

О немонотонном температурном ходе намагниченности монокристаллов $YBCO$ в слабых полях

В.П. Тимофеев

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина*

E-mail: timofeev@ilt.kharkov.ua

А.В. Бондаренко

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

E-mail: Aleksander.V.Bondarenko@univer.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 11 марта 2004 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований магнитного отклика монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, имеющих однонаправленные плоскости двойникования, в слабых постоянных магнитных полях. Наблюдаемая немонотонность температурной зависимости намагниченности образцов трактуется в рамках возможной модели существования системы джозефсоновских слабых связей на плоскостях двойникования и анизотропии параметра порядка.

Наведено результати експериментальних досліджень магнітного відгуку монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, які мають єдиний напрямок площин подвійникування, у слабких постійних магнітних полях. Немонотонність температурної залежності намагнічування зразків, що спостерігається, трактується у межах можливої моделі існування системи джозефсонівських слабких зв'язків на площинах подвійникування та анізотропії параметра порядку.

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

Исследование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с помощью магнитометрических методов актуально как для понимания природы возникновения высокотемпературной сверхпроводимости, так и для прикладных целей. Достоинство этих методов — уникальная чувствительность при использовании сквид-магнитометрии и отсутствие контактов, которые могут изменять приповерхностную структуру объекта. Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования металлооксидных ВТСП [1,2], остается ряд невыясненных вопросов, например, о динамике магнитных потоков, возникновении спонтанных токов в слабых магнитных полях и при температурах, близких к критическим, при наличии различных неоднородностей структуры [3]. При разработке высокочувствительных ВТСП сквидов и их входных антенных элементов (трансформаторов потока) ре-

шение именно этих вопросов актуально для снижения собственных магнитных шумов датчиков и повышения чувствительности аппаратуры азотного уровня охлаждения.

Целью настоящего сообщения является изложение результатов наблюдения немонотонной температурной зависимости намагниченности монокристаллов $YBCO$ в очень слабых магнитных полях (0,01–0,2 Э), обусловленной возможной термоактивированной трансформацией системы джозефсоновских слабых связей на однонаправленных двойниках вблизи области сверхпроводящего фазового перехода. В качестве объекта исследования выбраны беспримесные ориентированные монокристаллические образцы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, выращенные по раствор-расплавной технологии при слабом продольном градиенте температуры [4]. После отжига в потоке кислорода температура сверхпроводящего

перехода T_c монокристаллов, измеренная резистивным методом в «нулевом» магнитном поле, составляла 93 К при ширине сверхпроводящего перехода около 0,3 К, что свидетельствовало о высоком качестве образцов. Необходимый для получения оптимального допирования отжиг образцов в потоке кислорода при 400 °С приводит к преобразованию тетрагональной структуры кристаллов в орторомбическую и, как следствие, к образованию плоскостей двойникования. Для исследования влияния этих плоскостных дефектов на процессы пиннинга нами отобраны монокристаллы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, имеющие размеры, близкие к $1 \times 1 \times 0,02$ мм, у которых однонаправленные границы двойникования ориентированы параллельно оси c кристалла.

Исследования температурной зависимости намагниченности $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в области фазового перехода в слабых магнитных полях проведены с помощью измерителя магнитной восприимчивости на базе сквид-градиентометра (типа « dB_z/dZ ») гелиевого уровня охлаждения. Использована стандартная методика измерения намагниченности на постоянном токе по регистрации отклика радиочастотного сквида при движении образца по оси его антенны в однородном магнитном поле соленоида [5]. Остаточное магнитное поле Земли в области экспериментальной камеры не превышало 0,5 мЭ, что достигалось применением многослойных пермаллоевых экранов. Дополнительная компенсация остаточного поля могла осуществляться с помощью вспомогательного соленоида. Это позволяло проводить захлаживание образца и перевод его в сверхпроводящее состояние по методу ZFC (zero field cooling).

На рис. 1 приведена типичная температурная зависимость выходного напряжения измерителя восприимчивости при возрастании температуры одного из исследуемых образцов в области сверхпроводящего фазового перехода. Коэффициент преобразования магнитного момента в напряжение отклика экспериментальной установки $k = 5 \cdot 10^{-10}$ А·м²/В в рабочем диапазоне чувствительности $\pm 10 \Phi_0$, где Φ_0 — квант магнитного потока. Магнитное поле соленоида, равное 15,5 А/м ($\approx 0,2$ Э), было направлено вдоль оси c монокристалла. При такой ориентации магнитное поле параллельно плоскостям двойникования, и наиболее эффективно осуществляется пиннинг абрикосовских вихрей. Подобные зависимости с хорошей степенью воспроизводимости были получены для ряда монокристаллов YBCO оптимального уровня допирования. Как видно на рис. 1, кривая сверхпроводящего фазового перехода, в отличие от данных по резистивным измерениям для монокристаллов YBCO [4],

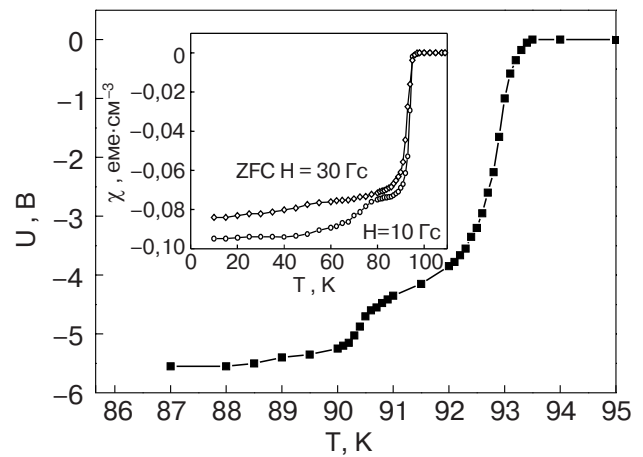


Рис. 1. Температурная зависимость выходного напряжения измерителя восприимчивости при увеличении температуры образца в области сверхпроводящего фазового перехода. На вставке приведена температурная зависимость восприимчивости керамических ВТСП из работы [6].

немономонна и занимает значительный интервал температур ($\Delta T = 3-5$ К). На зависимости наблюдается сглаженная ступенька, которую невозможно объяснить плавлением вихревой решетки [1], учитывая такие малые величины магнитных полей в эксперименте.

Отметим в этой связи несколько важных моментов. При исследованиях магнитной восприимчивости поликристаллических купратов YBCO и RBCO ($R = Nd, Eu, Gd$) авторы работы [6] обнаружили, что для некоторых образцов, прошедших процедуру отжига в кислороде, кривые ZFC фазового перехода имеют сглаженный ступенчатый излом. Такой вид температурной зависимости восприимчивости ВТСП характерен для режима перехода «стекло—жидкость» вихревой материи, который происходит при температуре $T_g < T_c$ в сильных магнитных полях $H > H_{c1}$. Поскольку в описанном в [6] эксперименте магнитные поля были малы ($H = 10-30$ Э), наблюдаемый ступенчатый вид фазовых характеристик был сопоставлен с трансформацией среды джозефсоновских слабых связей при малых магнитных полях, предсказанной в теоретических работах [7].

Сверхпроводящие гранулы купратного образца связаны между собой случайным образом барьерами различной прозрачности для куперовских пар, образуя для токов статистически распределенные сети. Параметры этой джозефсоновской среды зависят от технологии приготовления ВТСП образца (давления, степени насыщения кислородом и т.д.), температуры образца и внешнего магнитного поля при измерениях. По аналогии со спиновым

стеклом эту среду иногда называют «орбитальным стеклом», имея в виду, что орбитальные моменты отождествляются с циркулирующими наведенными или спонтанными сверхпроводящими токами. Последние могут существовать при определенных условиях, например при наличии нечетного числа джозефсоновских π -контактов в хаотичных токовых контурах. При увеличении приложенного магнитного поля температура этого перехода T_g сдвигается к меньшим значениям и ступенька полностью исчезает при больших полях, где восприимчивость демонстрирует типичное диамагнитное поведение.

Для монокристаллических образцов YBCO нами наблюдались похожие эффекты. На рис. 2 приведена температурная зависимость намагниченности, нормированной на ее максимальную величину, для одного из монокристаллов YBCO при трех значениях магнитного поля $H \parallel c$, равных 8 А/м ($\approx 0,1$ Э), 15,5 А/м ($\approx 0,2$ Э) и 65,9 А/м ($\approx 0,83$ Э). Как видно, при увеличении поля H происходит сдвиг ступеньки в сторону меньших температур и ее сглаживание.

Вследствие анизотропии зерен гранулированные сверхпроводники имеют сложную микроструктуру и наиболее благоприятны для существования орбитального стекла. Абрикосовские вихри способны проникать через зерна вдоль плоскостей ab , при этом сверхпроводящие токи могут протекать через петли, замыкающие одну или несколько гранул. В качественных эпитаксиальных пленочных образцах YBCO также наблюдались плато на кривых фазового перехода при исследованиях вольт-амперных характеристик и намагниченности при более высоких полях ($B = 0,3$ Тл) [8]. Это поведение интерпретировано авторами в рамках модели, основанной на присутствии одномерной сети джозефсоновских контактов со статистически распределенными длинами и с зависящими от магнитного поля толщинами барьеров. При этом транспортный ток рассматривался как ток туннелирования через эту джозефсоновскую сеть. Данная сеть состоит из ряда токовых каналов через межгранульные границы, и пиннинг в этой системе обеспечивается на межблочных границах и/или скоррелированных дефектах. В этом случае размеры дефектов сопоставимы с размерами токовых каналов, а также с размерами кора вихря. При высоких температурах значительная часть этих каналов разрывается на отдельные сверхпроводящие гранулы, приводя к снижению величины критического тока.

Результаты наших экспериментов с монокристаллическими образцами YBCO дают основание полагать, что плоскости двойникования создают условия для формирования похожих джозефсоновских се-

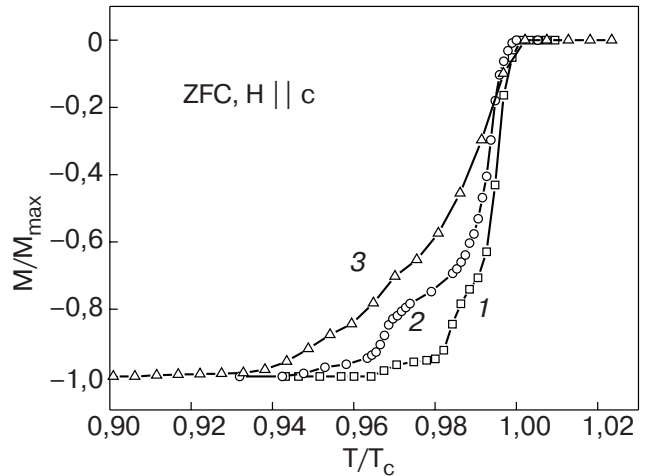


Рис. 2. Температурный ход намагниченности монокристалла YBCO, нормированной на максимальное значение при различных значениях магнитного поля H , А/м: 8 (1), 15,5 (2), 65,9 (3).

тей со случайно распределенными параметрами. Границы двойников включают CuO_x -слои, содержащие вакансии кислорода, которые расположены вдоль этих плоскостей и оказывают локальное сильное влияние на подавление сверхпроводящего параметра порядка. Подавление сверхпроводящего параметра порядка на двойниках приводит к понижению энергии захваченных двойниками вихревых нитей. Поэтому плотность вихревых нитей на двойниках выше, чем в остальном кристалле. Эксперименты по декорированию вихревой структуры показали, что в полях 20–40 Э плотность вихрей на двойниках в два раза выше, чем в объеме кристалла [9]. Учитывая, что в поле 0,2 Э межвихревое расстояние $a_0 = (\Phi_0/B)^{1/2} \approx 10^4$ нм превышает междвойниковое $d \approx 10^3$ нм и сопоставимо с глубиной проникновения поля в данном интервале температур $\lambda \approx 10^4$ нм, можно ожидать, что все вихри локализованы на двойниках, поскольку межвихревое взаимодействие экспоненциально убывает с ростом расстояния между вихрями.

Приповерхностные сверхпроводящие области, разделенные границами двойников, образуют хаотические контуры и сети для циркулирующих мейсснеровских токов, которые и определяют результирующую намагниченность исследуемого образца. С ростом температуры происходит разрыв наиболее слабых связей, перераспределение и затухание части наведенных сверхтоков за счет криппа отдельных вихрей. Плоскости двойникования, являясь эффективными центрами пиннинга, одновременно могут служить направлениями облегченного термоактивированного вхождения магнитного потока вдоль этих плоскостей, областями возможного

возникновения спонтанных токов [2]. Для выяснения вклада этих механизмов в поведение намагниченности монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ авторами планируется продолжение исследований на образцах, у которых плоскости двойникования вдоль оси с меняют направление на противоположное, с (110) на $(\bar{1}\bar{1}0)$, а также проведение сравнения с магнитными откликами раздвойникованных монокристаллов.

Таким образом, обнаруженная нами немонотонная зависимость намагниченности монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ с оптимальным допированием при сравнении с опубликованными результатами исследований керамических и пленочных образцов позволяет сделать вывод о возможном джозефсоновском характере поведения границ двойникования при анизотропии параметра порядка.

Авторы выражают благодарность за полезные дискуссии и помощь в организации исследований А.Н. Омелянчуку и М.А. Оболенскому.

1. G. Blatter, M.V. Feigel'man, V.B. Geshkenbein, A.I. Larkin, and V.M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994).
2. E. Il'ichev, M. Grajcar, R. Hlubina, R. IJsselsteijn, H. Hoenig, H.-G. Meyer, A. Golubov, M. Amin, A. Zagoskin, A. Omel'yanchuk, and M. Kupriyanov, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5369 (2001); R. Hlubina, M. Grajcar, and E. Il'ichev, *частное сообщение*.
3. G.M. Tsoy, Z. Janu, and M. Novak, *Physica* **B284–288**, 811 (2000); А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, В.Н. Светлов, В.Б. Степанов, *ФНТ* **29**, 1281 (2003).
4. 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).

5. V.V. Khanin, J.N. Sotnikov, V.Y. Slobotchkov, and A.N. Matlashev, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 2149 (1995).
6. S. Glenis, T. Yuen, C.L. Lin, J.A. Zan, and T. Mihaishin, *Physica* **C317–318**, 624 (1999).
7. F.V. Kusmartsev, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2268 (1992); D. Dominguez, E.A. Jagla, and C.A. Balseiro, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 2773 (1994).
8. G. Ghigo, A. Chiodoni, R. Gerbaldo, L. Gozzelino, F. Laviano, E. Mezzetti, B. Minetti, and C. Camerlingo, *Physica* **C341–348**, 1177 (2000).
9. G.J. Dolan, G.V. Chandrashekhara, T.R. Dinger, C. Field, and F. Holtzberg, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 827 (1989).

On nonmonotonic temperature dependence of magnetization in YBCO single crystals at low fields

V.P. Timofeev and A.V. Bondarenko

The experimental data on magnetic response of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ single crystals with unidirectional twinning planes in low magnetic fields are reported. The nonmonotonic temperature dependence of magnetization is treated in terms of some probable model of the existence of Josephson weak links in the twinning planes and the order parameter anisotropy.