

Особенности пиннинга магнитных потоков, захваченных монокристаллами YBCO в слабых постоянных полях

В.Ю. Монарха, В.А. Пащенко, В.П. Тимофеев

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины

пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина

E-mail: monarkha@mail.ru,

timofeev@ilt.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 17 июля 2012 г., после переработки 11 сентября 2012 г.

Экспериментально исследована динамика абрикосовских вихрей и их связок, захваченных в малых постоянных магнитных полях, порядка земного. В монокристаллических образцах YBCO с сильными центрами пиннинга изучены особенности изотермической релаксации намагниченности при различной ориентации кристаллов. Полученные значения нормированной скорости релаксации S позволили оценить эффективный потенциал пиннинга U в объеме YBCO образца и его зависимость от температуры, что позволяет рассчитать величину плотности критического тока J_c . Проведено сопоставление полученных значений S с результатами испытаний подобных сверхпроводников в сильных магнитных полях. Для сравнения различных методик оценки J_c сняты зависимости $M(H)$, связывающие ширину петли с критическим током. При исследовании петель намагниченности выбранных монокристаллов определены значения важнейших основных параметров (полей начала проникновения вихрей H_p и первых критических H_{c1}), которые учитывают геометрическую конфигурацию образцов.

Експериментально досліджено динаміку абрикосівських вихорів та їх зв'язок, які захоплені у малих постійних магнітних полях, порядку земного. В монокристалічних зразках YBCO з сильними центрами піннінгу вивчено особливості ізотермічної релаксації намагніченості при різній орієнтації кристалів. Отримані значення нормованої швидкості релаксації S дозволяють оцінити ефективний потенціал піннінгу U в об'ємі YBCO зразка та його залежності від температури, що дозволяє розрахувати величину густини критичного струму J_c . Проведено порівняння отриманих значень S з результатами досліджень схожих надпровідників у сильних магнітних полях. Для порівняння різних методів оцінки J_c зняті залежності $M(H)$, які зв'язують ширину петлі з критичним струмом. При дослідженні петель намагніченості обраних монокристалів встановлені значення найважливіших основних параметрів (полів початку проникнення вихорів H_p та перших критичних H_{c1}), які зважають на геометричну конфігурацію зразків.

PACS: 74.72.-h Купратные сверхпроводники;
74.25.Na Магнитные свойства сверхпроводников;
74.25.Wx Пиннинг вихрей в сверхпроводниках.

Ключевые слова: YBa₂Cu₃O_{7-x} монокристаллы, пиннинг вихрей Абрикосова, релаксация намагниченности.

1. Введение

Экспериментальные исследования динамики магнитных потоков в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) в широком диапазоне температур и магнитных полей важны как для понимания основных механизмов пиннинга и крипа вихрей, так и для прикладных целей при разработке сверхпроводниковой электроники. В настоящий момент область малых по-

стоянных полей, порядка земного магнитного ($H \approx 1$ Э), и диапазон температур, близких к критической T_c , остаются наименее изученными [1]. Движение магнитных потоков, связанное с крипом и скачками абрикосовских вихрей и их связок, зависит от пиннинга на структурных дефектах образцов и определяется энергией термоактивации указанных метастабильных процессов. Вероятность прыжков магнитных вихрей растет экспоненциально с увеличением температуры T и

снижением глубины эффективного потенциала пиннинга U , поэтому микроструктура ВТСП материала и соответствующие энергии активации играют решающую роль в динамике магнитных потоков [2].

Скачки вихрей вносят существенный вклад в генерацию низкочастотных магнитных шумов ВТСП и устройств на их основе и зависят от наличия и эффективности центров пиннинга используемых сверхпроводящих материалов. При разработке ВТСП сквид-датчиков, детекторов, болометров, СВЧ резонаторов и других элементов сверхпроводниковой электроники азотного уровня охлаждения подобные исследования становятся особенно актуальны, поскольку указывают пути для повышения чувствительности приборов данного класса.

В настоящей работе приведены результаты исследований динамики захваченных магнитных потоков малой плотности в беспримесных монокристаллических образцах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (далее YBCO) в области высоких температур, главным образом вблизи сверхпроводящего фазового перехода ($0,5 \leq T/T_c < 0,99$). Проведена регистрация изотермической релаксации намагниченности $M(t)$, с помощью линейной модели термоактивированного крипа Андерсона–Кима сделаны оценки усредненного эффективного потенциала пиннинга U . Выявлено влияние термоактивированной трансформации джозефсоновских слабых связей в системе однонаправленных границ двойниковогоания (ГД) на эффективный пиннинг в образцах различной кристаллической структуры. Проведены сравнительные измерения петель намагниченности $M(H)$ монокристаллических образцов в относительно малых полях ($H \leq 300$ Э).

2. Постановка эксперимента

В качестве основного объекта исследований были выбраны беспримесные ориентированные монокристаллические образцы YBCO с типичными размерами порядка 1×1 мм и толщиной вдоль основной кристаллографической оси c около $0,015$ – $0,02$ мм. 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 границ двойниковогоания. Известно [3], что подобная перестройка структуры происходит и в поликристаллах, и в тонкопленочных ВТСП. Для исследования влияния этих плоскостных дефектов на динамику магнитных потоков и процессы пиннинга нами были отобраны монокристаллические образцы YBCO, у которых однонаправленные границы двойниковогоания ориентированы параллельно оси c кристалла по всей его толщине, а степень блочности, участков с другой ориентацией ГД, была минимальна.

Примененный бесконтактный сквид-магнитометрический метод измерения намагниченности монокристаллических образцов обеспечивает в эксперименте необходимую чувствительность по магнитному моменту ($\Delta m \approx 8 \cdot 10^{-8}$ эме или $8 \cdot 10^{-11}$ А·м²), приемлемую термостабилизацию измерительной камеры ($\Delta T \approx 20$ мК), полностью устраняет подготовительные операции над образцами и позволяет сохранить их исходную структуру.

Магнитное поле в купратных ВТСП проникает и захватывается в виде абрикосовских и джозефсоновских вихрей, которые закрепляются на различных центрах пиннинга. Под воздействием термической активации, происходящей с вероятностью $\sim \exp(-U/kT)$, вихри приходят в движение. Начинается крип магнитных потоков с первоначальных центров пиннинга на ближайшие соседние, возникает диссипация. Процессы, связанные с движением абрикосовских вихрей и их связок, а не достижение токов распаривания, и определяют плотность критического тока образца J_c .

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 переходе образца в сверхпроводящее состояние большая часть магнитного поля выталкивается за границы образца, а часть в виде абрикосовских вихрей и их связок захватывается различными дефектами по всему монокристаллу и закрепляется на наиболее глубоких центрах пиннинга. При выключении поля (или при его скачкообразном уменьшении) мейсснеровские экранирующие токи могут компенсироваться и остаточная намагниченность ВТСП определяется захваченными вихрями в объеме. Роль приповерхностных энергетических барьеров (например, барьера Бина–Левингстона) в динамике магнитных потоков в этом случае минимальна. Термоактивированный крип вихрей и их связок приводит к перераспределению и затуханию объемных сверхтоков, интегральный дипольный момент начинает уменьшаться, усредненная намагниченность M сверхпроводящего образца релаксирует [1]. При этом в простейшем случае, используя линейную модель Андерсона–Кима, эффективную глубину U потенциала пиннинга можно оценить по измерениям нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности:

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

где M_0 — начальное значение намагниченности, за которое при теоретических оценках обычно принимают намагниченность в критическом состоянии Бина, k — постоянная Больцмана, t — время. Большая часть опубликованных исследований механизмов пиннинга и релаксации намагниченности ВТСП различных кристаллических структур проводились в сильных магнитных

полях (порядка десятков килоэрстед), когда существенную роль играют процессы взаимодействия в жесткой, хорошо сформированной решетке магнитных вихрей. При этом слабые джозефсоновские связи подавлены, а экспериментальные данные очень чувствительны к ориентации поля относительно главных кристаллографических направлений исследуемого образца (a, b, c) и наличию линейных или плоскостных дефектов. Область малых постоянных магнитных полей и начальные участки кривых намагниченности остаются наименее изученными, что обусловлено падением магнитных откликов в этих диапазонах H и сильным влиянием электромагнитных наводок.

Как показано в работе [4], 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 не зависят от величины магнитного поля, а результаты измерений слабо чувствительны к отклонению магнитного поля от направления главных кристаллографических осей монокристалла YBCO. Кроме того, величина плотности критического тока, определяемая равенством удельных сил пиннинга и силы Лоренца $J_c = U c / \Phi_0 L_0$ (Φ_0 — квант магнитного потока), также не чувствительна к углу между кристаллографической осью, плоскостью ГД и H .

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В процессе экспериментальных исследований использована стандартная методика измерения намагниченности по регистрации отклика радиочастотного сквид-градиентометра [2]. При измерениях $M(T)$ охлаждение исследуемых образцов (от $T \approx 150$ К до минимальной $T_{\min} \approx 30\text{--}50$ К) проводилось в заданном малом магнитном поле по методу FC. Затем поле выключалось, производился отогрев монокристалла (со скоростью

$dT/dt \approx 0,2$ К/мин) и регистрировалась зависимость намагниченности, обусловленной захваченными потоками, от температуры $M(T)$ (режим FCW — field cooled warming).

Далее измерялась изотермическая релаксация намагниченности $M(t)$ в интересующей нас области температур. Для этого включалось поле соленоида ($H \approx 1$ Э), начиналось охлаждение образца в режиме FC с умеренной скоростью, устанавливалась и стабилизировалась необходимая выбранная температура измерительной камеры. После этого ток соленоида отключался ($H = 0$) и одновременно начиналась регистрация уменьшения во времени намагниченности $M(t)$, обусловленной крипом захваченных потоков.

На рис. 1(а) в качестве типичного примера приведена динамика нормированного значения изотермической релаксации намагниченности $M(t)$ одного из исследуемых монокристаллов при различных температурах, в том числе вблизи сверхпроводящего фазового перехода ($T_c^{\text{onset}} = 90,2$ К). Подобные зависимости с хорошей степенью воспроизводимости были получены для ряда других монокристаллов YBCO оптимального уровня насыщения кислородом. При этом поле было параллельно кристаллическим плоскостям ($H \parallel a, b$ или $H \parallel c$). Для интервала температур образца $T/T_c \leq 0,8$ изотермическая релаксация намагниченности имеет начальный ход со слабовыраженной динамикой, переходя затем к квазилогарифмическому поведению. При относительно малых температурах это можно объяснить экспоненциальным снижением термического крипа магнитного потока и присутствием неподавленных магнитным полем случайных джозефсоновских связей в областях ГД [2]. Однако при более высоких температурах и при больших временах регистрации характер поведения $M(t)$ заметно меняется. Вблизи области фазового перехода ($T \rightarrow T_c$) в присутствии

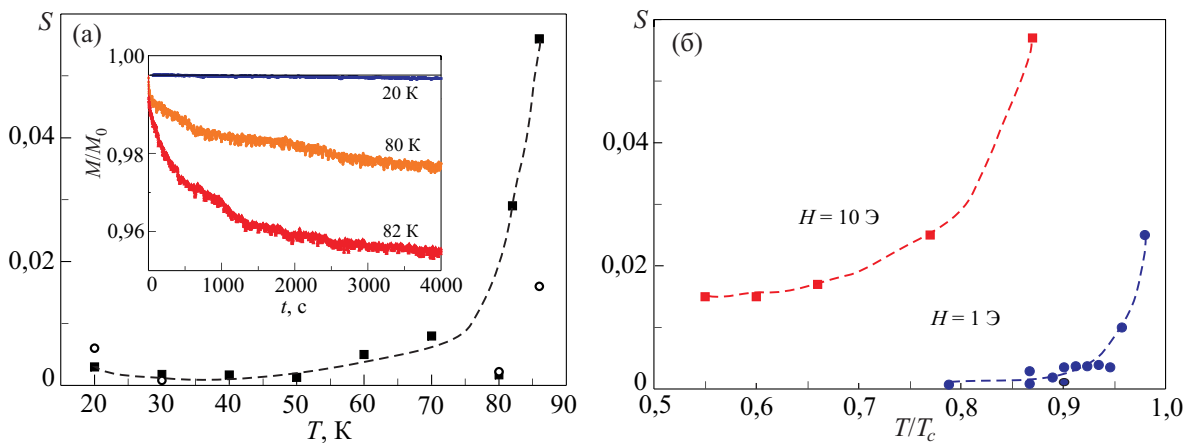


Рис. 1. Температурная зависимость усредненной нормированной скорости изотермической релаксации намагниченности S одного из исследованных YBCO монокристаллов ($H \parallel a, b$). На вставке показаны кривые релаксации $M(t)$ для некоторых температур, нормированные на свое начальное значение M_0 (а); экспериментальные данные $S(T/T_c)$ для значений магнитного поля 10 Э [5] и 1 Э ($H \parallel c$) (б).

сильных термических флуктуаций крип вихрей возрастает и начинает переходить в режим термоактивированного течения потока (TAFF — thermally assisted flux flow) [4]. На рис. 1(б) приведено сопоставление нормированной скорости изотермической релаксации, полученной в наших экспериментах, с данными работы [5], где магнитное поле было существенно больше ($H = 10$ кЭ) и оказало сильное влияние на эффективный потенциал пиннинга. При ориентации $H \parallel c$ поле параллельно плоскостям ГД кристалла и наиболее эффективно осуществляется пиннинг невзаимодействующих абрикосовских вихрей.

Кривая намагниченности $M(H)$ идеальных сверхпроводников второго рода, у которых отсутствуют примеси, дефекты и другие центры пиннинга, обратима и имеет пик при $H \approx H_{c1}$, плавно спадая с ростом магнитного поля к нулю при $H \approx H_{c2}$ (H_{c1} , H_{c2} — первое и второе критические поля). Однако при наличии дефектов кристаллической структуры ВТСП зависимость $M(H)$ становится необратимой, появляется гистерезис. У типичных монокристаллических образцов YBCO наличие центров пиннинга абрикосовских вихрей приводит к трансформации кривой $M(H)$ в петлю намагниченности.

Ширина петли намагниченности ВТСП ΔM пропорциональна усредненной по объему образца эффективной глубине потенциала пиннинга U . Согласно модели критических состояний Бина, величина плотности критического тока сверхпроводника J_c связана с геометрическими параметрами исследуемого образца и ΔM . Величину J_c оценивают, например, соотношением: $J_c = 15 \Delta M/R$, где R — функция геометрии образца, учитывающая размагничивающий фактор и зависимость критического тока от магнитного поля [6]. Близкое по форме выражение для $J_c = 20 \Delta M/[a(1-a/3b)]$, где a, b ($a < b$) — размеры поперечного сечения образца, приведено в работе [7].

В качестве сравнительных испытаний, использующих две различные методики исследования динамики

магнитных потоков в ВТСП, нами проведены измерения магнитных свойств монокристаллических образцов YBCO с помощью коммерческой установки MPMS (Quantum Design).

На рис. 2(а) приведена типичная зависимость $M(H)$ одного из исследованных монокристаллов YBCO при $T = 20$ К. Начальная часть кривой намагниченности, показанная на вставке, позволяет оценить поле начала проникновения H_p и первое критическое поле H_{c1} , которые сложно рассчитать со строгим учетом всех геометрических параметров образца и краевых эффектов. Петля намагниченности $M(H)$ асимметрична относительно оси абсцисс H , что указывает на сильное влияние поверхностного барьера Бина–Левингстона и термоактивированного коллективного крипа абрикосовских вихрей и их связок [8]. Применить модель критического состояния Бина для оценки J_c по данным $M(H)$, снятым в малых полях в выбранном диапазоне температур, не представляется возможным. Поэтому ранее проведенные оценки эффективного потенциала пиннинга из измерений $M(t)$ выступают в качестве определяющей методики. Рисунок 2(б) иллюстрирует влияние релаксации намагниченности, обусловленной вихрями, захваченными при охлаждении образца в поле 10 Э. Это условие соответствует начальному участку петли гистерезиса и, как следует из литературных данных, практически не исследовано.

4. Заключение

Впервые показано существенное влияние кристаллической структуры (в том числе однонаправленных границ двойникования) монокристаллов YBCO на скорость релаксации намагниченности, обусловленной захваченными магнитными потоками в малых постоянных полях ($1 \text{ Э} \leq H \leq 10 \text{ Э}$) в широком временном интервале при температурах, близких к критическим T_c .

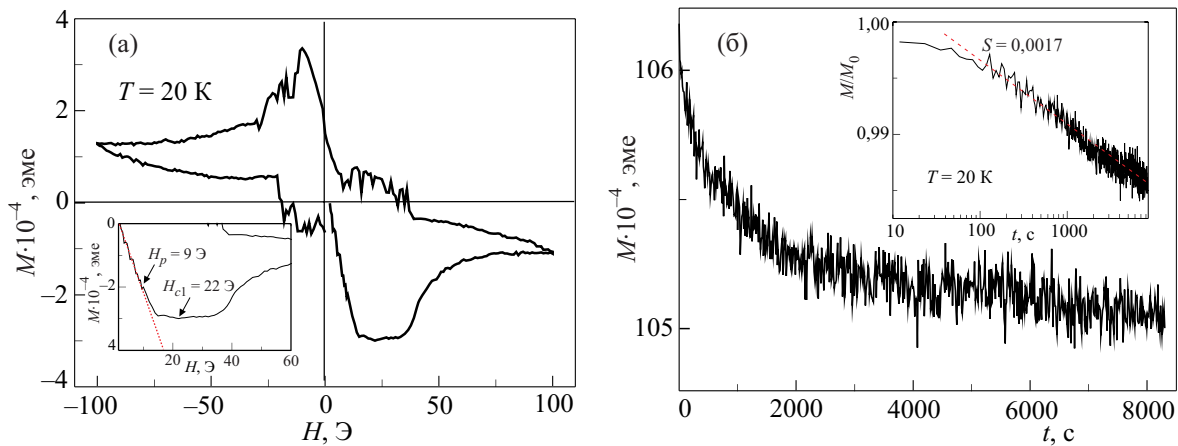


Рис. 2. Типичная зависимость $M(H)$ одного из исследованных монокристаллов YBCO для $T/T_c = 0,22$. На вставке показан начальный участок намагниченности образца (а); изотермическая релаксация намагниченности, снятая при той же температуре ($H = 10$ Э). На вставке показана оценка значения S по линейной модели Андерсона–Кима (б).

Полученные результаты позволяют по-новому оценить динамику магнитных потоков, захваченных в режиме FC, обусловленную существенным ростом эффективных потенциалов пиннинга при столь малых плотностях потоков. Полученные результаты могут быть полезны при исследованиях по повышению чувствительности приемной аппаратуры азотного уровня охлаждения, для которой характерна работа с охлаждением в магнитном поле Земли.

1. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 911 (1996); D.A. Lotnyk, R.V. Vovk, M.A. Obolenskii, A.A. Zavgorodniy, J. Kovac, V. Antal, M. Kanuchova, M. Sefcikova, P. Diko, A. Feher, and A. Chreoneos, *J. Low Temp. Phys.* **161**, 387 (2010).
2. 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)]; В.П. Тимофеев, А.А. Шабло, В.Ю. Монарха, *ФНТ* **35**, 1192 (2009) [*Low Temp. Phys.* **35**, 926 (2009)].
3. 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)].
4. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
5. D. Miu, L. Miu, G. Jakob, and H. Adrian, *Physica C* **460–462**, 1243 (2007).
6. И.А. Руднев, Б.П. Михайлов, П.В. Бобин, *Письма в ЖТФ* **31**, 88 (2005).
7. D. Yazici, B. Ozcelik, and M.E. Yakinci, *J. Low Temp. Phys.* **163**, 370 (2011).
8. L. Krusin-Elbaum, L. Civale, V.M. Vinokur, and F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2280 (1992).

Pinning features of magnetic flux trapped by YBCO single crystals in weak dc fields

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

The dynamics of Abrikosov vortices and bundles was experimentally investigated in Earth's magnetic field range. Isothermal relaxation features in YBCO single crystal samples with strong pinning centers were studied for different sample-field orientation. The obtained values of normalized relaxation rate S allowed us to estimate the effective pinning potential U in the bulk of the YBCO sample and its temperature dependence, as well as the critical current density J_c . A comparison between the data obtained and the results for similar measurements in significantly higher magnetic fields was performed. To compare different J_c measuring techniques magnetization loop $M(H)$ measurements, were made. These measurements provided many important parameters of the samples under study (penetration field H_p , first critical field H_{c1} , etc.) that involve the geometrical configuration of the samples.

PASC: **74.72.-h** Cuprate superconductors;
 74.25.Ha Magnetic properties of superconductors;
 74.25.Wx Vortex pinning in superconductors.

Keywords: YBa₂Cu₃O_{7-x} single crystals, pinning of Abrikosov vortices, relaxation of magnetization.