

ным алгоритмом позволяет по-новому расставить акценты в решении этой задачи.

Л и т е р а т у р а

1. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971.
3. Агамалов Ю. Р. и др. Виртуальный самоверяемый анализатор иммитанса с адаптивными функциональными возможностями // Датчики и системы. 2008. № 7. С. 21—27.
4. Мартяшин А. И. и др. Основы инвариантного преобразования параметров цепей / Под ред. А. И. Мартяшина. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Дегтяренко П. И., Коноваленко В. И. Определение характеристик звеньев систем автоматического регулирования. М.: Энергия, 1973.

6. Бобылев Д. А. Оценка эффективности применения частотного метода и метода моментов импульсной характеристики для параметрической идентификации двухполюсников // Датчики и системы. 2012. № 7. С. 29—33.

7. Бобылев Д. А., Боровских Л. П. Универсальный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников // Датчики и системы. 2013. № 12. С. 7—12.

8. Боровских Л. П., Читашили Н. Г. Об инвариантном измерении параметров трехэлементных двухполюсников // Измерительная техника. 1990. № 1. С. 42—44; Borovskikh L. P., Chitashvili N. G. Invariant measurement of three-element two-terminal network parameters // Measurement Techniques. 1990. V. 33. N. 1. P. 63—67.

9. Боровских Л. П. Использование априорной информации для повышения точности измерения параметров объектов с многоэлементной схемой замещения // Датчики и системы. 2006. № 12. С. 22—25.

Дата принятия 12.09.2014 г.

538.91

Пространственно-временные характеристики высокотемпературных сверхпроводников и холловский микроскоп для их исследования

Х. Р. РОСТАМИ

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова
РАН, Фрязино, Россия, e-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru

Исследованы пространственные и временные характеристики плотности захваченного магнитного потока в монокристаллических $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ и поликристаллических $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ образцах. Показана эффективность этих исследований при изучении неоднородности сверхпроводников. Разработан низкотемпературный трехмерный растровый микроскоп чувствительностью $2,5 \cdot 10^{-7}$ Тл/Гц^{1/2} на основе двух преобразователей Холла.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, моно- и поликристаллы, критический ток, захваченный магнитный поток, холловский микроскоп.

The space and time characteristics of density of trapped magnetic flux in monocrystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ and polycrystalline $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ samples have been studied. The efficiency of these studies is demonstrated at research of inhomogeneity of superconductors. The three-dimensional low temperature raster microscope with sensitivity of $2,5 \cdot 10^{-7}$ T/Hz^{1/2} based on the two Hall converters is developed.

Key words: high-temperature superconductors, mono-crystals, polycrystals, critical current, trapped magnetic flux, Hall microscope.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) являются неоднородными материалами, и их подробное исследование представляет большой научный интерес [1—3]. Создание сверхпроводников с плотностью критического тока $J_{\text{кр}}$, близкой к плотности критического тока распаривания в соответствии с теорией Гинзбурга—Ландау, — задача весьма важная как для физики, так и для электроники и электро- и магнитоэнергетики. Технологически проще и дешевле синтезировать поликристаллические образцы ВТСП нужной формы и размеров, однако в них $J_{\text{кр}}$ существенно ниже, чем в монокристаллах и эпитаксиальных пленках, что ограничивает их широкое применение на практике. Изучение происхождения, распределения, выхода и захвата магнитного потока дефектами образца может служить высокоинформ-

ативным неразрушающим методом диагностики ВТСП [2—4]. Один из таких методов связан с исследованием их пространственно-временных характеристик.

Рассмотрим принцип работы простого высокочувствительного трехмерного микроскопа на основе преобразователей Холла (ПХ) для визуализации магнитного состояния объектов. Для исследования пространственного распределения магнитного поля вокруг объекта в микроскопе предусмотрено два режима сканирования:

поле изменяется, измеряется сигнал от неподвижного зонда (в данном режиме микроскоп обладает более высоким разрешением и позволяет наблюдать перемещение вихрей и фрагментов магнитного потока на единицы нанометров);

поле фиксировано, идет сканирование по координатам (в данном режиме разрешение определяется размером измерительного зонда).

Магнитный комплекс (МК), обеспечивающий работу микроскопа, позволяет проводить исследование во внешних постоянных магнитных полях индукцией от нуля до ± 8 Тл в диапазоне температур 4,2—300 К. Нестабильность и нелинейность во всем динамическом диапазоне развертки поля по времени не превышает 0,01 % [5, 6]. С той же нестабильностью температуру можно сканировать по заданному закону во всем указанном диапазоне. Для создания трехмерного холловского микроскопа высокой чувствительности и разрешения с большим обзором поля вокруг образца требуются:

высокочувствительный магнитометр;

устойчиво работающие при криогенных температурах системы позиционирования с разрешением больше минимального размера рабочей поверхности ПХ, сканирующие площади координатных X-, Y-столиков в десятки квадратных миллиметров;

система высокоточного перемещения образца по оси Z на большом расстоянии от поверхности ПХ.

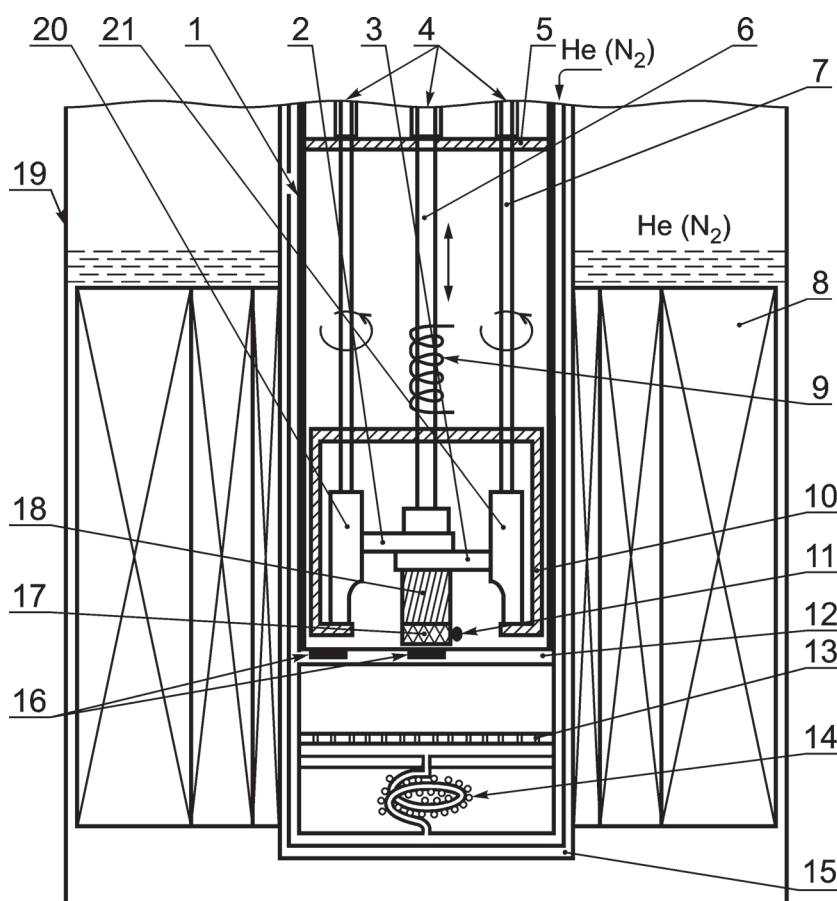


Рис. 1. Структурная схема микроскопа:

1 — несущая; 2, 3 — координатные X-, Y-столики; 4 — штанги; 5 — фланец; 6 — держатель; 7 — поворотные тяги; 8 — соосные сверхпроводящие соленоиды; 9 — нагреватель; 10 — фиксаторы; 11 — термометр; 12 — медный диск; 13 — тонкокапиллярная сетка; 14 — микрокапилляр; 15 — проточный микрокриостат; 16 — преобразователи Холла; 17 — образец; 18 — медная оправка; 19 — гелиевый криостат ГК-150; 20, 21 — червячные передачи

В ходе измерений образец, закрепленный на подвижном столике, можно перемещать в трех взаимно-перпендикулярных направлениях. Измерив локальные значения B_z для каждой точки, можно установить истинную картину распределения магнитного поля $B_z(X, Y, Z)$ над образцом. Точность измерений определяется эффективным размером

$S_{\text{эф}}^{1/2}$, который должен быть меньше минимального размера перемещения по координатам X, Y. Эффективная площадь $S_{\text{эф}}$ рабочей поверхности ПХ меньше ее заданного размера S. Чувствительная зона ПХ согласно [7] расположена, в основном, в узкой полосе вблизи холловских контактов.

Криогенная часть сканирующего магнитного микроскопа схематично изображена на рис. 1. Перед измерениями держатель 6 столиков 2, 3 с помощью микровинта поднимается вверх по оси Z, а сквозь окна в несущей 1 к столикам привинчивается медная оправка 18 с образцом 17. Затем образец подводится на минимальное расстояние 10 мкм к медному диску 12 с датчиками Холла 16. Фланец 5 жестко связан со штангами 4. Внутри боковых штанг проходят поворотные тяги 7, обеспечивающие посредством червячных передач 20, 21 соответствующие линейные перемещения столиков в

направлениях X, Y. Фиксаторы 10 отмечают начало работы червячных передач. Вся система перемещения находится внутри газопроточного микрокриостата 15 диаметром 42 мм. Жидкий гелий или азот, который заливают по стенке микрокриостата и через спиралеобразный микрокапилляр 14, бифилярно намотанный поверх нагревателя, поступает через тонкокапиллярную сетку 13 в емкость микрокриостата. Термометр 11 приклеен к образцу клеем БФ2. С помощью модернизированной схемы на базе терморегулятора РТП-3М температура в камере поддерживается с погрешностью не более 0,01 % в диапазоне 4,2—300 К. Нагреватель 9 служит для быстрого изменения температуры. Токовые и холловские контакты ПХ, разработанного на базе преобразователя ПХЭ 607118А1, утоплены вглубь медного диска 12, а провода подведены по его боковой поверхности. Измерительные провода проходят между соосными тонкими нержавеющими трубками центральной штанги 4. Проточный микрокриостат помещен в отверстие трех соосных сверхпроводящих соленоидов 8. Вся система находится внутри теплого гелиевого криостата ГК-150 19 и защищена цилиндрическим магнитным экраном, изготовленным из алюминия и пермаллоя.

В описываемом микроскопе с целью упрощения его конструкции и электронной схемы не предусмотрены датчики контроля поверхности образца. При настройке механической части минимальное расстояние между строго параллельными тщательно отполированными поверхностями образца 17 и медного диска 12 обеспечивается пленкой толщиной 10 мкм. Для компенсации люфта резьбы микровинта начало и конец перемещения образца по оси Z фиксируется омическими контактами.

Параллельность сканирования плоской поверхности образца контролировали по радиальному распределению плотности захваченного магнит-

ного потока на эпитаксиальных пленках YBCO, полученных лазерным распылением на зеркально отполированной поверхности подложки NdGaO₃. Для юстировки X-, Y-столбиков использовали радиальные распределения намагниченности магнитных пленок, также полученных лазерным распылением на зеркально отполированной поверхности подложки. Таким образом, при прямом и обратном сканировании определяли степень параллельности сканирования образца по отношению поверхности ПХ, что не накладывает жестких ограничений на точность установки и геометрические характеристики образцов. При заполнении криостата жидким гелием внешняя секция катушек 8 создает поле индукцией от нуля до ± 8 Тл при силе тока I от нуля до ± 55 А, средняя обеспечивает поле подмагничивания до 0,1 Тл, внутренняя служит для компенсации постоянной составляющей поля Земли по координате Z (при температуре 77 К поля индукцией 10^{-7} Тл уже могут проникнуть внутрь ВТСП [1]). В центральной части отверстия соленоидов 8 в объеме $\varnothing 42 \times 40$ мм³ создавалось однородное магнитное поле, которое не изменялось во всем динамическом диапазоне его развертки. Неоднородность поля составляла 10^{-5} Тл при максимальной индукции 8 Тл.

Проанализируем чувствительность магнитометра с ПХ. В [8] для измерений компонентов B_x , B_y , B_z магнитного поля

и амплитуды $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ использовали три последо-

вательно включенных ПХ. При их питании от источника постоянного тока из-за наложения на ЭДС Холла U_H сигналов, вызванных температурными процессами в ПХ [8], дрейфа нуля операционных усилителей (ОУ), аппаратных и внешних электромагнитных наводок невозможно достигнуть чувствительности выше 10^{-5} Тл. Как показано в [9], путем поочередного пропускания импульсного тока через токовые и потенциальные контакты ПХ, дальнейшей фильтрации импульсных помех и запоминания усредненного сигнала можно повысить чувствительность магнитометра до 10^{-8} Тл/Гц^{1/2}. Однако методика достижения такой чувствительности не лишена недостатков. В частности, авторы [9] не учли следующие факты.

1. При усреднении сигналов от холловских контактов ПХ промышленного производства, в которых обычно ширина токовой и потенциальной полосковых линий существенно отличается, возникают погрешности измерений сигнала. Это, в свою очередь, приводит к снижению точности установки и сложности интерпретации полученных результатов, что особенно сказывается при высоких пространственных разрешениях.

2. Пропускание более сильного тока вдвоенных токовых контактов через слаботочные одиночные потенциальные контакты приводит к быстрому выходу последних из строя. Это особенно заметно проявляется при термоциклировании образцов.

3. Как следует из ранее опубликованных работ авторов [9], подавление помех при импульсном переключении тока вызывает определенные трудности, что вынудило использовать более дорогую элементную базу, усложняя принципиальную электрическую схему магнитометра и т. д.

Разработанный авторами магнитометр, кроме измерений зависимости плотности захваченного магнитного потока и его градиента от температуры и индукции поля, также позволяет измерять гистерезисные кривые локаль-

ной намагниченности или магнитного момента объектов. Для этого используются два максимально идентичных по физико-техническим характеристикам разработанных на базе ПХЭ 607811А1 преобразователя Холла ПХ1, ПХ2 с рабочей поверхностью датчика $S = 100 \times 50$ мкм², магнитной чувствительностью 207 мкВ/Тл⁴ при силе тока 100 мА, остаточным напряжением 90 мкВ, входным сопротивлением 13,4 Ом и выходным 15,1 Ом. Преобразователи включены в противофазе и раздельно питаются от двух идентичных высокостабильных источников переменного тока, оба находятся в одной плоскости, ПХ1 — под образцом, а ПХ2 — далеко от образца в невозмущенном образцом поле. Противофазное включение ПХ позволяет компенсировать влияние внешнего поля и точно измерять магнитный момент или намагниченность образца. При температуре сверхпроводящего образца выше критической $T_{кр}$ регулировкой силы тока источника, питающего ПХ2, сводят к нулю гистерезис намагниченности образца во всем диапазоне развертки поля. Эти данные вводят в компьютер и определяют поправочную функцию для заданных интервалов температур и индукции внешних магнитных полей. Далее измерения проводят при температуре ниже $T_{кр}$.

Структурная схема магнитометра приведена на рис. 2. Магнитометр работает следующим образом. Синусоидальный сигнал частотой 19 Гц от задающего генератора ЗГ поступает на высокостабильные источники тока ИТ1, ИТ2, питающие ПХ1, ПХ2. Сигналы холловских контактов от ПХ1, ПХ2 поступают на входы идентичных масштабных дифференциальных усилителей МДУ1, МДУ2, коэффициент усиления которых синхронно, в зависимости от уровня измеряемого сигнала устанавливают вручную или с помощью компь-

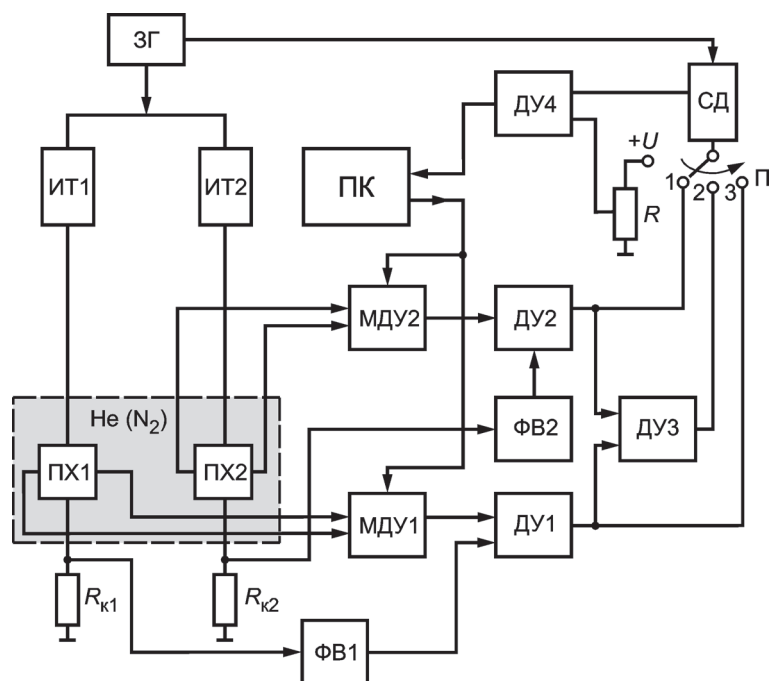


Рис. 2. Структурная схема магнитометра:

ЗГ — задающий генератор; ИТ1, ИТ2 — источники тока; ПХ1, ПХ2 — преобразователи Холла; МДУ1, МДУ2 — масштабные дифференциальные усилители; ДУ1—ДУ4 дифференциальные усилители; ФВ1, ФВ2 — фазовращатели; П — переключатель; СД — синхронный детектор; ПК — персональный компьютер

ютера ПК. С выходов МДУ1, МДУ2 сигналы подаются на один из входов идентичных дифференциальных усилителей ДУ1, ДУ2, на другие их входы поступают сигналы с компенсирующих сопротивлений $R_{к1}$, $R_{к2}$, проходящие через фазовращатели ФВ1, ФВ2. Для регистрации магнитного поля под образцом (сигналы от ПХ1) и магнитного поля вдали от образца (сигналы от ПХ2) выходы ДУ1 и ДУ2 через переключатель П раздельно подключаются на вход синхронного детектора СД, выходной сигнал которого усиливается дифференциальным усилителем ДУ4 и поступает в ПК. Для снятия гистерезисной кривой магнитного момента образца используется усилитель ДУ3, который фиксирует разностный сигнал с выходов ПХ1, ПХ2.

Оптимальная рабочая частота магнитометра принята 19 Гц исходя из следующих экспериментальных фактов. Поскольку электронная схема магнитометра питается от сети, электромагнитные помехи по цепи идут, в основном, на частоте 50 Гц и ее гармониках. Чтобы исключить попадание их в полосу пропускания СД, частоту его опорного сигнала выбирают далеко от сетевой частоты и ее гармоник. Работа на более высокой частоте (100—1000 Гц) [10] хотя и позволяет избавиться от низкочастотных помех, но создает другие проблемы. На таких частотах очень сильно влияют паразитные емкости из-за перемещения в пространстве движущихся частей Х-, Y-столиков. С ростом рабочей частоты увеличивается разность фаз между ЭДС Холла U_X и остаточным напряжением ПХ, созданным протекающим через него током $I_{ПХ}$, изменяется форма U_X , что заметно проявляется при регистрации слабых магнитных полей.

Для уменьшения погрешностей измерений, связанных с влиянием собственного поля тока $I_{ПХ}$ на показания ПХ и физические параметры исследуемого объекта, это поле тщательно компенсировали полем тока, противофазного питающему ПХ. Для этого токи от регулируемых источников, идентичных ИТ1, ИТ2, пропускали через провода, намотанные с малым шагом бифилярно подводящим проводам ПХ1, ПХ2, которые проходили параллельно токовым полосам и были приклеены к поверхностям ПХ с обратной стороны.

После закрепления образца координатный столик выводится в положение, соответствующее краю линии, проходящей примерно по середине длинной стороны плоскости образца. Устанавливается соответствие между механическими перемещениями образца в направлениях X, Y, Z и соответствующими выходными напряжениями многооборотных потенциометров позиционирования. Затем задается нужная температура в измерительной камере и проводится настройка электронной схемы каналов ПХ. Вслед за выбором размера поля обзора интересующего участка исследуемого образца и заданием координат Y, Z образец перемещается относительно ПХ1 вдоль оси X. Для каждого значения координаты X измеряется индукция поля, данные автоматически считываются компьютером. Когда заканчивается сканирование по оси X, вводится новое значение координаты Y, для него измерения повторяются и т. д. В результате снимается двухмерная картина распределения поля над образцом. Далее образец с заданным шагом перемещается по оси Z вверх и снова снимается распределение поля над образцом. На основе полученных данных строится трехмерное изображение $B_z(X, Y, Z)$.

Исследование распределения поля в образце на разных расстояниях от него по оси Z часто необходимо для измерений размагничивающего фактора образца [11], изуче-

ния пространственного распределения релаксационных характеристик проникающего, выходящего или захваченного магнитного потока в сверхпроводниках. Так как магнитный поток, захваченный в участках с сильным пиннингом (закреплением), замыкается вокруг ВТСП образца, а также через участки с более слабым пиннингом, то в поверхностях, находящихся на разных расстояниях от образца, можно селективно измерить влияние на B_z плотностей фрагментов магнитного потока, захваченных в разных участках образца. Измеренное таким образом трехмерное распределение локальных пространственно-временных характеристик захваченного магнитного потока невозможно построить из результатов измерений $B_z(X, Y)$ по формулам электромагнетизма.

Рассмотренную схему в случае сочетания постоянных и переменных внешних магнитных полей можно использовать для анализа гармоник активных и реактивных составляющих магнитных проницаемости и восприимчивости, поверхностного импеданса образцов. Так как средняя секция катушек 8 (см. рис. 1) имеет сравнительно низкую индуктивность, она может послужить для исследования влияния скоростей ввода и вывода магнитного поля на физические параметры сверхпроводников [12].

Используя в схеме магнитометра высокочастотные ОУ [13], можно существенно повысить его рабочую частоту и измерить переменные магнитные поля на частоте, соответствующей разности частот $I_{ПХ}$ и измеряемого переменного поля [8].

Для микрометровых перемещений координатных столиков в направлениях X, Y использованы ходовая гайка («ласточкин хвост») и винт-червячная передача. При этом полный оборот тяги 7 (см. рис. 1) создает линейное перемещение в соответствующем направлении на 10 мкм. Полное линейное перемещение по осям X, Y составляло 7,5 мм. Сигналы положения образца по координатам X, Y вырабатывались многооборотными потенциометрами, связанными с поворотными тягами 7 и червячными передачами, синхронно работающими (на схеме не приведены) с червячными передачами 20, 21. Благодаря использованию фиксаторов 10 начального перемещения столиков разрешение системы позиционирования по обеим координатам превысило 10 мкм. По оси Z система обеспечивала линейное перемещение на расстояние 25 мм с разрешением не менее 10 мкм. Для исключения трения, нагрузок и люфтов движения ходовых гаек при низких температурах угол наклона между платформами столиков и ходовых гаек выбран 60°. Чтобы обеспечить однородную температуру образца и ее стабилизацию, а также уменьшить влияние остаточных магнитных полей на результаты измерений, X-, Y-столики и ходовые гайки изготовлены из меди, а длинные винты перемещения ходовых гаек — из латуни. Экспресс-выбор соответствующей области поверхности образца для сканирования осуществляется путем задания длины хода винтов, на которых установлены омические контакты. При прикосновении винтов к поверхностям ходовых гаек электронная цепь через омические контакты замыкается, движение в данном направлении останавливается. После прекращения движения по оси X происходит смещение на один шаг по оси Y, а затем возникает движение по оси X в обратном направлении и т. д. Таким образом воспроизводится двухмерная картина распределения магнитного поля на поверхности образца. С уменьшением расстояния по оси Z процедура измерений повто-

руется. Независимое достижение весьма высокого разрешения по направлениям X , Y в сравнении с размерами эффективной рабочей поверхности ПХ ($S_{\text{эф}} \approx 50 \times 100 \text{ мкм}^2$) предусмотрено при использовании зонда меньшего размера.

Исследования показали, что разрешение разработанного холловского микроскопа по индукции магнитного поля составило $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$, на частоте 19 Гц динамический диапазон $2,5 \cdot 10^{-7} — 8 \text{ Тл}$. Разработанная схема, в принципе, может регистрировать сигнал на уровне, близком к минимальному порогу возникновения ЭДС Холла ПХ. Такую высокую чувствительность можно получить при использовании высокостабильной по температуре элементной базы, а в предварительной цепи в качестве операционных усилителей — прецизионного ОУ типа 140УД24 [13] или его зарубежных аналогов. Для освобождения сигнала от шумов и его обработки необходимо применять автоматизированный метод вейвлет-преобразования [14]. Кроме этого, образец вместе с ПХ необходимо защитить сверхпроводящим экраном.

Температуру в измерительной камере можно снизить до 2 К, если в нее залить жидкий гелий с дальнейшим откачиванием его паров из резервуара. Однако при исследовании температурных зависимостей магнитных свойств сверхпроводников при температуре ниже 4,2 К следует иметь в виду, что на результаты измерений может влиять наблюдаемая при $T < 3,4 \text{ К}$ сверхпроводимость индиевых контактов промышленно выпускаемых ПХ серии ПХЭ.

Для большинства экспериментов достаточно внешнего магнитного поля индукцией до 0,1 Тл. В этом случае вместо жидкого гелия в резервуар криостата можно залить жидкий азот, а температуру образца в измерительной камере менять в диапазоне 2—300 К. Таким образом увеличивается не только ресурс работы хладагентов, но также исключается влияние на исследуемый объект остаточных и экранирующих полей соленоидов при их нахождении в сверхпроводящем состоянии.

При использовании ПХ с рабочей поверхностью $20 \times 20 \text{ мкм}$ (известны ПХ размером $10 \times 10 \text{ мкм}$) и достижении более высокой чувствительности откроются широкие перспективы применения холловского микроскопа в различных областях науки и техники. Установка может быть полезна для изучения эффекта Холла. При построении задающего генератора и синхронного детектора на дискретных элементах магнитометр можно использовать в качестве портативной системы для локальных измерений магнитного поля Земли, исследований магнитных полей планет, геологоразведочных работ и т. д.

Режим работы микроскопа. Исследование магнитопольевой зависимости плотности захваченного магнитного потока $B_3(H_0)$ по предложенной методике проводили в режимах ZFCMFA, ZFC и FC [4]. Согласно режиму ZFCMFA образец охлаждали до температуры жидкого азота в нулевом магнитном поле. Затем на одну ступень изменяли напряженность H_0 внешнего магнитного поля и через 5 мин после его снятия задавали нужное расстояние и измеряли B_3 в центре на поверхности образца. Без нагревания образца подавали следующую большую ступень H_0 и через 5 мин задавали расстояние и измеряли суммарную B_3 и т. д. Размер ступеней равномерно шаг за шагом увеличивали. Режим ZFC отличается от режима ZFCMFA тем, что после охлаждения, подачи поля и измерений образец нагревали до температуры выше $T_{\text{кр}}$ и

эксперимент повторяли для другой ступени поля. Согласно режиму FC образец охлаждали до температуры жидкого азота в магнитном поле и через 5 мин после его снятия задавали расстояние и измеряли B_3 . Далее образец нагревали до температуры выше $T_{\text{кр}}$, затем на одну ступень изменяли напряженность H_0 внешнего магнитного поля и снова измеряли B_3 и т. д.

Образцы. Для сравнительного анализа исследования проводили на монокристаллическом образце $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (BSCCO) размерами $3,6 \times 4,5 \times 0,1 \text{ мм}$, эпитаксиальных пленках и квазимонокристаллических образцах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) с разными микроструктурами, высотой краевого барьера, объемным пиннингом, размагничиванием. Эпитаксиальные пленки и массивные текстурированные (их ось c перпендикулярна плоскости образца) квазимонокристаллические образцы YBCO в форме диска диаметром 8 мм имели толщину соответственно 0,4 мкм и 0,7 мм. Эпитаксиальные пленки получены лазерным распылением на подложке NdGaO_3 (110) стехиометрической YBCO мишени высокой плотности. Исследование на рентгеновском дифрактометре показало, что пленки имеют ориентацию оси c перпендикулярно плоскости подложки и низкую дефектность. Плотность критического тока $J_{\text{кр}}$, измеряемого по четырехзондовой схеме на мостиках, изготовленных методом фотолитографии и жидкого травления, при 77,4 К составила $5 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$ в поле Земли. Плавленные текстурированные квазимонокристаллические образцы синтезировали с помощью затравки, устанавливаемой сверху при высокой температуре. Под оптическим микроскопом в поляризованном свете отчетливо наблюдались блестящие монокристаллические блоки (монодомены) площадью 0,11 см², разделенные узкими включениями зеленого оттенка. Это подтверждалось картографированием захваченного магнитного потока с помощью датчика Холла. Плотность тока $J_{\text{кр}}$, измеряемая по четырехзондовой схеме на мостиках, изготовленных из текстуриро-

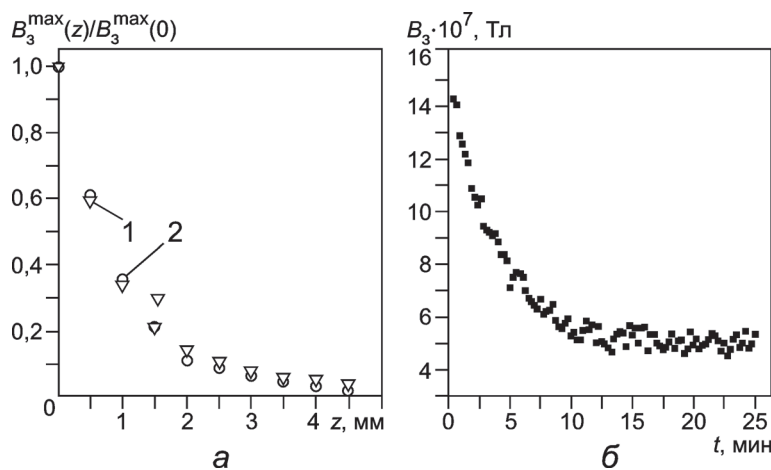


Рис. 3. Пространственное распределение и временная зависимость плотности захваченного магнитного потока $B_3(t)$:

а — нормированное осевое распределение $B_3(z)/B_3^{\text{max}}(0)$ для BSCCO монокристаллического образца в режимах FC (кривая 1) и ZFCMFA (кривая 2); б — временная зависимость $B_3(t)$ для YBCO квазимонокристаллического образца в режиме ZFC, температура 77 К

ванных поликристаллических образцов YBCO, при $T = 77,4$ К в поле Земли составляла $5,7 \cdot 10^3$ А/см². Для образца BSCCO измеренная магнитным методом плотность тока $J_{кр} = 5,3 \cdot 10^5$ А/см². Чтобы измерить температуру начала сверхпроводящего перехода $T_{кр}$ и его ширину $\Delta T_{кр}$ для образца, находящегося внутри микросоленоида индуктивностью $\ell \approx 330$ мкГн, использовали резонансный измеритель в частотном диапазоне 110—155 кГц. Изучив температурную зависимость индуктивности $\ell(T)$, для монокристаллического образца BSCCO получили $T_{кр} \approx 87$ К, $\Delta T_{кр} \approx 0,6$ К, а для поликристаллического образца $T_{кр} \approx 92$ К, $\Delta T_{кр} \approx 1$ К. Внешнее магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости образцов.

Результаты измерений. На рис. 3 приведены пространственное распределение и временная зависимость плотности захваченного магнитного потока $B_3(X, Y, Z, t)$: а — нормированное осевое распределение $B_3(z)/B_3^{\max}$ для BSCCO монокристаллического образца при температуре 77 К; б — временная зависимость $B_3(t)$ для YBCO квазимонокристаллического образца. Здесь $B_3^{\max}(0)$ — максимальная плотность захваченного магнитного потока в центре на поверхности образца. Зависимость проходит через максимум, что хорошо описывается моделью Бина. В области слабых магнитных полей для квазимонокристаллических образцов YBCO модели Бина показывали радиальные распределения $B_3(r)$. Зависимости были измерены в режиме ZFCMFA при температуре 77,4 К. Для демонстрации другой пространственной возможности микроскопа на рис. 3,а приведены нормированные осевые распределения $B_3(z)/B_3^{\max}(0)$ для BSCCO монокристаллического образца, измеренные в режимах FC и ZFC при температуре 77,4 К. В режиме FC распределение захваченного магнитного потока происходит равномернее, чем в режиме ZFC, поскольку исходно однородное внешнее поле более равномерно захватывается после его снятия. Согласно рис. 3,а спад кривых 1, 2 происходит одинаково, это показывает, что в монокристаллическом образце центры пиннинга имеют равную глубину и распределены однородно. Для квазимонокристаллического образца в случае равномерной намагниченности зависимость $B_3(z)/B_3^{\max}(0)$ спадает медленнее, чем при неоднородной намагниченности. Таким образом, неоднородное пространственное распределение захваченного магнитного потока в образце сильнее деформирует поле вокруг него. Согласно рис. 3,б ход кривой релаксации $B_3(t)$ проходит по экспоненте. Эту кривую можно описать как $B_3(t)/B_3(t=0) \approx 1 - 0,01 \ln t$. Для квазимонокристаллического образца в области сильных полей, когда подавляются междоменные слабые связи в образце, были отчетливо видны домены размерами 3—4 мм, разрешение микроскопа при радиальном сканировании было порядка 100 мкм. Также были исследованы радиальные рас-

пределения $B_3(r)$ для эпитаксиальных пленок, измеренные в режиме ZFC при температуре 77,4 К. Эти зависимости использовали для юстировки координатных столиков. Таким образом определяли степень параллельности сканирования образца по отношению к поверхности ПХ.

Л и т е р а т у р а

1. **Физические** свойства высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Д. М. Гинзберга М.: Мир, 1990.
2. **Rostami Kh. R.** A Method for Analyzing Physical Processes at the Vortex Front in HTSCs // Am. Mod. Phys. 2013. V. 2. N. 1. P. 21—33.
3. **Ростами Х. Р.** Физические процессы в высокотемпературных сверхпроводниках на границе раздела вихревых и мейснеровских областей // ФТТ. 2013. Т. 55. С. 1671—1684.
4. **Ростами Х. Р.** Поля размагничивания кристаллитов и способ измерения термодинамического поля квазимонокристаллических и поликристаллических тонких дисков $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. С. 716—725.
5. **Пат. 2007862 C1 RU.** Преобразователь код-ток / Х. Р. Ростами // Изобретения. 1994. № 3.
6. **Пат. 94038958 A1 RU.** Генератор тока / Х. Р. Ростами // Изобретения. 1996. № 20.
7. **Манторов В. В.** Интерпретация измерений эффекта Холла в неоднородном магнитном поле // Измерительная техника. 1994. № 4. С. 41—43; **Manторов V. V.** Interpretation of Hall effect measurements in nonuniform magnetic fields // Measurement Techniques. 1994. V. 37. N. 4. P. 433—436.
8. **Кучис Е. В.** Гальвано-магнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь. 1990.
9. **Голубев А. А. и др.** Прецизионный магнитометр // ПТЭ. 2008. № 5. С. 123—128.
10. **Оробей О. И. и др.** Магнитометр на датчике Холла // ПТЭ. 2003. № 2. С. 141—144.
11. **Антонов В. Г.** Средства измерений магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
12. **Иванов С. А. и др.** Зависимость экранирования сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ от скорости изменения магнитного поля // ФТТ. 1991. Т. 33. № 5. С. 1387—1391.
13. **Якубовский С. В. и др.** Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справ. пособие. М.: Радио и связь, 1990.
14. **Борисенко Н. А. и др.** Автоматизированный анализ экспериментальных данных с применением вейвлет преобразования // ПТЭ. 2003. № 2. С. 28—34.

Дата принятия 13.05.2014 г.