

Релаксация намагниченности сверхпроводящих YBCO образцов в слабых магнитных полях

В.П. Тимофеев, А.Н. Омелянчук

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

Ю.Т. Петрусенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2005 г.

Впервые проведены исследования намагниченности и изотермической релаксации намагниченности высокотемпературных сверхпроводящих образцов различной кристаллической структуры в очень малых постоянных полях ($H \leq 0,5$ Э) при температурах, близких к критическим. Показано существенное влияние границ двойникования в монокристаллах YBCO на скорость релаксации намагниченности. В рамках модели коллективного пиннинга проведена оценка эффективного потенциала пиннинга в этих условиях, которая может быть использована для характеристики степени воздействия искусственно созданных точечных дефектов на критические токи образцов MgB_2 .

Вперше проведено дослідження намагніченості та ізотермічної релаксації намагніченості високотемпературних надпровідних зразків різної кристалічної структури в дуже слабких постійних магнітних полях ($H \leq 0,5$ Е) при температурах, які близькі до критичних. Показано значний вплив границь двійникування у монокристалах YBCO на швидкість релаксації намагніченості. У межах моделі колективного пінінгу проведено оцінку ефективного потенціалу пінінгу в цих умовах, яку може бути використано для характеристики ступеня впливу штучно зроблених точкових дефектів на критичні струми зразків MgB_2 .

PACS: 74.25.Qt, **74.50.+r**

1. Основное внимание в экспериментальных работах, направленных на изучение пиннинга магнитного потока в сверхпроводниках (СП) II рода, сконцентрировано на определении максимальных токонесящих способностей в сильных магнитных полях [1,2]. Применение высокочувствительных сквидов в бесконтактных измерителях магнитной восприимчивости позволяет проводить исследования в области малых значений полей (0,01–0,1) Э и даже наблюдать спонтанные магнитные моменты [3,4]. При разработке высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) сквидов исследования динамики магнитных вихрей в слабых магнитных полях (≤ 1 Э) особенно актуальны для снижения собственных шумов датчиков, часто связанных с крипом и скачками вихрей, а

их уменьшение частично решается путем создания искусственных центров пиннинга [5].

Целью настоящего сообщения является изложение особенностей поведения намагниченности $M(T, t)$ монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) в очень слабых постоянных магнитных полях ($H \ll 0,5$ Э) вблизи области СП перехода. Чтобы выявить влияние термоактивированной трансформации джозефсоновских слабых связей на потенциал центров пиннинга в системе однонаправленных границ двойникования (ГД), исследовали образцы различной кристаллической структуры. Для практического применения полученных результатов при разработке СП электроники азотного уровня охлаждения основные измерения проведены при температуре, близкой к 77 К.

2. Резистивное состояние в исследуемых СП возникает при начале движения магнитных вихрей, когда сила Лоренца, действующая на вихрь, начинает превышать силу пиннинга. Под действием этой силы, а также под воздействием термической активации, происходящей с вероятностью $\sim \exp(-U/kT)$, вихри начинают двигаться, возникает диссипация энергии (U — эффективная энергия активации скачков вихрей, равная усредненной глубине потенциала пиннинга; k — постоянная Больцмана; T — температура). Этими процессами и определяется значение критического тока СП (I_c).

Идеальный СП, помещенный в слабое магнитное поле, должен находиться в мейсснеровском состоянии. В реальных СП конечных размеров за счет наличия поверхностных и объемных дефектов магнитное поле при температурах, близких к критическим, начинает проникать внутрь образца даже при $\mathbf{H} < \mathbf{H}_{c1}$ (\mathbf{H}_{c1} — первое критическое поле идеального бездефектного СП эллипсоидальной формы) [6]. Термоактивированный крип отдельных вихрей приводит к перераспределению и затуханию сверхтоков, релаксации M .

Данные по исследованию магнитной релаксации в СП используются для получения важнейших параметров механизма пиннинга вихрей. При этом в простейшем случае эффективную глубину потенциала пиннинга можно оценить из измерения скорости изотермической релаксации $M(t)$:

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

где M_0 — начальное значение намагниченности, за которое, как правило, принимают намагниченность в критическом состоянии Бина [2]. Однако практически все опубликованные исследования по релаксации намагниченности СП проводили в сильных магнитных полях (сотни Э или даже нескольких кЭ), когда существенную роль играют сложные процессы в жесткой, хорошо сформированной решетке магнитных вихрей. Как было показано в работе [7], с точки зрения теории коллективного пиннинга в слабых магнитных полях реализуется крип невзаимодействующих вихрей, скорость движения магнитного потока не зависит от величины магнитного поля, а результаты измерений слабо чувствительны к отклонению магнитного поля от направления оси c ВТСП образца.

3. В качестве основного объекта исследований были выбраны беспримесные ориентированные монокристаллы YBCO [8]. Необходимый для получения оптимального допирования отжиг в кислороде приводит к преобразованию исходной структуры кристаллов и, как следствие, к образованию ГД. Для исследования роли этих плоскостных дефектов на процессы

пиннинга нами были отобраны образцы (с размерами, близкими к 1×1 мм, толщиной $\approx 0,015$ мм) двух типов: у одних однонаправленные ГД ориентированы параллельно оси c кристалла по всей его толщине, а у других содержались блоки разнонаправленных ГД. Для сравнения обсуждаются магнитные отклики и релаксация намагниченности поликристаллических YBCO образцов, у которых зернистая структура имела случайную ориентацию, а также текстурированной $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ керамики.

Исследования зависимости $M(T, t)$ в области фазового перехода в слабых полях проведены с помощью измерителя магнитной восприимчивости на базе сквид-градиентометра гелиевого уровня охлаждения. Использована стандартная методика измерения M на постоянном токе в однородном магнитном поле соленоида. Остаточное магнитное поле Земли в этой области экранировалось и не превышало 0,5 мЭ. Это позволяло проводить охлаждение образца и перевод его в СП состояние по методу ZFC (zero field cooling), что предпочтительно при исследовании $M(T)$. При анализе $M(t)$ охлаждение образца до температуры ≈ 77 К производилось в магнитном поле $\approx 0,5$ Э, т.е. по методу FC (field cooling), затем поле экранировалось, устанавливалась выбранная T , регистрировалось поведение $M(t)$.

На рис. 1,а приведена нормированная зависимость $M(T)$ при возрастании температуры в области СП перехода одного из исследуемых YBCO монокристаллов с однонаправленными ГД. Магнитное поле соленоида ориентировано вдоль оси c монокристалла и по величине равно 8,2 А/м ($\approx 0,1$ Э). При таком направлении поле параллельно плоскостям ГД, и наиболее эффективно осуществляется пиннинг абрикосовских вихрей. Как видно на рис. 1,а, кривая СП перехода, в отличие от данных по резистивным измерениям [8], немонотонна и занимает значительный интервал температур $\Delta T \approx 5$ К. На зависимости наблюдается сглаженная ступенька, которую невозможно объяснить теорией плавления вихревой решетки [1], учитывая такие малые величины H в эксперименте. На рис. 1,б показана динамика $M(t)$ этого монокристалла во времени. Для температуры образца $T = 78$ К $M(t)$ имеет начальный нелогарифмический ход, переходя при больших временах к поведению, описываемому моделью Андерсона–Кима. Оцененное значение U по выражению (1) составляет величину порядка 0,2 эВ, что согласуется с данными других авторов, полученными для ВТСП образцов в сильных магнитных полях [2]. На указанном рисунке приведено поведение $M(t)$ этого же образца при низкой температуре ($T = 6,5$ К). Как видно, релаксация сверхтоков не наблюдается. Это можно объяснить экспоненциаль-

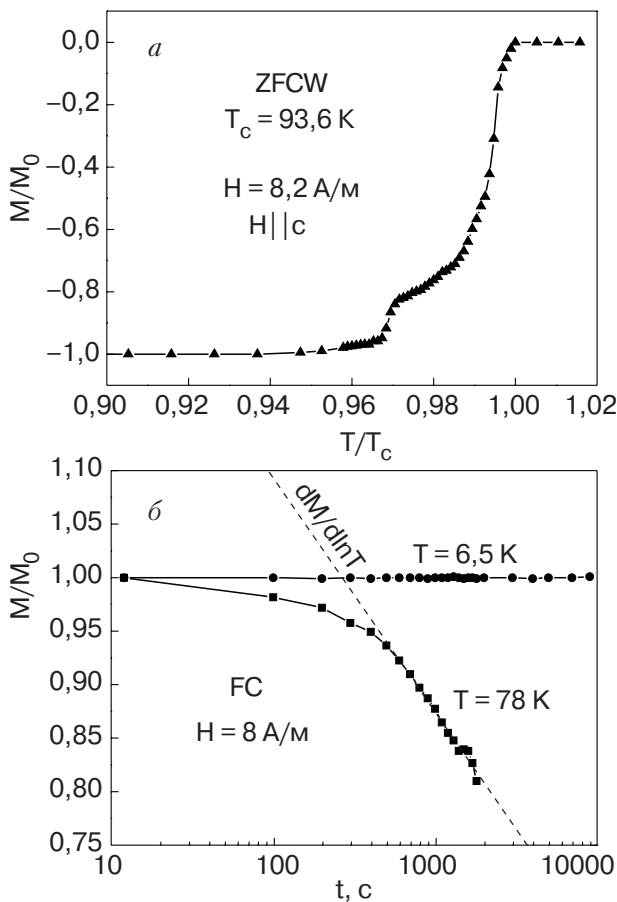


Рис. 1. Нормированная зависимость $M(T)$ в области сверхпроводящего перехода YBCO монокристалла №1 с однонаправленными ГД (а) и динамика намагниченности этого же образца в магнитном поле 8 А/м ($\approx 0,1$ Э) при двух значениях температуры (б). Пунктирной линией указан усредненный наклон линейного участка зависимости, который использован для оценки эффективного потенциала пиннинга. ZFCW — zero field cooled warming.

ным снижением термического крипа магнитного потока и присутствием не подавленных магнитным полем джозефсоновских связей в областях ГД [3]. Дополнительным аргументом в пользу последнего утверждения являются данные рис. 2,а, на котором приведена нормированная зависимость $M(T)$ монокристалла YBCO, у которого имеются блоки разнонаправленных ГД. Границы блоков с взаимоперпендикулярным направлением плоскостей ГД способствуют образованию мощных центров пиннинга. Фазовый переход СП становится более резким ($\Delta T_c \approx 0,3$ К), а релаксация намагниченности данного образца при температуре 78 К не наблюдается.

Для сравнения были исследованы поликристаллические ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ в малых магнитных полях. Сверхпроводящие гранулы поликристалла связаны между собой случайным образом барьерами различной прозрачности, образуя статистически распределенные сети с циркули-

рующими наведенными или спонтанными сверхтоками. Последние могут существовать при определенных условиях в хаотичных токовых контурах ВТСП, порождая парамагнитные отклики. На рис. 2,б приведено поведение нормированной намагниченности одного из поликристаллических образцов $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ при температуре 77,5 К.

Результаты наших экспериментов с монокристаллическими образцами YBCO дают основание полагать, что плоскости ГД создают условия для формирования джозефсоновских сетей со случайно распределенными параметрами. ГД оказывают локальное сильное влияние на подавление сверхпроводящего параметра порядка, понижают энергию захваченных вихревых нитей. Учитывая, что в поле 0,1 Э межвихревое расстояние ($\approx 10^4$ нм) превышает междвойниковое ($\approx 10^3$ нм) и сопоставимо с глубиной проникновения поля в данном интервале температур ($\approx 10^4$ нм), можно ожидать, что все вихри локализованы на ГД.

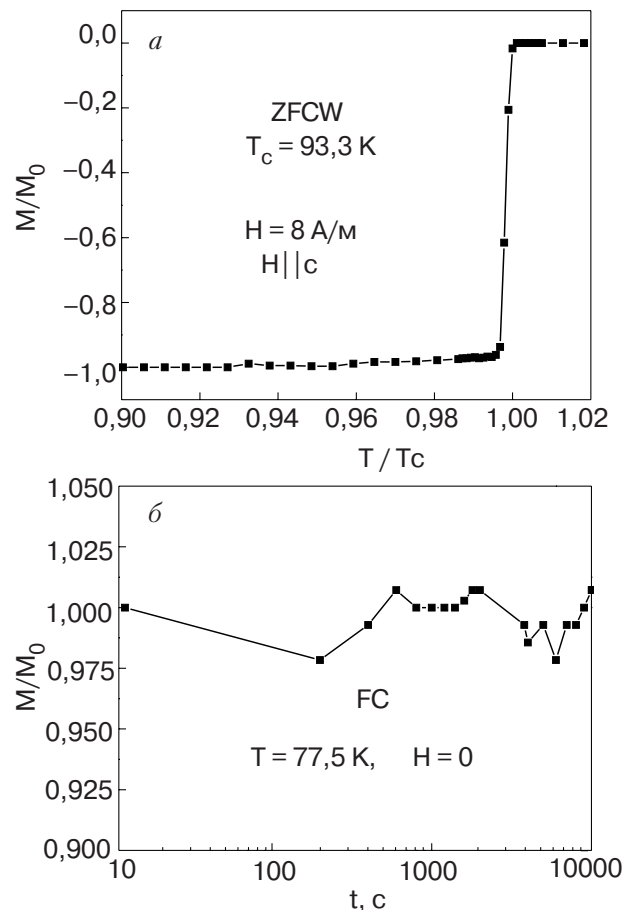


Рис. 2. Магнитный отклик в области сверхпроводящего фазового перехода монокристаллического YBCO образца №4 с разнонаправленными границами двойкования в поле 8 А/м, параллельном оси с кристалла, (а), и временная зависимость намагниченности поликристалла $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ в нулевом поле при температуре 77,5 К (б).

4. Таким образом, нами впервые проведены исследования $M(T)$ и $M(t)$ ВТСП образцов различной кристаллической структуры в очень малых полях ($\leq 0,1$ Э) и при температурах, близких к критическим. Показано существенное влияние ГД в монокристаллах на скорость релаксации намагниченности, в рамках модели коллективного пиннинга проведена оценка эффективного потенциала пиннинга в этих условиях. Описанная методика бесконтактного определения U в настоящее время используется для оценки степени воздействия искусственно созданных центров пиннинга на I_c образцов MgB_2 . Точечные дефекты в объеме СП создавались с помощью контролируемых доз облучения электронного линейного ускорителя.

Авторы выражают благодарность А.В. Бондаренко за предоставленные образцы монокристаллов, а В.Н. Самоварову за плодотворные дискуссии. Работа частично поддержана грантом УНТЦ, проект № 655А.

1. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
2. Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 911 (1996).
3. В.П. Тимофеев, А.В. Бондаренко, *ФНТ* **30**, 810 (2004).
4. Yu.A. Kolesnichenko, A.N. Omel'yanchouk, and A.M. Zagoskin, *ФНТ* **30**, 714 (2004).

5. Н.И. Богатина, С.И. Бондаренко, *ФНТ* **20**, 100 (1994); P. Selders, A.M. Castellanos, M. Vanpel, and R. Wordenweber, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **9**, 2967 (1999).
6. R. Liang, D.A. Bonn, W.N. Hardy, and D. Broun, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 117001 (2005).
7. А.В. Бондаренко, А.А. Продан, М.А. Оболенский, Р.В. Вовк, Т.Р. Ароури, *ФНТ* **27**, 463 (2001).
8. М.А. Оболенский, А.В. Бондаренко, В.А. Шкловский, Р.В. Вовк, А.А. Продан, *ФНТ* **24**, 71 (1998); М.А. Оболенский, А.В. Бондаренко, М.О. Зубарева, *ФНТ* **15**, 1152 (1989).

Magnetic relaxation of the superconductive YBCO samples in weak magnetic fields

V.P. Timofeev, A.N. Omelyanchouk,
and Yu.T. Petrusenko

Magnetization and isothermal relaxation of magnetization of high- T_c samples of different crystal structure was researched for the first time in very weak constant fields ($H \leq 0.5$ Oe) at temperatures close to the critical ones. It is shown that the twin boundaries in YBCO single crystals essentially affects the relaxation rate of magnetization. The effective pinning potential is estimated within the in these conditions framework of the model of collective pinning. The estimation can be used as a characteristic of the effect of artificially created dot defects on critical currents in MgB_2 samples.