

## Динамика захваченных магнитных потоков в монокристаллах YBCO в малых полях

В.П. Тимофеев, А.А. Шабло

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: timofeev@ilt.kharkov.ua*

В.Ю. Монарха

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина*

Статья поступила в редакцию 17 июля 2009 г., после переработки 31 июля 2009 г.

Исследована динамика захваченных, в том числе локальных, магнитных потоков малой плотности в монокристаллах YBCO в области значительных термических флуктуаций вблизи сверхпроводящего фазового перехода. Впервые установлено существенное отличие хода изотермической релаксации намагниченности от квазилогарифмического, ранее наблюдаемого в сильных магнитных полях. В рамках простейшей модели термоактивированного крипа проведена оценка эффективного потенциала пиннинга в интервале близких к критической температур.

Досліджено динаміку захоплених, у тому числі локальних, магнітних потоків малої густини в монокристалах YBCO в області значних термічних флуктуацій поблизу надпровідного фазового переходу. Вперше встановлено суттєву відміну ходу ізотермічної релаксації намагнічування від квазілогарифмічного, якій раніше спостерігався у сильних магнітних полях. У межах найпростішої моделі термоактивованого крипу проведено оцінку ефективного потенціалу пінінгу в інтервалі близьких до критичної температур.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники (ВТСП и матричные изоляторы).

Ключевые слова: монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , релаксация намагниченности, двойниковые границы.

1. Большинство теоретических и экспериментальных работ по изучению структуры и динамики магнитных потоков в сверхпроводниках II рода, в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) направлено на выяснение механизмов, определяющих максимальные токонесящие способности в сильных магнитных полях [1]. При разработке высокочувствительных ВТСП сквид-датчиков, входных трансформаторов потока, болометров и других элементов сверхпроводниковой электроники исследование поведения магнитных вихрей в слабых магнитных полях ( $H \approx 1$  Э) и при близких к критической температурах становятся особенно актуальными. Динамика магнитных потоков, связанная с крипом и скачками вихрей, зависит от пиннинга на структурных дефектах образцов и определяется энергией термоактивации этих процессов. Скачки вихрей вносят существенный вклад в собственные шумы сверхпроводящих

чувствительных элементов, зависят от наличия и эффективности центров пиннинга в используемых ВТСП материалах.

Установлено, что в ВТСП сквидах существуют два основных источника низкочастотного шума: флуктуации критического тока джозефсоновских контактов и термоактивированное движение магнитных вихрей в материале, из которого изготовлен датчик [2]. Вероятность прыжков магнитных вихрей растет экспоненциально с увеличением температуры и уменьшением энергии пиннинга, поэтому микроструктура ВТСП материала и соответствующие энергии активации играют решающую роль в генерации низкочастотных шумов сквидов и, следовательно, определяют их чувствительность.

Цель настоящей работы — исследование динамики магнитных потоков (наведенных и захваченных, одно-

родных и локальных) в монокристаллах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $YBCO$ ) в слабых постоянных магнитных полях вблизи области сверхпроводящего фазового перехода. Для этого производилась регистрация изотермической релаксации магнитного момента, обусловленного наведенными мейсснеровскими токами или захваченными магнитными потоками в образце с помощью бесконтактной сквид-магнитометрии. Данный метод измерения обеспечивает необходимую чувствительность в эксперименте, полностью устраняет подготовительные операции над образцами и позволяет сохранить их исходную структуру. Использование высокочувствительных сквидов в качестве датчиков в магнитометре позволяет значительно уменьшить величину прикладываемых магнитных полей до очень малых значений ( $\approx 0,01-0,1$  Э), исследовать динамику слабых захваченных потоков и даже детектировать спонтанные магнитные моменты в сверхпроводниках.

Путем сравнения образцов различной кристаллической структуры выявлено влияние термоактивированной трансформации джозефсоновских слабых связей на эффективный потенциал центров пиннинга в системе однонаправленных границ двойникования. Для обеспечения возможности практического применения полученных результатов при разработке сверхпроводящей электроники азотного уровня охлаждения основные измерения проведены при температурах от 77 К до температур, близких к критическим.

2. В качестве основного объекта исследований были выбраны беспримесные ориентированные монокристаллические образцы  $YBCO$ . Необходимый для получения оптимального допирования, а следовательно, и максимальной критической температуры ( $T_c \approx 93$  К) отжиг в потоке кислорода при  $400^\circ\text{C}$  приводит к преобразованию тетрагональной структуры кристаллов в орторомбическую и образованию границ двойникования. Для исследования роли этих плоскостных дефектов на процессы пиннинга нами были отобраны монокристаллы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  двух типов: у одних однонаправленные границы двойникования ориентированы параллельно оси  $c$  кристалла по всей его толщине, а другие кристаллы содержали блоки разнонаправленных плоскостей двойникования. Исследуемые кристаллы имели размеры от  $1 \times 1$  мм и более и толщину около  $0,015-0,02$  мм. Для сравнения проведены измерения магнитных откликов и изотермической релаксации намагниченности монокристаллических образцов  $YBCO$  обоих типов в однородных полях, динамики магнитных потоков, захваченных в режиме охлаждения образца в заданном однородном магнитном поле (режим FC — field cooling), и динамики локальных захваченных полей.

Наиболее перспективные и наиболее исследуемые ВТСП материалы принадлежат к сверхпроводникам

II рода [1]. Магнитное поле способно проникать в них в виде абрикосовских вихрей, которые закрепляются на различных дефектах кристаллической структуры — центрах пиннинга. Под действием силы Лоренца, обусловленной, например, градиентом плотности вихрей или транспортным током, а также под воздействием термической активации, происходящей с вероятностью  $\exp(-U/kT)$ , вихри могут начать двигаться, возникнет диссипация, и сверхпроводник перейдет в резистивное состояние. Этими процессами и определяется критический ток, т.е. максимальный бездиссипативный ток в исследуемом сверхпроводящем материале. В приведенном выражении  $U$  — эффективная энергия активации скачков вихрей, фактически равная усредненной глубине потенциала пиннинга;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура образца.

В реальных сверхпроводниках за счет поверхностных и объемных дефектов, острых ребер и плоскостей двойникования, а также вследствие геометрически ограниченных размеров монокристаллов магнитное поле начинает проникать внутрь образца даже в слабых полях, при  $H \ll H_{c1}$ , особенно при температурах, близких к критическим [3]. Здесь  $H_{c1}$  — первое критическое поле идеального бездефектного сверхпроводника эллипсоидальной формы. Термоактивированный крип отдельных вихрей и их связок приводит к перераспределению и затуханию сверхтоков. В результате интегральный дипольный момент уменьшается, а усредненная намагниченность  $M$  сверхпроводящего образца начинает релаксировать во времени.

Данные по исследованию динамики магнитных потоков в сверхпроводниках используются для получения важнейших параметров механизма пиннинга вихрей в ВТСП [4]. При этом в простейшем случае эффективную глубину потенциала пиннинга можно оценить из измерений нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности во времени  $t$ :

$$S(t) = \frac{1}{M_0} \frac{dM}{d \ln t} = -\frac{T}{U}, \quad (1)$$

где  $M_0$  — начальное значение намагниченности, за которое при теоретических оценках обычно принимают намагниченность в критическом состоянии Бина [4]. Однако практически все опубликованные исследования по релаксации намагниченности ВТСП, обладающих различными кристаллическими структурами, проводились в сильных магнитных полях (порядка сотен эрстед или даже нескольких килоэрстед), когда существенную роль играют процессы взаимодействия в жесткой, хорошо сформированной решетке магнитных вихрей. При этом полученные экспериментальные данные очень чувствительны к ориентации поля относительно кристаллографических плоскостей исследуемого образца, а также линейных или плоскостных дефектов.

Как было показано в работе [5], с точки зрения теории коллективного пиннинга, в слабых магнитных полях реализуется крип невзаимодействующих вихрей. При этом скорость движения магнитного потока, длина корреляции  $L_0$  и потенциал пиннинга  $U_0$  не зависят от величины магнитного поля, а результаты измерений слабо чувствительны к отклонению магнитного поля  $H$  от направления оси  $c$  монокристалла YBCO. Кроме того, величина плотности критического тока, определяемая равенством удельных сил пиннинга и силы Лоренца  $J_c = U_0 c / \Phi_0 L_0$ , также не чувствительна к углу отклонения.

3. На начальном этапе исследований нами использована стандартная методика измерения намагниченности на постоянном токе по регистрации отклика радиочастотного сквид-градиентометра на наведенный магнитный момент образца в однородном поле соленоида [6]. Охлаждение образца и перевод его в сверхпроводящее состояние проводились в нулевом поле (по методу ZFC — zero field cooling), что более предпочтительно при исследовании температурной зависимости намагниченности. При дальнейших исследованиях изотермической релаксации намагниченности охлаждение исследуемого образца до температуры  $\approx 77$  K проводилось в выбранном малом магнитном поле (по методу FC), затем устанавливалась необходимая температура, поле отключалось, и регистрировалось изменение во времени намагниченности, обусловленной захваченными потоками.

На рис. 1 приведена температурная зависимость нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности  $S$ , обусловленной захваченными магнитными потоками, одного из исследуемых монокристаллов с однонаправленными плоскостями двойникования ( $T_{c\text{ onset}} = 93,5$  K) при температурах вблизи сверхпроводящего фазового перехода. Магнитное поле соленоида при охлаждении было направлено вдоль оси  $c$  монокристалла и по величине равно 120 А/м ( $\approx 1,5$  Э). При такой ориентации поле параллельно плоскостям двойникования кристалла, и пиннинг абрикосовских вихрей осуществляется наиболее эффективно. Подобные зависимости с хорошей степенью воспроизводимости были получены для ряда других монокристаллов YBCO оптимального уровня допирования. На вставке рис. 1 показана динамика намагниченности этого монокристалла во временном интервале от 10 до 2000 с. Для температур образца, близких к области фазового перехода, изотермическая релаксация намагниченности имеет начальный нелогарифмический ход со слабо выраженной динамикой, переходя затем к поведению, описываемому моделью Андерсона–Кима [4], а при больших временах видна область насыщения  $S$  в присутствии сильных термоактивированных флуктуаций. Подобное поведение

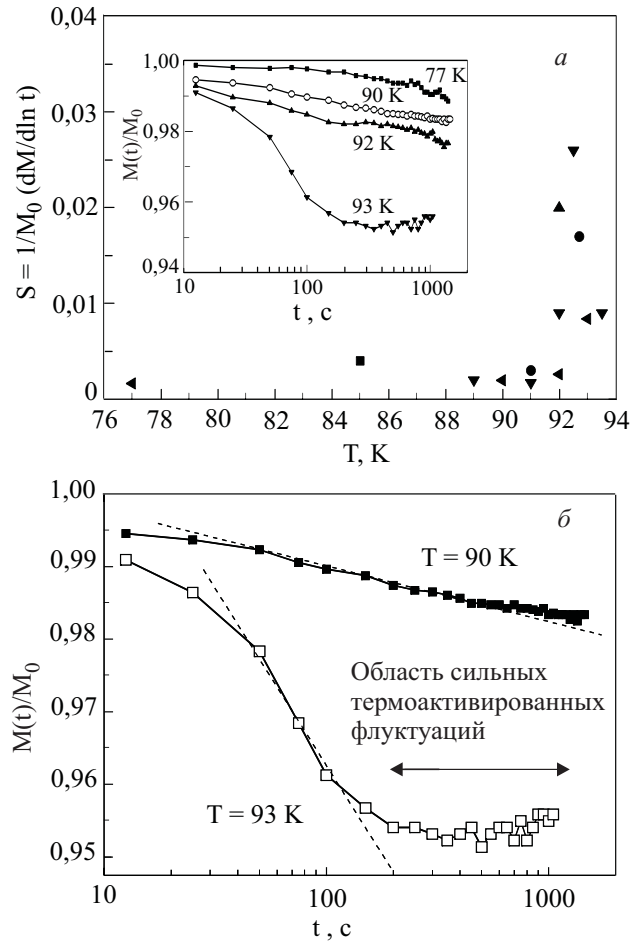


Рис. 1. а — Нормированная скорость изотермической релаксации намагниченности  $S$  монокристалла YBCO с однонаправленными границами двойникования при температурах, близких к критической  $T_{c\text{ onset}} = 93,5$  K. На вставке в полулогарифмическом масштабе приведены характерные зависимости  $M(t)/M_0$  для некоторых температур. б — Типичные зависимости  $M(t)$ . Пунктиром показаны линии, используемые для оценки скорости релаксации на квазилогарифмических участках  $M(t)/M_0$ . Область сильных термоактивированных флуктуаций указана двойной стрелкой.

намагниченности в сильных магнитных полях у похожих ВТСП образцов ранее не наблюдалось.

4. На динамику захваченных магнитных потоков, связанную с входением и выходом абрикосовских вихрей и их связок через геометрический край ВТСП образца, существенное влияние оказывает приграничный потенциальный барьер Бина–Левингстона [4]. Величина этого эффективного барьера значительным образом зависит от геометрии и степени шероховатости внешних границ исследуемого монокристалла. Для исключения влияния неконтролируемых краевых эффектов на релаксацию захваченных магнитных потоков нами были проведены эксперименты с монокристаллами YBCO, у которых с помощью миниатюрных соленоидов в режи-

ме FC создавались локальные захваченные поля (по некой аналогии с методикой, изложенной в [7]). Диаметр используемого соленоида 0,2 мм, что значительно меньше геометрических размеров монокристаллического образца (1,4×1,2 мм) в *ab*-плоскости (см. рис. 2). Это позволяет не только свести к минимуму влияние краевого барьера на динамику магнитных потоков, но и выбирать участки исследуемого образца с необходимой кристаллической структурой (например, крупные блоки с однонаправленными границами двойникования).

По результатам измерений нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности *S* в такой геометрии проведена оценка величины потенциала пиннинга с помощью выражения (1), которая согласуется с экспериментальными данными других авторов, полученными для подобных ВТСП образцов в сильных магнитных полях [4]. Как видно на рисунках, при малых начальных временах наблюдения намагниченность не изменяется или уменьшается очень медленно. При относительно малых температурах это можно объяснить экспоненциальным снижением термического крипа магнитного потока и присутствием не подавленных магнитным полем случайных джозефсоновских связей в областях границ двойникования [6].

Проведенные эксперименты с монокристаллическими образцами YBCO обоих типов дают основание полагать, что плоскости двойникования создают условия для формирования джозефсоновских сетей со случайно распределенными параметрами. Границы двойников включают слои CuO<sub>x</sub>, содержащие вакансии кислорода, которые расположены вдоль этих плоскостей и оказывают сильное локальное влияние на подавление сверхпроводящего параметра порядка, что приводит к понижению энергии захваченных двойниками вихрей. Поэтому плотность вихревых нитей на двойниках выше, чем в остальном кристалле [4,5]. Учитывая, что в поле ≈ 1 Э межвихревое расстояние (≈ 10<sup>3</sup> нм) сопоставимо с междвойниковым (≈ 10<sup>3</sup> нм) и глубиной проникновения поля в данном интервале температур (≈ 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> нм), можно ожидать, что все вихри локализованы на двойниках. В нашем эксперименте динамика этих сильно запиннигованных вихрей влияет на поведение магнитного отклика образца. Вслед за квазилогарифмическим падением намагниченности, при больших временах наблюдения зарегистрировано существование области сильных термических флуктуаций (рис. 1,б и 2,а). Это согласуется с ранее проведенным анализом [1], согласно которому, в отличие от классических низкотемпературных сверхпроводников, в ВТСП термические флуктуации вблизи фазового перехода могут играть существенную роль. Например, в купратах с типичной критической температурой *T<sub>c</sub>* ≈ 90–93 К

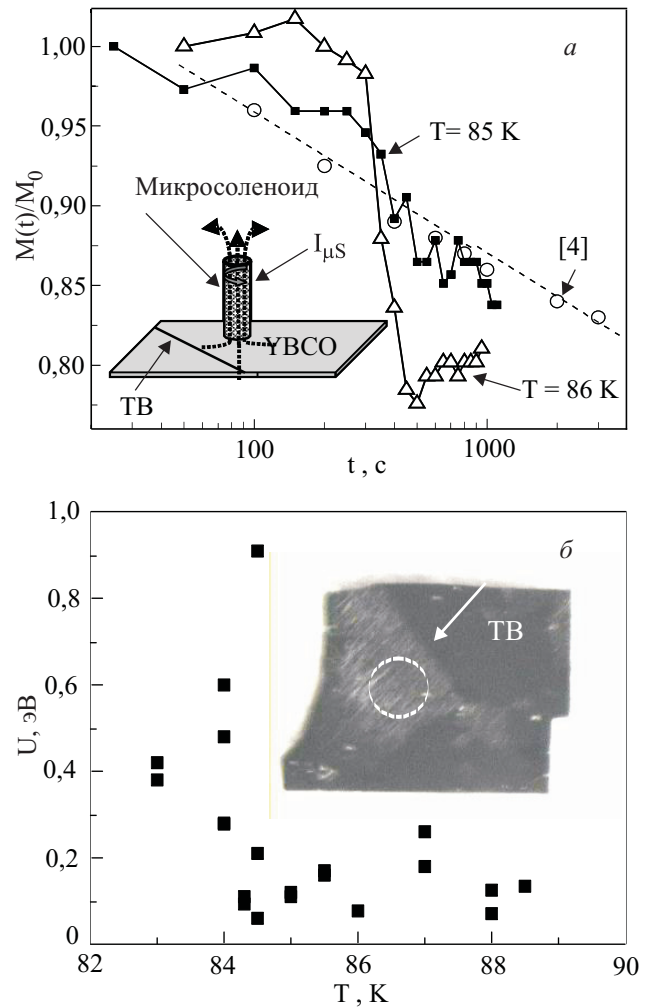


Рис. 2. а — Релаксация намагниченности, обусловленной захваченным в режиме FC локальным магнитным потоком микросоленоида ( $I_{\mu S} = 20$  мкА), при двух близких к критической ( $T_{c\text{onset}} \approx 89,1$  К) температурах (■ и △). Для сравнения приведены полученные в сильных полях результаты (R. Prozogov et al., 1995), взятые из [4] (○). На вставке показана схема эксперимента (ТВ — twin boundaries). б — Эффективная энергия термоактивации крипа магнитного потока малой плотности в исследованном диапазоне температур, оцененная по модели Андерсона–Кима (■). На вставке показана область с однонаправленными границами двойникования, их ориентация (ТВ) и соотношение геометрических размеров исследованного кристалла и сечения микросоленоида.

ширина флуктуационной области достигает 1 К, что соответствует параметру Гинзбурга  $Gi \approx 0,01$ .

5. Таким образом, нами впервые проведены исследования изотермической релаксации намагниченности монокристаллических YBCO образцов с различной кристаллической структурой в малых полях ( $H \approx 1$  Э и менее) [6], а также динамики локальных захваченных полей при температурах от  $T \approx 77$  К до температур, близких к критической. Показано существенное влияние кристаллической структуры (в первую очередь границ двойникования) монокристаллов



на скорость релаксации намагниченности, установлена возможность существенно нелогарифмического хода релаксации в присутствии сильных термических флуктуаций. В рамках модели термоактивированного крипа в монокристаллах с однонаправленными границами двойникования проведена оценка эффективного потенциала пиннинга в этих условиях.

Полученные результаты полезны и актуальны для понимания механизмов пиннинга в ВТСП, могут быть использованы на практике при проектировании высокочувствительных сверхпроводниковых приемных устройств для снижения собственных магнитных шумов ВТСП датчиков и повышения чувствительности приемной аппаратуры азотного уровня охлаждения.

Авторы выражают благодарность М.А. Оболенскому и А.В. Бондаренко за предоставленные образцы монокристаллов.

1. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
2. R. Kleiner, D. Koelle, F. Ludwig, and J. Clarke, *Proc. IEEE* **92**, 1534 (2004).
3. R. Liang, D.A. Bonn, W.N. Hardy, and D. Broun, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 117001 (2005).
4. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 911 (1996).
5. А.В. Бондаренко, А.А. Продан, М.А. Оболенский, Р.В. Вовк, Т.Р. Ароури, *ФНТ* **27**, 463 (2001) [*Low Temp. Phys.* **27**, 339 (2001)]; М.А. Оболенский, А.В. Бонда-

ренко, В.А. Шкловский, Р.В. Вовк, А.А. Продан, *ФНТ* **24**, 71 (1998) [*Sov. J. Low Temp. Phys.* **24**, 53 (1998)].

6. В.П. Тимофеев, А.В. Бондаренко, *ФНТ* **30**, 810 (2004) [*Low Temp. Phys.* **30**, 610 (2004)]; В.П. Тимофеев, А.Н. Омелянчук, Ю.Т. Петрусенко, *ФНТ* **31**, 1405 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 1067 (2005)].
7. С.И. Бондаренко, А.А. Шабло, В.П. Коверя, Д.Ю. Фомин, *Известия РАН. Серия Физическая*, **71**, 1165 (2007).

### The dynamics of trapped magnetic flux in YBCO single crystals in weak fields

V.P. Timofeev, A.A. Shablo, and V.Yu. Monarkha

The dynamics of low density trapped magnetic flux including the local ones are investigated in YBCO single crystals in the domain of strong thermal fluctuations near the superconducting phase transition. An essential difference from quasilogarithmic isothermal relaxation of the magnetization behavior observed early in high magnetic fields was established for the first time. The effective pinning potential at temperatures close to the critical ones was estimated within the framework of classic model of thermal activated creep.

PACS: **74.72.-h** Cuprate superconductors (high- $T_c$  and insulating parent compounds).

Keywords:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  single crystals, relaxation of magnetization, twin boundaries.