

Нарушение логарифмического хода релаксации намагниченности ВТСП с сильными центрами пиннинга

В.Ю. Монарха, 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*

Статья поступила в редакцию 16 мая 2011 г.

Экспериментально исследована динамика захваченных в малых постоянных полях, порядка земного, магнитных потоков в монокристаллах YBCO с сильными центрами пиннинга, образующимися в структуре однонаправленных границ двойникования. В области сильных термических флуктуаций вблизи сверхпроводящего фазового перехода впервые установлено существенное отличие хода изотермической релаксации намагниченности от логарифмического, ранее наблюдавшегося только в сильных магнитных полях. В рамках линейной модели термоактивированного крипа Андерсона–Кима проведена оценка эффективного потенциала пиннинга по данным эксперимента. Показано, что при близких к критической температурах обратная логарифмическая модель Зельдова лучше описывает падение намагниченности, особенно при больших временах измерений.

Експериментально досліджено динаміку захоплених у малих постійних магнітних полях, близьких до земного, потоків в монокристалах YBCO з сильними центрами пінінгу, які утворені односпрямованими межами двійнікування. У області значних термічних флуктуацій біля надпровідного фазового переходу вперше встановлено суттєву відмінність ходу ізотермічної релаксації намагнічування від логарифмічного, який раніш спостерігався тільки у сильних магнітних полях. У межах лінійної моделі термоактивованого крипу Андерсона–Кіма зроблено оцінку ефективного потенціалу пінінгу за експериментальними даними. Виявлено, що в інтервалі близьких до критичної температур зворотно-логіфімічна модель Зельдова краще описує падіння намагніченості, особливо при великих часах вимірювань.

PASC: 74.72.–h Купратные сверхпроводники.

Ключевые слова: монокристаллы YBa₂Cu₃O_{7-δ}, релаксация намагниченности, малые магнитные поля, границы двойникования, пиннинг.

Введение

Несмотря на огромное количество теоретических и экспериментальных работ по изучению структуры и динамики магнитных потоков в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) до настоящего момента отсутствует полное понимание механизмов пиннинга абрикосовских вихрей [1,2]. Большая часть исследований сконцентрирована на выяснении основных процессов взаимодействия вихревой решетки с ВТСП, определяющих предельные характеристики сверхпроводника в сильных магнитных полях. Область малых полей, порядка земного магнитного, и область температур, близких к критической (T_c) в нулевом поле, остается наименее изученной. Для разработки высокочувствительных

ВТСП сквид-датчиков, болометров, СВЧ резонаторов и других элементов сверхпроводниковой электроники азотного уровня охлаждения подобные исследования в слабых магнитных полях ($H \approx 1$ Э) в этой области температур становятся особенно актуальными.

Динамика магнитных потоков, связанная с крипом и скачками вихрей, зависит от пиннинга на структурных дефектах образцов и определяется энергией термоактивации этих метастабильных процессов. Скачки вихрей вносят существенный вклад в генерацию низкочастотных магнитных шумов, зависят от наличия и эффективности центров пиннинга используемых ВТСП материалов. Вероятность прыжков магнитных вихрей растет экспоненциально с ростом температуры и уменьшением силы пиннинга, поэтому микроструктура

ВТСП материала и соответствующие энергии активации играют решающую роль в динамике магнитных потоков.

В настоящей работе изложены результаты исследования динамики захваченных магнитных потоков малой плотности в беспримесных монокристаллических образцах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (далее в тексте YBCO) вблизи области сверхпроводящего фазового перехода. Для этого регистрировали изотермическую релаксацию магнитного момента, обусловленного потоками, захваченными в слабых постоянных магнитных полях (одиночные абрикосовские вихри и их связки). В результате сравнения образцов различной кристаллической структуры обнаружено влияние термоактивированной трансформации джозефсоновских слабых связей на эффективный пиннинг в системе однонаправленных границ двойникования (ГД).

Использованный бесконтактный магнитометрический метод измерения обеспечивал в эксперименте необходимую чувствительность ($\approx 8 \cdot 10^{-11}$ А·м² по магнитному моменту), приемлемую термостабилизацию измерительной камеры (≈ 10 мК), полностью устранял подготовительные операции над образцами и позволял сохранить их исходную структуру. Применение высокочувствительного ВЧ сквида в качестве датчика магнитометра позволило значительно расширить диапазон прикладываемых магнитных полей в область малых значений напряженности (до $\sim 0,1$ Э) и исследовать динамику слабых захваченных потоков в ВТСП.

Методика эксперимента и выбор образцов

В качестве основного объекта исследований были выбраны беспримесные ориентированные монокристаллические образцы YBCO. Исследуемые образцы имели размеры порядка 1×1 мм, а толщину около 0,015–0,02 мм. При этом главная кристаллографическая ось c перпендикулярна наибольшей плоскости (см. вставку на рис. 1,б). Необходимый для получения максимального значения T_c отжиг в потоке кислорода приводит к преобразованию тетрагональной структуры кристаллов в орторомбическую и, как следствие, к образованию плоскостей двойникования при снятии внутренних напряжений. Известно [1], что подобная перестройка структуры происходит и в поликристаллах, и в тонкопленочных ВТСП. Для исследования роли этих плоскостных дефектов на процессы пиннинга нами были отобраны монокристаллические образцы YBCO, у которых однонаправленные границы двойникования ориентированы параллельно оси c кристалла по всей его толщине, а степень блочности была минимальна.

Наиболее перспективные ВТСП материалы принадлежат к сверхпроводникам 2-го рода. Магнитное поле способно проникать в них в виде абрикосовских вих-

рей, которые закрепляются на различных дефектах кристаллической структуры (вакансии, дислокации, примеси, межблочные границы, границы двойникования и т.д.) — центрах пиннинга. Под действием силы Лоренца, обусловленной, например, градиентом плотности вихрей или транспортным током, а также под воздействием термической активации, происходящей с вероятностью $\sim \exp(-U/kT)$, вихри начинают квантовано перепрыгивать с одного центра пиннинга на ближайший соседний, возникнет диссипация, сверхпроводник переходит в резистивное состояние. Здесь: U — эффективная энергия активации скачков, фактически равная усредненной глубине потенциала пиннинга; k — постоянная Больцмана; T — температура образца. Эти процессы, связанные с движением абрикосовских вихрей и их связок, и определяют плотность критического тока образца (J_c), максимальный бездиссипативный ток в исследуемом сверхпроводящем материале.

Для изучения динамики магнитных потоков, связанных с влиянием объемных центров пиннинга YBCO монокристаллов, измерения проводили в режиме охлаждения образца в заданном однородном магнитном поле соленоида (режим FC — field cooling). При выключении поля (или при его уменьшении) абрикосовские вихри захватываются различными дефектами по всему монокристаллу, роль приповерхностных энергетических барьеров в динамике магнитных потоков минимальна. Термоактивированный крип отдельных вихрей и их связок приводит к перераспределению и затуханию сверхтоков, интегральный дипольный момент начинает уменьшаться, а усредненная намагниченность M сверхпроводящего образца релаксировать [4].

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

$$S(t) = 1 / M_0 (dM/d \ln t) = -kT/U, \quad (1)$$

где M_0 — начальное значение намагниченности, за которое при теоретических оценках обычно принимают намагниченность в критическом состоянии Бина. Однако практически все опубликованные исследования по релаксации намагниченности ВТСП различных кристаллических структур проводили в сильных магнитных полях (порядка нескольких кЭ), 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, его 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 наклона H .

Результаты экспериментов и их обсуждение

В процессе проведения исследований нами использована стандартная методика измерения намагниченности по регистрации отклика радиочастотного сквид-градиентометра на наведенный в однородном постоянном магнитном поле (H_z) соленоида магнитный момент образца [6]. При изучении особенностей сверхпроводящих фазовых переходов и изотермической релаксации намагниченности охлаждение испытываемых образцов (от температуры ≈ 150 К до минимальной ≈ 30 – 50 К) производили в заданном малом магнитном поле по методу FC (field cooling). Затем поле выключали, отогревали монокристалл (со скоростью $\approx 0,2$ К/мин) и регистрировали зависимость намагниченности, обусловленной захваченными потоками, от температуры $M(T)$ — сверхпроводящий фазовый переход образца. При этом монокристалл нагревался до максимальной температуры $T \approx 150$ К.

Далее измеряли изотермическую релаксацию намагниченности $M(t)$. Для этого включали поле соленоида, начиналось охлаждение образца с умеренной

скоростью, устанавливалась и стабилизировалась необходимая выбранная температура измерительной камеры, после этого ток соленоида отключали ($H = 0$) и сразу же производили регистрацию уменьшения во времени намагниченности $M(t)$, обусловленной крипом захваченных потоков.

На рис. 1,а. приведена динамика изотермической релаксации намагниченности $M(t)$, нормированной на ее начальное значение M_0 , одного из исследуемых монокристаллов с однонаправленными плоскостями двойникования при различных температурах вблизи сверхпроводящего фазового перехода ($T_c^{\text{onset}} = 88,8$ К). Магнитное поле соленоида при охлаждении образца было направлено вдоль оси c монокристалла и равно 80 А/м (≈ 1 Э). При такой ориентации поле параллельно плоскостям ГД кристалла, и наиболее эффективно осуществляется пиннинг абрикосовских вихрей. Подобные зависимости с хорошей степенью воспроизводимости были получены для ряда других монокристаллов YBCO оптимального уровня насыщения кислородом. На рис. 1,б экспериментальные данные для тех же температур показаны в полулогарифмическом масштабе. Хорошо видно, что линейная модель Андерсона–Кима не может описать поведение $M(t)$ в широком временном интервале и при всех температурах. На вставке, в качестве иллюстрации, приведена нормированная зависимость $M(T)/M_0$ — сверхпроводящий фазовый переход этого монокристалла.

Для нижнего интервала температур образца ($T/T_c \leq 0,8$) изотермическая релаксация намагниченности имеет начальный ход со слабо выраженной динамикой, переходя затем к квазилогарифмическому поведению, описываемому линейной моделью Андерсона–Кима [4]. Однако при более высоких температурах и при больших временах регистрации характер поведения $M(t)$

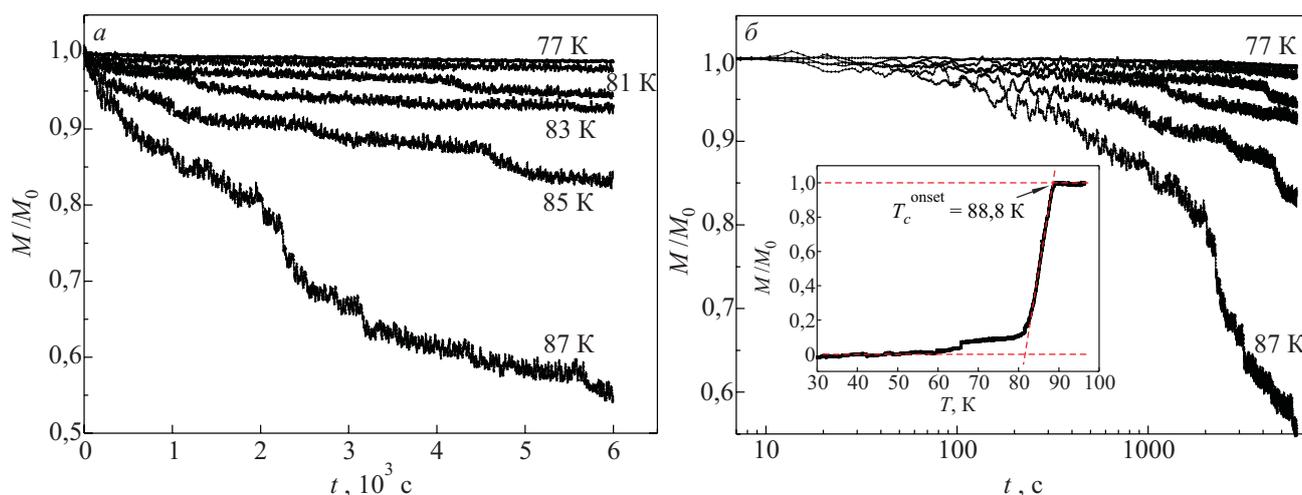


Рис. 1. Изотермическая релаксация намагниченности $M(t)$, нормированная на свое начальное значение M_0 , одного из исследованных YBCO монокристаллов с однонаправленными границами двойникования (а). Экспериментальные данные $M(t)/M_0$, построенные в полулогарифмическом масштабе (б). На вставке показан сверхпроводящий фазовый переход исследованного образца,

заметно меняется. Вблизи области фазового перехода ($T \rightarrow T_c$), в присутствии сильных термических флуктуаций, динамика вихрей начинает походить на режим термоактивированного течения потока (TAFF — thermally assisted flux flow) [1]. Подобное поведение $M(t)$ в таких слабых магнитных полях ранее не наблюдалось.

Как видно на рисунках, при малых начальных временах наблюдения намагниченность не изменяется, или падает 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]. По мере увеличения температуры вероятность крипа захваченных потоков возрастает, релаксация $M(t)$ становится заметной во временном интервале, порядка нескольких сотен секунд с начала регистрации. При $T \rightarrow T_c$ сильные термические флуктуации вызывают гигантский крип вихрей и их связок, наблюдается динамика захваченных потоков, близкая к режиму TAFF.

Границы двойников включают CuO_x слои, содержащие вакансии кислорода, расположенные вдоль их плоскостей и оказывающие локальное сильное влияние на подавление сверхпроводящего параметра порядка, приводя к понижению энергии активации крипа захваченных вихрей. Поэтому плотность вихревых нитей на двойниках выше, чем в остальном кристалле. Учитывая, что в поле ≈ 1 Э межвихревое расстояние ($\approx 10^3$ нм) сопоставимо с периодом ГД ($\approx 10^3$ нм) и глубиной проникновения поля в данном интервале температур ($\approx 10^4$ – 10^5 нм), можно ожидать, что все вихри локализованы на двойниках. Вслед за квазилогарифмическим падением намагниченности при больших

временах наблюдения зарегистрировано существование области сильных тепловых флуктуаций. 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. При этом параметр Гинзбурга достигает величины $Gi \approx 0,01$.

По результатам измерений изотермической релаксации намагниченности произведена оценка ее усредненной нормированной скорости S в температурном интервале $70 \text{ K} \leq T \leq 87 \text{ K}$ (см. рис. 2,а) с помощью выражения (1). Сделанная оценка S по величине не противоречит экспериментальным данным других авторов, полученным для подобных ВТСП образцов, но в сильных магнитных полях [3,4]. Однако для верхнего температурного интервала, в связи с заметным отклонением от логарифмического хода (особенно выраженным при больших временах наблюдения, $t \geq 1000$ с), линейная модель Андерсона–Кима, для которой нормированная энергия активации крипа связана с током соотношением $U/U_0 = (1 - J/J_c)$, становится плохо применима. В этом выражении U_0 — усредненная глубина энергетического потенциала центров пиннинга в отсутствие тока и термических флуктуаций. Для описания экспериментальных данных в рассматриваемых режимах нами предпринята попытка использовать обратную логарифмическую, $U/U_0 = \ln(J_c/J)$, модель Зельдова [4,7]. Согласно этой модели ток в сверхпроводнике связан с U_0 и макроскопическим временным параметром t_0 соотношением

$$J/J_c = \exp \left\{ - (kT/U_0) \ln (t/t_0) \right\}. \quad (2)$$

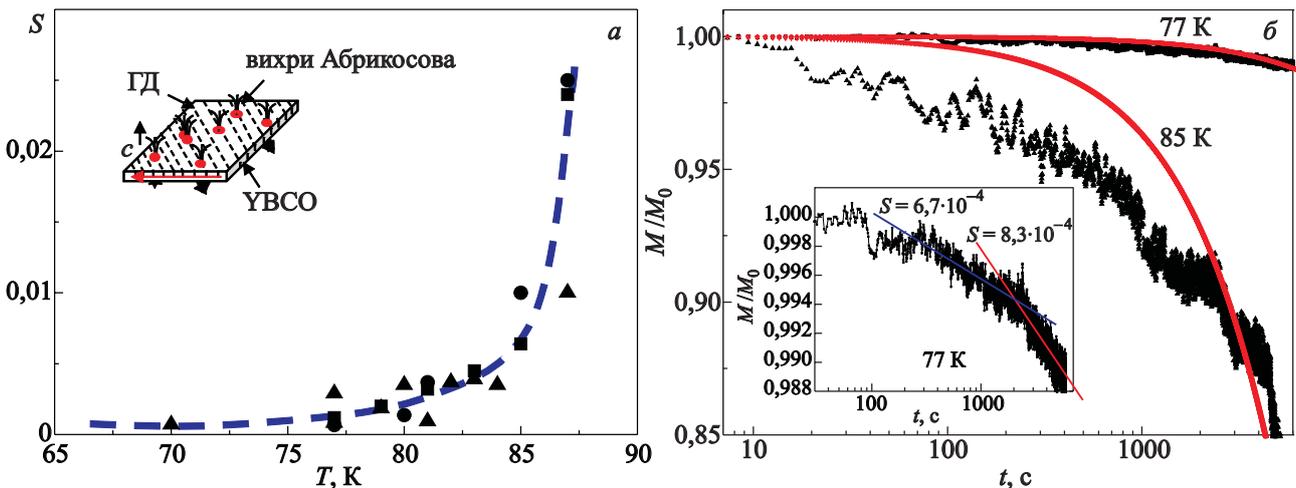


Рис. 2. Нормированная скорость изотермической релаксации намагниченности S , оцененная с помощью линейной по току модели Андерсона–Кима. На вставке схематично показаны особенности структуры используемых образцов и картина пиннинга абрикосовских вихрей (а). Типичные зависимости $M(t)/M_0$ для двух выбранных температур с наложенными расчетными кривыми по соотношению (2). Для $T = 77 \text{ K}$ константы модели Зельдова: $kT/U_0 = 1,1 \cdot 10^{-3}$ и $t_0 = 80 \text{ с}$. Для $T = 85 \text{ K}$: $kT/U_0 = 8 \cdot 10^{-3}$ и $t_0 = 300 \text{ с}$. На вставке показана возможная оценка S с помощью простейшей линейной модели (б).

А поскольку M определяется токами, наведенными в образце, то $S = -kT/U_0$.

В качестве иллюстрации на рис. 2,б показаны экспериментальные точки, снятые по измерению релаксации намагниченности монокристалла для двух достаточно сильно отличающихся температур (77 и 85 К), и кривые, описывающие эти данные согласно обратной логарифмической модели Зельдова. Как видно на рисунке, для нижнего диапазона исследованных температур поведение $M(t)$ хорошо согласуется с этой моделью во всем временном интервале проведенных измерений. Для $T \rightarrow T_c$ выбранная модель описывает ход экспериментальной кривой с приемлемой точностью при больших временах наблюдения.

Заключение

Впервые проведены исследования динамики магнитных потоков, захваченных в малых полях ($H \approx 1$ Э) в монокристаллических YBCO образцах с упорядоченной кристаллической структурой границ двойникования при температурах, близких к критической. Показано существенное влияние кристаллической структуры (в первую очередь ГД) монокристаллов на скорость релаксации намагниченности S . Установлена возможность существенно нелогаарифмического хода изотермической релаксации $M(t)$, в рамках различных моделей термоактивированного крипа, проведена оценка эффективного потенциала пиннинга в этих условиях. Продемонстрировано, что обратная логарифмическая модель термоактивированного крипа Зельдова хорошо описывает поведение намагниченности YBCO монокристаллических образцов в широком временном интервале при этих температурах.

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. Rongchao Ma, *arXiv:cond-mat/1101.0442v1 [cond-mat.supr-con]* 3 Jan 2011.
3. D. Miu, L. Miu, G. Jakob, and H. Adrian, *Physica C* **460-462**, 1243 (2007).
4. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 911 (1996); В.П. Тимофеев, А.А. Шабло, В.Ю. Монарха, *ФНТ* **35**, 1192 (2009) [*Low Temp. Phys.* **35**, 926 (2009)].
5. А.В. Бондаренко, А.А. Продан, М.А. Оболенский, Р.В. Вовк, Т.П. Ароури, *ФНТ* **27**, 463 (2001) [*Low Temp. Phys.* **27**, 339 (2001)]; М.А. Оболенский, А.В. Бондаренко, В.А. Шкловский, Р.В. Вовк, А.А. Продан, *ФНТ* **24**, 71 (1998) [*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 и Ю.Т. Петрусенко, *ФНТ* **31**, 1405 (2005) [*Low Temp. Phys.* **31**, 1067 (2005)].
7. E. Zeldov, N. Amer, G. Koren, A. Gupta, M. McElfresh, and R. Gambino, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 680 (1990).

Breach of the logarithmic magnetic relaxation behavior of HTSC with strong pinning centers

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

The dynamics of magnetic flux trapped in low constant fields are investigated experimentally in YBCO single crystals with strong pinning centers that are formed by the unidirectional twin boundary system. It is found that within the domain of strong thermal fluctuations in the vicinity of the superconducting phase transition the logarithmic isothermal relaxation of magnetization differs essentially from the quasi-logarithmic one previously observed only at high magnetic fields. Using the of Anderson–Kim linear model of thermal activated creep the effective pinning potential was estimated. It is shown that the Zeldov inverse logarithmic model offers a much correct description of magnetization drop much at temperatures close to the critical ones, especially for long measurement times.

PASC: **74.72.-h** Cuprate superconductors.

Keywords: YBa₂Cu₃O_{7-δ} single crystals, relaxation of magnetization, low magnetic fields, twin boundaries, pinning.