Физика низких температур, 1996, т. 22, № 11, с. 1276–1280

Магнитные и высокочастотные свойства текстурированных образцов YBaCuO в магнитном поле до 12 Тл

В. В. Чабаненко

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Украина, 340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72
E-mail:chaban@host.dipt.donetsk.ua

Г. Шимчак, С. Пехота

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, 02-668, 32/46 Al. Lotnikov, Warsaw, Poland

Представлены результаты исследований необратимых явлений в намагниченности, магнитострикции и высокочастотном поглощении текстурированных $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (123-фаза) сверхпроводников. В намагниченности M наблюдался обратимый эффект «тренировки» в отличие от низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), где он является необратимым. Обсуждаются результаты изучения анизотропии гистерезиса гигантской магнитострикции, где наблюдается проявление неустойчивости магнитного потока. Обнаружено явление магниторасслоения, обсуждается его механизм. В поглощении электромагнитного поля рассмотрен «нормальный» гистерезис, отличающийся от «аномального», характерного для гранулярной слабосвязанной среды ВТСП.

Наведено результати досліджень незворотних явищ у намагніченості, магнітострикції та високочастотному поглинанні в текстурованих $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (123-фаза) надпровідниках. В намагніченості M спостерігався зворотний ефект «тренування» на відміну від низькотемпературних надпровідників (НТНП), де він є незворотним. Обговорюються результати досліджень анізотропії гістерезису гігантської магнітострикції, де спостерігається прояв нестійкості магнітного потоку. Виявлено явище магніторозшарування, обговорюється його механізм. В поглинанні електромагнітного поля розглянуто «нормальний» гістерезис, який відрізняється від «аномального», характерного для гранульованого слабкозв'язаного середовища ВТНП.

Введение

К изучению текстурированных сверхпроводников проявляется повышенный интерес в связи с возможностью их практического использования. Нами проведено исследование магнитострикции намагниченности и поглощения в сильном магнитном поле. При гелиевых температурах в образцах наблюдается развитие термомагнитной неустойчивости. Рассмотрено проявление скачков магнитного потока в магнитных свойствах этих объектов, влияние на них перемагничивания, а следовательно, и циклирования механических напряжений через механизм пиннинга.

Образцы и методика исследований

Образцы представляли собой параллелепипеды объемом ~ 10–20мм^3 (рис. 1,*а*), которые скалывались по естественно отделяющимся плоскостям с длинных полос, полученных по методу *MTG* [1]. По данным рентгеновских исследований, все поверхности скола имели ориентацию (001), т.е., по сути, они являются плоскостями *ab*. На микрофотографиях боковых поверхностей образцов имелись параллельные *ab*-плоскостям четкие линии (рис. 1,*а*), представляющие собой границы 123-пластин-кристаллитов. Имеются различные мнения (см. [2] и библиографию в этой работе) по поводу структуры этих границ. Предположительно они являются малоугловыми границами пластин-кристаллитов, либо планарными дефектами, образующимися в процессе сильно анизотропного роста пластин 123 со щелями, заполненными отделяющейся жидкой фазой, либо трещинами. Микро- (толщиной ~ 0,1 мкм) и макротрещины (~ 1 мкм), в соответствии с [2], зарождаются как в процессе роста кристаллической структуры, так и при тетра—орто-переходе (ТО) из-за различных температурных коэффициентов расширения между 123-структурой и вторичными фазами. Частицы фазы

© В. В. Чабаненко, Г. Шимчак, С. Пехота, 1996

211 в макромасштабе однородно распределены по всему объему образца.

Структура орторомбических 123-пластин-кристаллитов, как правило, представляет собой систему параллельно выстроенных двойников толщиной ~ 1 мкм [2]. Двойники формируются при ТО-переходе для снижения упругой энергии кристаллической решетки, возникающей при изменении ее периодов. Двойниковая граница ориентируется преимущественно вдоль оси c.

Сочетание многофазности (123, 211, 011, 001, 025) [1,2], определяющей систему многочисленных центров пиннинга, и текстуры, существенно уменьшающей роль слабых связей, обеспечивает высокую токонесущую способность образцов ($j_c \approx 800$ кА/см^3 при $T = 4{,}2$ К и $H = 2$ Тл).

Намагниченность изучалась с помощью вибрационного магнитометра, изменение линейных размеров образца в плоскости ab ($\Delta L = L(H) - L_0$) регистрировалось тензодатчиком, включенным в мост постоянного тока, а высокочастотное поглощение измерялось автодинным детектором.

Результаты и их обсуждение

Магнитострикция и скачки потока

В [3] сообщалось о наблюдении гигантской магнитострикции в текстурированных материалах. Центры пиннинга препятствуют вхождению магнитного потока в образец. Равная противоположно направленная сила создает механические напряжения в кристалле. Под действием этих напряжений приходят в движение дефекты кристаллической решетки, что обусловливает пластичность образцов. Необратимые явления в магнитострикции для ориентаций $H \parallel c$ и $H \parallel ab$ при различных температурах показаны на рис. 1,*б*. В случае $H \parallel c$ при увеличении магнитного поля до 8 Тл образец монотонно сжимается ($\Delta L/L_0 < 0$), а затем происходит скачок $\Delta L/L_0$, связанный с развитием термомагнитной неустойчивости. При обратном ходе магнитного поля образец в виде пластины (0,5× 3,0 × 5,0 мм) претерпевает сложные деформации, связанные, по-видимому, с ее изгибом. Величина давления магнитного поля, оцененная из значений возникающих деформаций и модуля упругости монокристаллов YBaCuO, составляет ≈ 1 кбар. Повышение температуры исключает развитие неустойчивости, и перемагничивание образца происходит обычным образом: при увеличении поля образец сжимается, а при обратном ходе — растягивается. В соответствии с [4],

$$\Delta L(H)/L_0 \approx 1/C \int ((H_e^2 - H^2(x))dx$$

(C — коэффициент жесткости; H_e — внешнее поле), т.е. гистерезис магнитострикции определяется различием распределения магнитного поля в образце в этих случаях. В ориентации $H \parallel ab$ гистерезисные явления коэффициента магнитострикции ($\Delta L/L_0 > 0$) наблюдаются на фоне значительных обратимых изменений.

Явление магниторасслоения (magnetolamination)

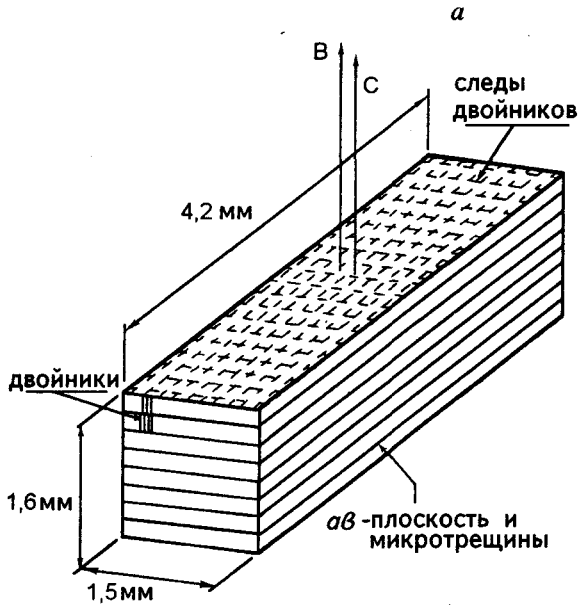
Исследование влияния циклирования сильного магнитного поля на свойства текстурированных сверхпроводников позволило обнаружить в них магниторасслоение. Суть его состоит в механическом расслоении объемных образцов на пластины по плоскостям параллельным ab под действием магнитного поля. Как следует из измерений магнитострикции, магнитное поле (посредством пиннинга) создает механическое напряжение в кристалле. Магниторасслоение возникает под действием этих пондеромоторных сил. В результате, например, образец в форме параллелепипеда (рис. 1,*а*) под действием 20–23 циклов перемагничивания в области полей от −12 до 12 Тл при 4,2 К расслоился на 12 прямоугольных пластин толщиной 0,1–0,15 мм. Магнитное поле было направлено вдоль оси c.

Как показывает эксперимент, важную роль в магниторасслоении играют скачки магнитного потока, а следовательно, и скачки механических напряжений. На другом образце в форме параллелепипеда с углом у основания ~ 45°, имеющем несколько большие критические токи, магниторасслоение наступило уже после трех последовательных циклов перемагничивания при 2; 4,2 и 7,8 К (рис. 2). Об этом свидетельствует кривая перемагничивания при $T = 7{,}8$ К. Сужение кривой $M(H)$ в области отрицательных значений поля связано с расслоением образца и выходом части его из измерительной зоны магнитометра, т.е. с уменьшением массы образца. Последующие циклы перемагничивания при этой температуре приводили к постоянному отслоению пластин.

Как показано на рис. 2, отделению пластин предшествовало несколько десятков скачков магнитного потока. Они сопровождались характерным треском, который отчетливо слышен при проведении экспериментов. Это (как и импульсы акустической эмиссии [5]) свидетельствует о том, что сложные механические напряжения, возникающие в образце, приводят к лавинообразному развитию трещин в плоскости ab и расслоению образца.

Причиной магниторасслоения может быть перестройка внутренней кристаллической структуры блоков, из которых состоят пластины-кристаллиты, вызванная движением плоскостей двойникования под действием давления. Если учесть слоистую структуру образцов, где каждая пластина-кристаллит имеет свою систему двойников (рис. 1,*а*) со своими критическими напряжениями, а также значительные внутренние напряжения (290 МПа, по оценкам [2]), направленные вдоль оси *c*, то схему процесса развития трещин можно представить следующим образом. Согласно [2,6], процесс раздвойникования под действием напряжении сопровождается изменением линейных размеров внутренних элементов структуры пластин-кристаллитов, что становится возможным в основном в области трещин. Отличие в подвижности двойниковых плоскостей, принадлежащих соседним слоям, приводит к значительным касательным напряжениям в устьях трещин, лежащих в плоскости *ab*. Под действием этих и внутренних «замороженных» в кристалле напряжений появятся трещины. Скачки механических напряжений при возникновении неустойчивостей приводят к их лавинообразному возрастанию.

При развитии неустойчивости важным является соотношение времен релаксации двойниковой струк-



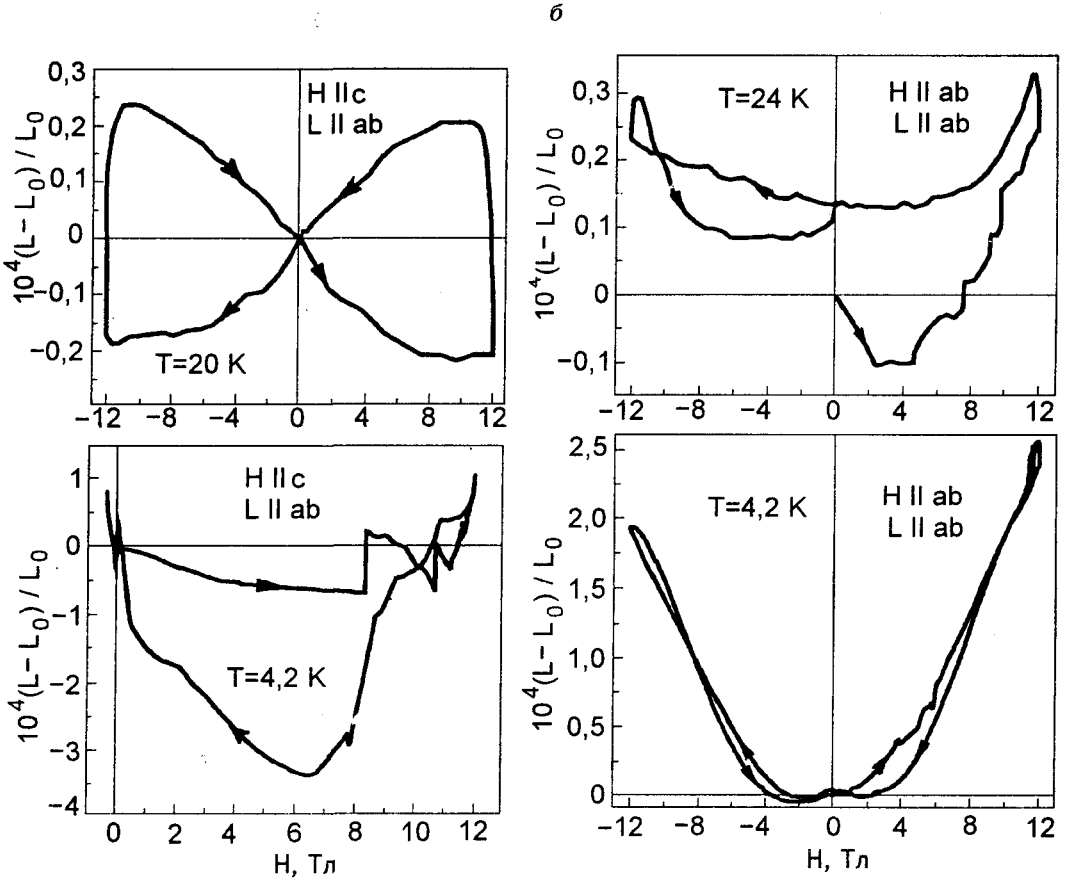


Рис. 1. Геометрия образца (*а*). Кривые магнитострикции для различных ориентаций поля и температур (*б*).

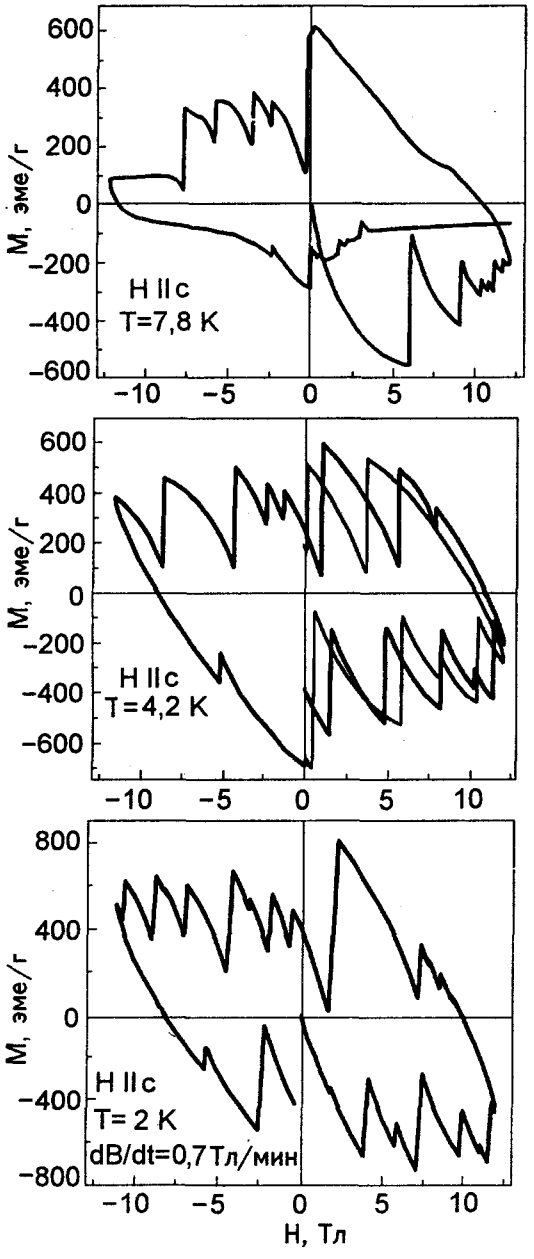


Рис. 2. Гистерезисные кривые намагниченности при разных температурах.

туры (или других дефектов) и сброса механических напряжений. Расслоению-разлому при скачке магнитного потока может способствовать запаздывание релаксации двойниковой структуры, так как при этом локальные напряжения между слоями пластин-кристаллитов могут достигать большой величины. Отметим, что скорость диффузии магнитного потока в образец при скачке потока для $T = 7{,}8$ K, когда происходило отделение частей образца, гораздо выше, чем при низких температурах (рис. 2).

Намагниченность и нестабильности магнитного потока

В намагниченности M текстурированных материалов наблюдались два типа нестабильного течения магнитного потока: скачки потока при ориентации магнитного поля $H \perp c$ и гигантские немонотонности $M(H)$ при $H \parallel ab$ [3,7]. В результате перемагничивания была обнаружена стабилизация критического состояния при $H \perp c$, т.е. известный для низкотемпературных сверхпроводников второго рода эффект «тренировки», при котором устойчивость сверхпроводника к термомагнитным возмущениям возрастает под действием пондеромоторных сил. Однако в отличие от НТСП при отогреве иттриевого образца выше 100 K и его последующем охлаждении скачки магнитного потока полностью восстанавливались, т.е. эффект «тренировки» оказался обратимым. Объяснить это можно, если предположить, что причиной пускового скачка температуры, вызывающего неустойчивость, является пластическое течение материала. Проведенные исследования показывают, что в области больших магнитных полей и критических токов пластические деформации могут определять характер устойчивости критического состояния текстурированных образцов. Обнаруженное нами явление «тренировки» намагниченности можно объяснить деформационным упорядочением материала, в результате чего подвижность плоскостей двойникования ограничивается. Способность монокристаллов YBaCuO к обратимым пластическим деформациям (полному восстановлению исходного состояния при снятии нагрузки и (или) отогреве) [8] может объяснить наблюдаемое восстановление начальной зависимости $M(H)$ при отогреве до критической температуры.

Необратимые явления в поглощении

Гранулярные ВТСП известны своими «аномальными» необратимыми явлениями, которые своим существованием в первую очередь обязаны наличию джозефсоновских контактов между гранулами и пиннингу магнитного потока в них [9]. При этом наблюдается «аномальный» гистерезис критического тока j_c по магнитному полю H, для которого характерно возрастание j_c при изменении сканирования поля на обратное ($j_c(H_\downarrow) > j_c(H^\uparrow)$). Иная ситуация в текстурированных сверхпроводниках, где произошло радикальное изменение свойств межгранульных контактов («слабые» связи стали «сильными») и, как следствие, всей токонесущей способности керамики. Наличие гранулярности, имеющей структуру типа «кирпичной кладки» [2], не сказывается на ее токонесущих способностях и высоко-

частотном отклике. Для текстурированных сверхпроводников наблюдается [10] противоположное поведение ($(j_c(H_\downarrow) < j_c(H^\uparrow)$ — «нормальный» гистерезис) из-за того, что экранирующие токи в объеме образца стремятся компенсировать нарастание внешнего поля (диамагнитный эффект), и наоборот, при убывании внешнего поля эти токи стремятся поддержать прежнюю величину поля в объеме образца. Гистерезис j_c при этом возникает из-за различия эффективных полей H_{ef} при нарастании поля ($H_{ef}^{\uparrow}$) и при его убывании ($H_{ef}^{\uparrow}$) [11]: $H_{ef}^{\uparrow} \approx \approx H - \Delta M/2$, $H_{ef}^{\uparrow} \approx H + \Delta M/2$, где для плоского образца $\Delta M = j_c d/2$, d — толщина образца.

Авторы благодарят Е. М. Ройзенблата за любезно предоставленные образцы для исследований и А. И. Дьяченко за полезные обсуждения результатов.

Эта работа частично поддержана Государственным комитетом Польши по научным исследованиям (грант № 2В3021107).

1. В. В. Климов, Е. М. Ройзенблат, С. И. Ермолина, А. А. Косогов, Н. Г. Кисель, В. Ю. Таренков, В. В. Пермяков, *СФХТ* **5**, 757 (1992).
2. P. Diko, N. Pelerin, and P. Odier, *Physica* **C247**, 169 (1995).
3. В. В. Чабаненко, С. Пехота, Г. Шимчак, И. Б. Кринецкий, *ФНТ* **20**, 1182 (1994).
4. H. Ikuta, N. Hirota, Y. Nakayama, K. Kishio, and K. Kitazawa, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2166 (1993).
5. В. С. Бойко, И. М. Горбатенко, Л. Ф. Кривенко, М. В. Лазарева, В. И. Соколенко, П. А. Хаймович, *ФНТ* **15**, 983 (1989).
6. D. Favrot, D. Dechamps, and A. Revcolevschi, *Philos. Mag. Lett.* **64**, 147 (1991).
7. V. V. Chabanenko, S. Piechota, H. Szymczak, E. M. Reusenblat, S. I. Ermolina, and N. G. Kisel, *Physica* **C235-240**, 2074 (1994).
8. В. С. Бойко, А. М. Ксевич, Ю. А. Косевич, *ФНТ* **17**, 208 (1993).
9. А. И. Дьяченко, В. В. Чабаненко, *ФНТ* **18**, 826 (1992).
10. V. V. Chabanenko, A. I. D'yzchenko, A. Nabilek, S. Piechota, H. Szymczak, and M. V. Zalutsky, *Physica* **C235–240**, 2861 (1994).
11. Ming Xu, *Phys. Rev.* **B44**, 2713 (1991).

Magnetic and radio-frequency properties of textured YBaCuO samples in magnetic field up to 12 T

V. V. Chabanenko, H. Szymczak, and S. Piechota

The results of an investigation of irreversible phenomena in magnetization, magnetostriction and high-frequency absorption of textures $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconductors (phase 123) are reported. The magnetization displays a reversible «training» effect unlike low-temperature superconductors (LTSC) where it is irreversible. The data on hysteresis anisotropy of a giant magnetostriction are considered. The magnetic flux is found to be instable. A new phenomenon (magnetolamination) is observed and its mechanism is treated. The electromagnetic field absorption exhibits a «normal» hystoresis different from the «anomalous» one typical of the granular weak-coupled environment of HTSC.