

# Потери высокочастотной энергии в минимумах магнитопольевых зависимостей поглощения в ВТСП

Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко, И. Г. Максимчук, Н. Т. Черпак

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
Украина, 310085, г. Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12  
E-mail: cherpak@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 27 мая 1998 г.

Проведены исследования особенностей поглощения электромагнитной энергии в экстремальных точках кривых магнитопольевых зависимостей в ВТСП. Установлена линейная зависимость поглощения в минимумах кривых от намагничивающего поля. Показано, что основной вклад в потери в этих точках вносит поглощение высокочастотного поля непосредственно в гранулах. Указано на возможность оценки качества гранул по относительной величине потерь в минимумах магнитопольевых зависимостей ВЧ поглощения.

Проведено дослідження особливостей поглинання електромагнітної енергії в екстремальних точках кривих магнітопольових залежностей ВТНП. Встановлено лінійну залежність поглинання в мінімумах кривих від поля намагнічування. Показано, що основний вклад у втрати в цих точках вносить поглинання високочастотного поля безпосередньо у гранулах. Вказано на можливість оцінки якості гранул по відносній величині втрат в точках мінімумів магнітопольових залежностей ВЧ поглинання.

PACS: 74.72.Bk

## 1. Введение

Уже с первых шагов изучения физических особенностей высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) типа  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  интерес исследователей привлек гистерезис магнитопольевых зависимостей критического тока [1–5], магнитной восприимчивости [3,6] и потерь электромагнитной энергии в сверхвысокочастотных [7] и высокочастотных [8] полях. Исследование этих зависимостей подтвердило сильное влияние гранулярной структуры этих сверхпроводников на их транспортные и магнитные свойства. Было установлено, что за величину транспортного тока и электромагнитных потерь основную ответственность несет межгранулярная среда, а за величину захвата магнитного потока в образце ответственны в первую очередь сверхпроводящие гранулы.

Целый ряд исследователей особое внимание уделили изучению экстремальной точки на магнитопольевой зависимости в спадающем магнитном поле (максимуму критического тока

или минимуму мнимой составляющей магнитной восприимчивости, а также электромагнитных потерь). Было установлено совпадение этих экспериментальных точек на зависимостях плотности критического тока и магнитной восприимчивости [3] или электромагнитного поглощения на шкале внешнего постоянного магнитного поля. Определен характер влияния на положение экстремума величины намагничивающего поля (т.е. максимально достигнутого значения магнитного поля  $H_m$  перед его снижением) и рабочей температуры [1–8]; температурной и магнитной предыстории образца в конкретном эксперименте [2,4,5]. Из этих исследований сделан вывод о том, что наличие экстремума в спадающем поле определяется максимально возможной компенсацией внешнего поля в межгранулярном пространстве противоположно направленным полем, созданным силовыми линиями захваченного сверхпроводящими гранулами магнитного потока. При этом условии резко ослабляется воздействие внешнего магнитного поля на слабые межгранулярные связи. Однако значение

измеряемой величины критического тока или электромагнитного поглощения в экстремуме никогда не достигает первоначальной величины (до введения магнитного поля). Также точка нулевого значения намагниченности образца, хотя и близка к положению минимума поглощения в спадающем магнитном поле, однако точного совпадения значений магнитных полей для этих двух особых точек не наблюдается [9].

Отсутствие полной компенсации локальных полей в межгранульном пространстве в максимуме кривой критического тока или в минимуме кривой поглощения электромагнитного поля на магнитолевых зависимостях в спадающем магнитном поле авторами проводимых исследований объясняется или разбросом геометрических размеров и ориентации отдельных гранул образца [10], или же варьированием в широких пределах как по величине так и по направлению локальных магнитных полей в межгранульном пространстве [2,11]. При этом полностью игнорируется влияние потока, захваченного гранулами, на их критический ток или на поглощение электромагнитного поля в гранулах. Целью настоящей работы является определение воздействия захваченного гранулами магнитного потока на процессы поглощения высокочастотного (ВЧ) электромагнитного поля непосредственно в гранулах и оценка влияния рассеянного поля захваченного потока на потери в межгранульном пространстве в минимумах поглощения на магнитолевых зависимостях.

## 2. Методика эксперимента

Измерение поглощения  $P$  высокочастотного поля (тангенса угла потерь в образце  $\operatorname{tg} \delta = P = 1/Q$ ) проводилось индуктивным методом. Экспериментальная установка позволяла измерять изменение потерь  $P$  при внесении в поле катушки образца сверхпроводника. Измерения осуществлялись на частоте 2,525 МГц при температуре кипения жидкого азота ( $T = 77$  К) в режиме охлаждения образца в нулевом магнитном поле (режим ZFC).

Постоянное внешнее магнитное поле до 165 Э создавалось катушками Гельмгольца. Направление вектора переменной составляющей ВЧ магнитного поля, создаваемого измерительной индуктивностью, и постоянного внешнего поля во всех экспериментах сохранялось коллинеарным. Величина напряженности переменного магнитного поля не превышала 0,01 Э.

Регистрировались три вида магнитолевых зависимостей поглощения  $P$  в образце: при увеличении внешнего магнитного поля  $H$  до величины  $H_m$ ; при его последующем уменьшении, а также потери в образце с захваченным магнитным потоком при нулевом значении магнитного поля  $H(H_m) = 0$ . Имелась возможность изменять направление внешнего магнитного поля на противоположное, при этом направление поля, при котором производились начальные измерения, считалось положительным ( $H$ ), а обратное направление — отрицательным ( $-H$ ).

Для получения зависимостей поглощения в образце с захваченным магнитным потоком  $P(H_m)$  измерение потерь производилось после выключения магнитного поля, которое перед этим плавно повышалось от нуля до определенной величины  $H_m$ . При этом величина поля намагничивания  $H_m$  повышалась от цикла к циклу измерений  $0 \rightarrow H_m \rightarrow 0$ . При смене направления магнитного поля на отрицательное ( $-H_m$ ), т.е. при перемагничивании, максимально достигнутая величина намагничивающего в положительном направлении поля сохранялась ( $H_m = 165$  Э) и изменялась лишь величина перемагничивающего поля ( $-H_m$ ).

Особое внимание при исследованиях обращалось на величины минимумов потерь как в спадающем магнитном поле  $H$ , так и в образцах с захваченным магнитным потоком при перемагничивании ( $-H_m$ ).

В экспериментах использовались керамические образцы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , приготовленные в институте Монокристаллов НАН Украины по стандартной технологии твердофазного синтеза при варьировании условий изготовления.

## 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 сплошной кривой приведена типичная гистерезисная зависимость ВЧ потерь в керамическом ВТСП образце, полученная при увеличении магнитного поля от нуля до 165 Э, последующем снижении его до нуля и дальнейшем переходе в область «отрицательных» значений  $H$ . После достижения величины 165 Э поле опять возвращалось к нулевому значению. Направление изменения поля в этом цикле указано стрелками.

Пунктирными кривыми представлены зависимости потерь в образце с захваченным магнитным потоком при намагничивании образца до 165 Э в прямом направлении и при его перемагничивании до  $-165$  Э.

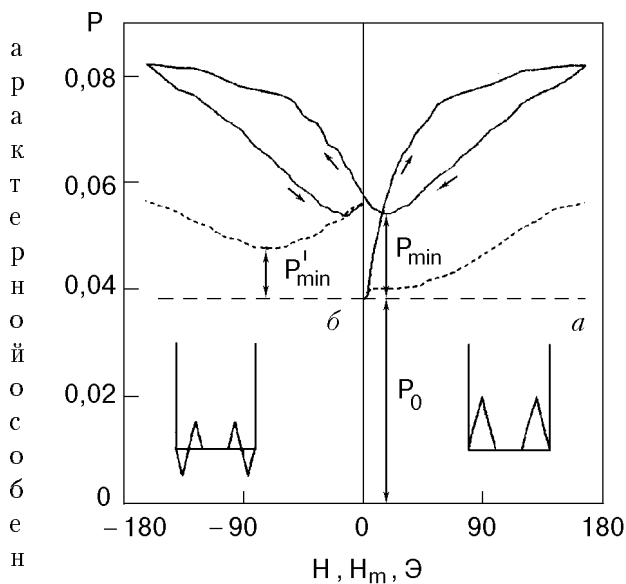


Рис. 1. Типичный вид магнитополовой зависимости поглощения в керамических образцах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . На вставках — схематические изображения распределения магнитного потока в грануле в минимумах поглощения в спадающем магнитном поле (а) и в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании (б).

ивой зависимости потерь в спадающем магнитном поле является наличие минимума. Как установлено многочисленными исследованиями [1–10], минимум на этой зависимости обусловлен взаимной компенсацией локальных полей в межгранульном пространстве (т.е. на поверхности гранул), созданных внешним магнитным полем и противоположно ему направленным суммарным рассеянным полем захваченных гранулами абрикосовских вихрей. Следуя модели [2], использующей представления Бина о критическом состоянии, в минимуме кривой магнитный поток, захваченный гранулой, имеет пространственное распределение, схематически изображенное на вставке а (рис. 1) под рассматриваемым минимумом. Локальное магнитное поле на границе гранул при этом равно нулю. Рисунок 1,а соответствует случаю, когда не вся гранула переходит в критическое состояние, т.е. магнитное поле еще не проникает к центру гранулы.

Величина поглощения ВЧ поля в минимуме состоит из поглощения в сверхпроводнике  $P_0$  до введения магнитного поля (см. рис. 1) и составляющей  $P_{min}$ , обусловленной влиянием захваченного магнитного потока.

В работе [12], по-видимому, впервые получена магнитополовая зависимость поглощения в образце с захваченным магнитным потоком при

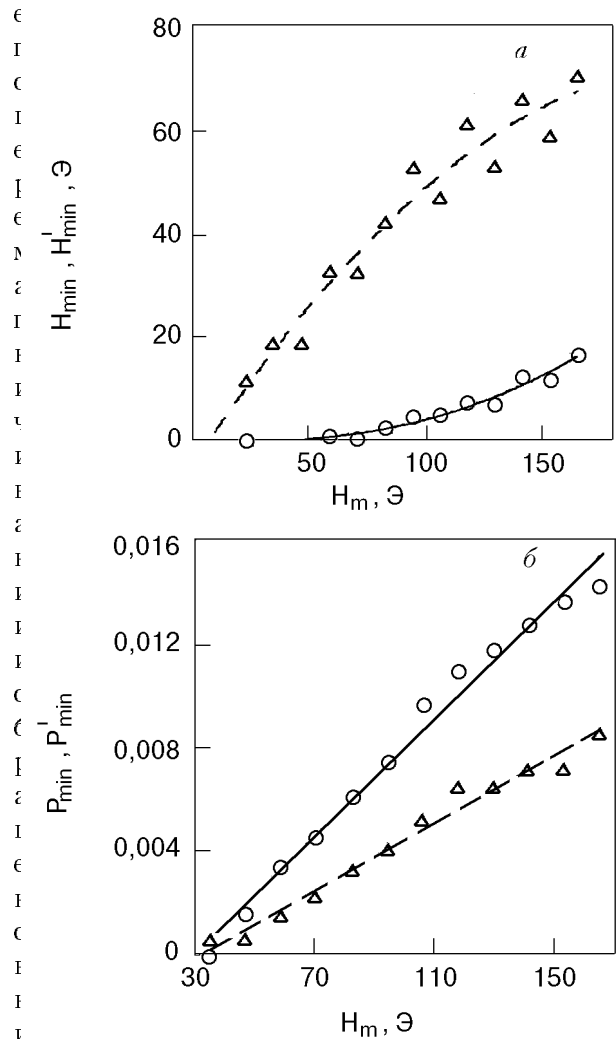


Рис. 2. Зависимости положения минимумов ( $H_{min}$ ,  $H'_{min}$ ) (а) и величины потерь в них ( $P_{min}$ ,  $P'_{min}$ ) (б) от максимально достигнутого поля намагничивания: в спадающем поле (○), в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании (Δ).

а резкое ее отличие от аналогичной зависимости при намагничивании в прямом направлении, а наличие минимума на этой зависимости объяснено с точки зрения пространственного распределения локального магнитного поля в намагниченном образце. При этом происходит компенсация полей на границе гранул, образованных магнитными потоками, захватываемыми при прямом ( $H_m$ ) и обратном ( $-H_m$ ) намагничивании образца. Характер распределения захваченного магнитного потока в грануле в точке минимума поглощения в области отрицательных значений  $H_m$  приведен на вставке б рис. 1. Естественно, что при этом суммарное локальное поле на границах гранул предполагается равным нулю. А величина потерь

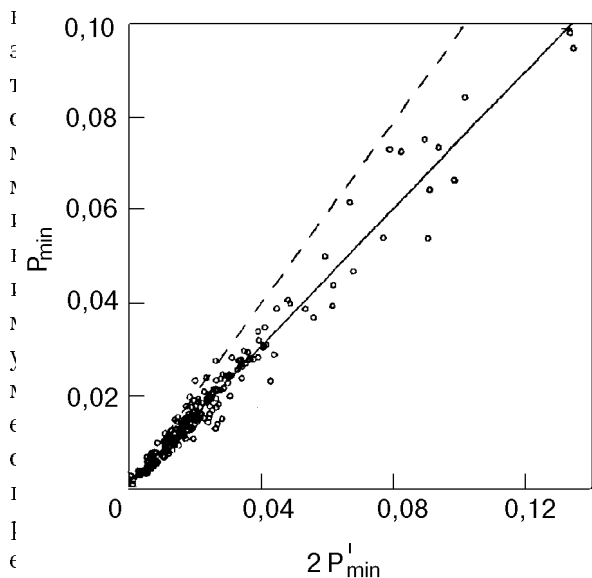


Рис. 3. Зависимость поглощения в минимуме в спадающем поле ( $P_{\min}$ ) от удвоенного значения потерь в минимуме в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании ( $2P'_{\min}$ ). Пояснения в тексте.

е  
тс суммарными потерями  $P_0$  и  $P'_{\min}$ .

При повышении максимально достигнутого значения магнитного поля  $H_m$  положение минимума ВЧ поглощения  $H_{\min}$  в спадающем магнитном поле, как и положение минимума  $H'_{\min}$  в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании, смещаются в сторону более высоких значений магнитных полей (рис. 2,а). Характер смещения положения минимума  $H_{\min}$  (сплошная кривая) совпадает с зависимостями, полученными в [1,7–9,11], но без достижения насыщения при используемых в опыте полях. Положение минимума  $H'_{\min}$  (пунктирная кривая) имеет более высокие значения и он перемещается быстрее. На рис. 2,б показан ход возрастания потерь в обоих минимумах  $P_{\min}$  (сплошная кривая) и  $P'_{\min}$  (пунктирная кривая), т.е. соответственно в спадающем поле и в захваченном поле при перемагничивании как функции величины поля намагничивания  $H_m$ . Зависимость  $H_{\min}(H_m)$ , как и зависимость  $P_{\min}(H_m)$ , не достигает квазистационарного уровня в области исследуемых полей намагничивания, откуда можно сделать вывод, что, как утверждается в [7,9,11], в этих режимах внешнее поле еще не проникает к центру гранул.

Как видно на рис. 2,б, зависимости  $P_{\min}(H_m)$  и  $P'_{\min}(H_m)$  практически линейны. При этом значения потерь в минимуме кривой зависимости для спадающего магнитного поля примерно в два раза превышают величины ВЧ потерь в минимуме

кривой поглощения в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании, т.е.  $P_{\min} \approx 2P'_{\min}$  во всем диапазоне полей намагничивания.

Для выяснения справедливости соотношения  $P_{\min} \approx 2P'_{\min}$  был проведен анализ зависимости  $P_{\min}(2P'_{\min})$  для большого числа образцов ВТСП при фиксированном значении поля намагничивания  $H_m = 165$  Э (рис. 3). При синтезе образцов варьировались технологические процессы их изготовления: температура и длительность отжига, давление и температура прессования, вводились добавки серебра,  $Y_2BaCuO_5$  и т.п. В связи с этим образцы различались величиной ВЧ потерь как до, так и после введения магнитного поля, а также характером поведения магнитопольевых зависимостей поглощения.

На рис. 3 приведены значения величин  $2P'_{\min}$  и  $P_{\min}$  для более чем 200 образцов керамических ВТСП. Пунктиром проведена прямая линия под углом  $45^\circ$  и теоретическая линия регрессии (сплошная) построена с помощью метода наименьших квадратов.

Высокий коэффициент корреляции ( $r = 0,98$ ) позволяет предположить, что потери ВЧ поля в рассматриваемых минимумах связаны жесткой закономерностью, а случайные вариации размера гранул и их ориентации, обуславливающие разброс локального межгранульного поля, играют роль лишь некоторой второстепенной добавки к основному поглощению. Обратим внимание на тот факт, что, исходя из геометрических представлений областей захваченного потока по Бину, величина плотности захваченного магнитного потока в грануле в минимуме кривой поглощения для спадающего магнитного поля  $H_{\min}$  (см. вставку а на рис. 1) в два раза превышает величину плотности захваченного потока в минимуме  $H'_{\min}$  (см. вставку б на рис. 1). Таким образом, в рамках модели Кима–Андерсена о зависимости плотности критического тока от величины магнитной индукции, учитывая, что потери обратно пропорциональны плотности критического тока [13], нетрудно представить возможность линейной зависимости потерь в гранулах от величины плотности магнитного потока, захваченного образцом.

Исходя из этого, закономерно сделать заключение, что величина потерь в минимумах магнитопольевых зависимостей отражает в основном поглощение непосредственно в гранулах и тем самым характеризует, по существу, качество гранул керамического образца ВТСП. В

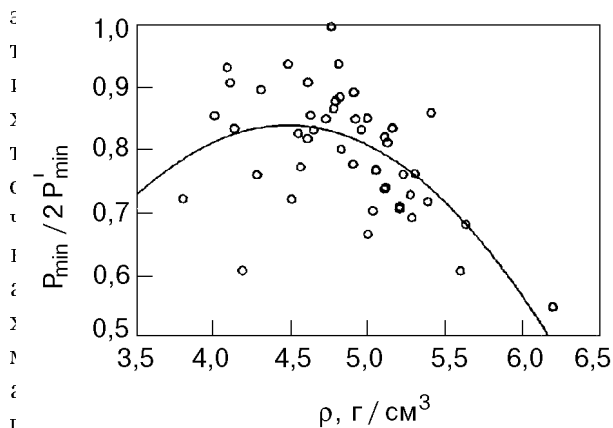


Рис. 4. Зависимость отношения потерь в минимуме в спадающем поле к удвоенному значению потерь в минимуме в образце с захваченным магнитным потоком при перемагничивании от плотности образцов.

олевых зависимостей потери ВЧ поля в межгранульной среде сведены к минимуму и представляют собой некую небольшую добавку к потерям в гранулах, ответственную за некоторое отклонение от соотношения  $P_{\min} = 2P'_{\min}$ . Естественно предположить, что величина этой добавки к основным потерям в гранулах зависит от технологических условий изготовления образцов. Можно оценить характер ее изменения, анализируя, в частности, поведение рассматриваемых потерь в образцах, различающихся плотностью  $\rho$ . С этой целью на рис. 4 приведены величины отношения  $P_{\min}/2P'_{\min}$  в зависимости от плотности  $\rho$  для более чем 50 образцов. Аппроксимация полученных экспериментальных значений полиномом второй степени указывает на наличие максимума при плотности  $\rho \sim 4,5 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, образцы с такой плотностью, возможно, отличаются максимально качественными гранулами, т.е. с наименьшей вероятностью наличия плоскостей двойникования, трещин и других дефектов кристаллической решетки.

#### 4. Выводы

Анализ особенностей ВЧ потерь электромагнитной энергии в минимумах магнитопольевых зависимостей поглощения в спадающем магнитном поле и сравнение их с минимумами потерь в образцах с захваченным магнитным потоком при перемагничивании указывает на доминирующее влияние в этих точках зависимостей потерь непосредственно в гранулах. Влияние на ВЧ поглощение в рассматриваемых минимумах статистического

разброса локальных магнитных полей по величине и направлению в межгранульном пространстве в известных работах несколько преувеличивается.

Вопреки общепризнанному мнению о том, что в основном потери ВЧ энергии в керамических образцах ВТСП в магнитных полях связаны с потерями в межгранульной среде, существуют отдельные значения магнитных полей на магнитопольевых зависимостях, в которых проявляется поглощение преимущественно в гранулах. По величине потерь в точках  $H_{\min}$  и  $H'_{\min}$  можно судить о качестве гранул.

Изучение характера поведения ВЧ потерь в образцах с захваченным магнитным потоком при перемагничивании указывает на применимость модели Бина также и для случая перемагничивания керамических образцов.

1. Л. С. Коханчик, В. А. Марченко, Т. В. Никифоров, А. В. Никулов, *ФНТ* **14**, 872 (1988).
2. J. E. Evetts and B. A. Glowacki, *Cryogenics* **28**, 641 (1988).
3. А. М. Долгин, С. Н. Смирнов, *СФХТ* **2**, 100 (1989).
4. E. Altshuler, S. Garsia, and A. Aguilar, *Phys. State Sol.* **2446**, K169 (1990).
5. Y. Yang, C. Beduz, and S. P. Ashworth, *Cryogenics* **30**, 618 (1990).
6. Y. Yang, C. Beduz, Z. Yi, and R. G. Scurlok, *Physica C* **201**, 325 (1992).
7. E. I. Pakulis and T. Osada, *Phys. Rev.* **B37**, 5940 (1988).
8. И. Е. Аронов, А. Я. Кириченко, А. А. Крохин, Н. Т. Черпак, *Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости*, изд-во ИМФ НАН Украины, Киев (1989).
9. Р. Лайхо, Е. Суппонен, Ю. П. Степанов, М. П. Власенко, Л. С. Власенко, *ФТТ* **31**, 268 (1989).
10. K. Kwasnitza and Ch. Widmer, *Cryogenics* **29**, 1035 (1989).
11. S. Zanella, L. Martini, V. Ottoboni, A. M. Rieca, and G. Ripamoniti, *Phys. and Mater. Scien. of High Temp. Supercond.* 252 (1989).
12. Е. В. Блинов, М. Г. Семенченко, В. Г. Флейшер, Б. П. Захарченя, П. П. Кулешов, Ю. П. Степанов, *Письма в ЖЭТФ* **48**, 147 (1988).
13. А. В. Гуревич, Р. Г. Минц, А. Л. Рахманов, *Физика композитных сверхпроводников*, Наука, Москва (1987).

#### HF energy losses at the minima of magnetic field dependences of absorption in HTSC

G. V. Golubnichaya, A. Ya. Kirichenko, I. G. Maximchuk, and N. T. Cherpak

The absorption power is investigated at the extreme points of its magnetic field dependences in high- $T_c$  superconductors. At the points of the minimum, a linear dependence of absorption on the magnetizing field has been established. As was found, the major contribution to the absorption at these

---

points is due to hf losses just in the grains. The relative amount of the losses at the minima on the magnetic field curves can be used for evaluating the grain quality.