих гранул высокотемпературного сверхпроводника, образующих джозефсоновский переход. Впервые зарегистрированы полные кванты потока на специально подготовленных ВТСП-образцах, что позволяло сделать заключения о симметрии параметра порядка в этих сверхпроводниках [16–18]. Изображения мейснеровских токов, захваченного магнитного потока, а также одиночных квантов потока в тонкопленочном низкотемпературном скин-де представлено в работе [39].

ССМ-300 на основе ВТСП-скинда использован для исследования живых магнитотактильных бактерий, каждая из которых обладает внутренним магнитным моментом порядка $5 \cdot 10^{-16}$ А м². ССМ регистрировал флуктуации магнитного потока, связанные с их движением [27].

Одним из наиболее перспективных применений сквид-микроскопии является неразрушающий магнитный контроль материалов и конструкций [40, 41]. ССМ-300 высокого разрешения использован для обнаружения и локализации магнитных включений микронного размера в немагнитную матрицу [42]. В работе [43] описано применение ВТСП сквид-магнитометра для детектирования магнитных примесей в быстродвижущейся медной проволоке. Проволоку протягивали сквозь отверстие в экране со скоростью от 10 до 500 м/мин. Уверенно регистрировали частицы железа диаметром до 50 мкм.

4. СРАВНЕНИЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Сканирующим сквид-микроскопам наиболее близки по конструкции и параметрам магнитные силовые микроскопы и сканирующие магнитометры с чувствительным элементом на основе эффекта Холла. Ниже рассматриваются принципы действия этих устройств и проводится сравнение характеристик различных типов магнитных микроскопов.

Магнитный силовой микроскоп (МСМ). Такой микроскоп впервые продемонстрирован в 1987 г. [4]. Принцип его действия заключается в сканировании поверхности образца намагничен-

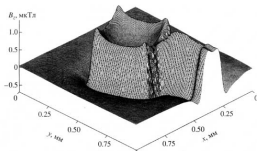


Рис. 16. Изображение магнитного поля, создаваемого током величиной 100 мА, протекающим по квадратному нитку $0.4 \text{ мм} \times 0.4 \text{ мм}$ с подводящими проводами.

ным зондом, укрепленным на упругой консоли, и в картировании отклика зонда, возникающего вследствие магнитоэлектростатического взаимодействия с полем образца. В качестве зонда используется магнитная микрочастица с острием, имеющим радиус закругления порядка десятков нанометров. МСМ позволяет получать изображения поверхности постоянного градиента магнитного поля над образцом с субмикронным пространственным разрешением за счет малой площади острия и малых расстояний зонд-образец. Эквивалентная чувствительность МСМ по магнитному полю находится на уровне 10^{-4} Тл . При помощи МСМ возможна регистрация как магнитного изображения (бесконтактный режим), так и рельефа поверхности образца (контактный режим). Основные проблемы магнитно-силовой микроскопии связаны с неоднозначной интерпретацией получаемых изображений. Намагниченное острие [44, 45] вносит сильные локальные возмущения в намагниченность образца, вследствие чего получаемые от одинаковых объектов изображения сильно зависят от типа использованного микрозонда.

Магнитный силовой микроскоп использовался для получения изображений магнитных полей стандартных записывающих головок [4], битов информации в записывающих средах [5, 44], доменной структуры многослойных магнитных сред, одиночных вихрей магнитного потока в высокотемпературных сверхпроводниках [45].

Сканирующий холл-микроскоп (СХМ). Этот микроскоп представлен впервые в 1992 г. [6]. Создание магнитного микроскопа с высоким простран-

ственным разрешением стало возможным с появлением чувствительных датчиков Холла субмикронных размеров, сформированных из GaAs/AlGaAs. Принцип действия СХМ заключается в сканировании датчиком Холла поверхности образца и регистрации сигнала датчика в зависимости от текущих координат. В качестве механизма перемещения используется пьезоэлектрическая трубка, на конце которой закреплен чувствительный элемент с датчиком Холла и тонкопленочным золотым контактом. Образец закрепляют так, чтобы угол между поверхностью образца и датчиком составлял 1° – 2° . При сканировании уголок чипа касается образца так, что между золотым контактом и образцом устанавливается туннельный ток. При таком касании расстояние между датчиком Холла и поверхностью составляет приблизительно 0.2 мкм , что определяет величину пространственного разрешения. Во время сканирования одновременно измеряют профили магнитного поля и топографию поверхности образца. СХМ – это неинвазивный инструмент (по оценкам [7], поле, создаваемое самим чувствительным элементом, составляет $<10^{-6} \text{ Тл}$), способный проводить количественные измерения профилей магнитного поля вблизи поверхности образца.

В работах [6, 7] холл-микроскопы использовались для исследований доменной структуры в магнитных пленках и проникновения квантов магнитного потока в высокотемпературные сверхпроводящие пленки.

Сравнение магнитных микроскопов. Для сравнения основных характеристик МСМ, микроскопа на основе датчика Холла и сквид-микроскопа

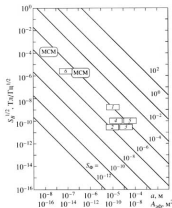


Рис. 11. Сравнительная диаграмма сканирующих магнитных микроскопов: 1 – ССМ на основе HTСП-скинда (University of Illinois, USA); 2 – ССМ на основе HTСП-скинда фирмы IBM (USA); 3 – ССМ на основе ВТСП-скинда (МГУ, Россия); 4 – ССМ на основе ВТСП-скинда (University of California, USA); 5 – ССМ на основе ВТСП-скинда (Maryland, USA); 6 – ССМ с магнитопроводом (University of Saarbrücken, Germany).

используется диаграмма, подобная диаграмме в работе [12], на которой по оси абсцисс указан эффективный линейный размер датчика (или его эффективная площадь), соответствующий минимальному пространственному разрешению прибора, а по оси ординат – чувствительность прибора к магнитному полю (рис. 11). Произведение чувствительности по полю и эффективной площади дает оценку чувствительности по магнитному потоку. Таким образом, диагонали диаграммы соответствуют изолиниям магнитного потока, выраженным в единицах кванта потока Φ_0 .

Положения больших прямоугольников приблизительно соответствуют характеристикам МСМ и СХМ. Пять малых прямоугольников, расположенных ближе к правому нижнему углу, соответствуют описываемым в данной работе сканирующим скинд-микроскопам. ССМ уступает первым двум микроскопам по пространственному разрешению, но превосходит их примерно на два-три порядка в чувствительности по магнитному полю в единичной полосе частот.

Особое место на диаграмме занимает прямоугольник 6, соответствующий скинд-микроскопу

с магнитопроводом, пространственное разрешение которого приближается к пространственному разрешению МСМ и СХМ. В оригинальной работе не указана чувствительность этого ССМ, поэтому ее оценка дана в соответствии с типичными параметрами ВТСП-скинда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее десятилетие появились и активно развиваются магнитные скинд-микроскопы, в которых в качестве чувствительного элемента используются низкотемпературные или высокотемпературные скинды. Отличительной особенностью скинд-микроскопов являются уникальная чувствительность по магнитному полю (лучше 10^{-16} Тл), пространственное разрешение в единицы-десятки микрон, а также возможность получения количественных изображений распределения нормальной компоненты магнитных полей рассеяния различных физических объектов. Конструктивные особенности реальных сканирующих скинд-микроскопов связаны с необходимостью охлаждения скинда и тщательной магнитной экранировкой от естественного магнитного поля Земли и различных электромагнитных наводок.

Скинд-микроскопы активно используют для исследований магнитных свойств сверхпроводящих пленок, магнитных ультратонких пленок и биомангнитных объектов. На основе скинд-микроскопов развивают устройства неразрушающего магнитного контроля, позволяющие обнаруживать скрытые микродефекты, неоднородности, малоразмерные магнитные включения. Расширение возможностей метода в будущем связано с достижением субмикронного пространственного разрешения, повышением верхнего предела полей подмагничивания и возможностью изменении температуры образцов в широких пределах.

Авторы признательны J. Bohr, С. Heiden и M. Mück за плодотворное сотрудничество и полезные обсуждения, а также выражают благодарность А.С. Калабухову и Ю.В. Дерюжкиной за помощь на различных этапах подготовки данного обзора.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке международного фонда ИНТАС (грант № 97-0894) и федеральной целевой научно-технической программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники гражданского назначения" (госконтракт № 107-6(00)П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorkov S.A., Khariton A.F., Helrich B. et al. // Supercond. Sci. Technol. 1996, V. 9, P. 952.
2. Grigorieva I.V. // Supercond. Sci. Technol. 1994, V. 7, № 4, P. 161.

3. Hartmann U. // J. Magn. and Magn. Materials. 1996. V. 157/158. P. 545.
4. Martin Y., Wickramasinghe H.K. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. № 20. P. 1455.
5. Mamalis S., Babcock K., Mussie J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 19. P. 2351.
6. Chang A.M., Hallen H.D., Harriot L. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. № 16. P. 1974.
7. Orul A., Bending S.J., Hentel M. // J. Vac. Sci. and Techn. 1996. V. B14. № 2. P. 1202.
8. Rogers F.P. // A Device for Experimental Observation of Flux Vortices Trapped in Superconducting Films: MIT Master's Thesis, Boston, USA. 1983. 112 p.
9. Hibbs A.D., Sager R.E., Cox D.W. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. № 7. P. 3652.
10. Mathai A., Song D., Gion Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. № 5. P. 598.
11. Mathai A., Song D., Gion Y. et al. // IEEE Trans. 1993. V. AS-3. № 1. P. 2609.
12. Vi L.N., Van Harlingen D.J. // IEEE Trans. 1993. V. AS-3. № 1. P. 1918.
13. Vi L.N., Wirtom M.S., Van Harlingen D.J. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. № 12. P. 1693.
14. Kirtley J.R., Ketchen M.B. // IEEE Trans. 1995. V. AS-5. № 2. P. 2133.
15. Kirtley J.R., Ketchen M.B., Stawiasz K.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 9. P. 1136.
16. Tsuei C.C., Kirtley J.R., Chi C.C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. № 4. P. 593.
17. Tsuei C.C., Kirtley J.R., Rupp M. et al. // J. Supercond. 1995. V. 8. № 4. P. 487.
18. Kirtley J.R. // IEEE Spectrum. 1996. V. 33. № 12. P. 40.
19. Black R.C., Mathai A., Wellstood F.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 17. P. 2128.
20. Black R.C., Wellstood F.C., Dantsker E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 1. P. 100.
21. Black R.C., Wellstood F.C., Dantsker E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 10. P. 1267.
22. Black R.C., Wellstood F.C., Dantsker E. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 1. P. 99.
23. Клаус Дж. // ТИИЭР. 1989. V. 77. № 8. P. 1208.
24. Gudaushnikov S.A., Snigirev O.V., Vengras I.I. et al. // Cryogenics. 1994. V. 34. ICEC Supplement. P. 883.
25. Wellstood F.C., Gion Y., Amar A. et al. // IEEE Trans. 1997. V. AS-7. № 2. P. 3134.
26. Lee T.S., Dantsker E., Clarke J. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 12. P. 4208.
27. Lee T.S., Chensu Y.R., Dantsker E. et al. // IEEE Trans. 1997. V. AS-7. № 2. P. 3147.
28. Gudaushnikov S.A., Marveets L.V., Andreev K.A. et al. // Appl. Supercond. 1998. V. 5. № 7-12. P. 313.
29. Pitzus P., Dworak V., Hartmann U. // Extended Abstracts 6th Int. Supercond. Electron. Conf. (ISEC'97), Berlin, Germany. June 25-28. 1997. V. 3. P. 395.
30. Tarrin Yu., Seigel M. // Extended Abstracts 6th Int. Supercond. Electron. Conf. (ISEC'97). Berlin, Germany. June 25-28. 1997. V. 3. P. 389.
31. Tanaka S., Yamazaki O., Shimizu R. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. Pt 1. № 5A. P. L505.
32. Tselenchuk A.Ya., Ivanov Z.G., Pehrson S., Claeson T. // IEEE Trans. 1999. V. AS-9. № 2. P. 4115.
33. Gudaushnikov S.A., Koshchev M.J., Kalabukhov A.S. et al. // Proc. Europ. Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS'99), Barcelona, Spain, September 14-17, 1999. Inst. Phys. Conf. Ser. 2000. № 167. P. 541.
34. Andreev K.E., Bobyl A.V., Gudaushnikov S.A. et al. // Supercond. Sci. Techn. 1997. V. 10. № 5. P. 366.
35. Snigirev O.V., Andreev K.E., Tishin A.M. et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 55. № 21. P. 14429.
36. Снитсен О.В., Ташин А.М., Гудашников С.А. и др. // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 9. С. 1681.
37. Бор Я., Гудашников С.А., Андреев К.Э., Снитсен О.В. и др. Способ записи и считывания информации: Патент России № 2124755 // Б.И. 1999. № 1.
38. Gudaushnikov S.A., Snigirev O.V., Tishin A.M. // Proc. Europ. Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS'99), Barcelona, Spain, September 14-17, 1999. P. 553.
39. Morooka T., Nakayama S., Odawara A. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. Pt 2. № 2A. P. L119.
40. Wikswo J.P., Jr. // IEEE Trans. 1995. V. AS-5. № 2. P. 74.
41. Jenks W.G., Sadeghi S.S.H., Wikswo J.P., Jr. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 293.
42. Tarrin Y., Siegel M., Hinken J. // IEEE Trans. 1999. V. AS-9. № 2. P. 3809.
43. Nagaiishi T., Kagai H., Toyoda H., Itozaki H. // IEEE Trans. 1997. V. AS-7. № 2. P. 2886.
44. den Boef A.J. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. № 5. P. 439.
45. Rabrig M., Porthus S., Lodder J.C. // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. № 10. P. 3224.