

КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ В МЕТАЛЛООКСИДНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Ю.Ф. Ревенко, А.И. Дьяченко,
О.В. Григуть, В.М. Свистунов

Сейчас уже хорошо известно, что получение высококачественных контактов для соединения металлооксидных сверхпроводников с внешними электрическими схемами для измерений, например, больших плотностей токов, представляет серьезную технологическую проблему. В данной работе найдено и обосновано, что экспериментальные данные о квадратурной составляющей магнитной восприимчивости $\chi''(T)$ могут служить источником информации о величине и температурной зависимости плотности критического тока $j_c(T)$ высокотемпературных сверхпроводников.

Исследования выполнены на керамиках $\gamma\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, приготовленных из окислов по стандартной технологии твердофазного синтеза. Характерные размеры образцов $5 \times 2 \times 1.5 \text{ мм}^3$, температура сверхпроводящего перехода $T_c = 93 \text{ К}$ и ширина размытия $R(T)$ перехода $\Delta T_c = 2-3 \text{ К}$. Внешние магнитные поля экранировались до уровня 1 мкТл. Измерения восприимчивости $\chi(T)$ и разделение ее на синфазную χ' и квадратурную (диссипативную) χ'' части проведены на частоте $f = 2 \text{ кГц}$ по методике синхронного детектирования. На рис. 1 приведен температурный ход $\chi'(T)$, $\chi''(T)$, снятый в режиме отогрева в переменном поле $\mu_0 H_n = 10^{-5} \text{ Тл}$. В зависимости $\chi'(T)$ (рис. 1) наблюдается область резкого спада, связанная с переходом в сверхпроводящее состояние гранул металлокерамики ($T = T_c$), и размытый "хвост", совпадающий с появлением сигнала $\chi''(T)$. Для кривой $\chi''(T)$ характерен резкий подъем в окрестности T_{CO} (где $R(T) = 0$) и дальнейший плавный спад при последующем понижении температуры. Эти наблюдаемые и в других работах [1, 2] особенности поведения зависимости $\chi''(T)$ можно объяснить гистерезисными потерями, которые возникают в керамике при перемагничивании перколяционного кластера, существующего в гранулированных металлооксидах. Было установлено, что положение пика в $\chi''(T)$ чувствительно к слабым постоянным магнитным полям H_n , быстро смещающим его к низким температурам. При $H_n \geq 10^{-4} \text{ Тл}$ в $\chi''(T)$ в районе T_{CO} проявляется дополнительный узкий пик потерь, связанный с квази-частичными потерями нормальной компоненты среды. H_n на него влияет слабо.

Покажем связь $j_c(T)$ с гистерезисными потерями. Предполагаем, что металлокерамика является слабосвязанной джозефсоновской средой со средней плотностью критического тока (т.е. тока пиннинга потока) j_c . Для описания макроскопического распределения потока в такой среде можно использовать уравнение крити-

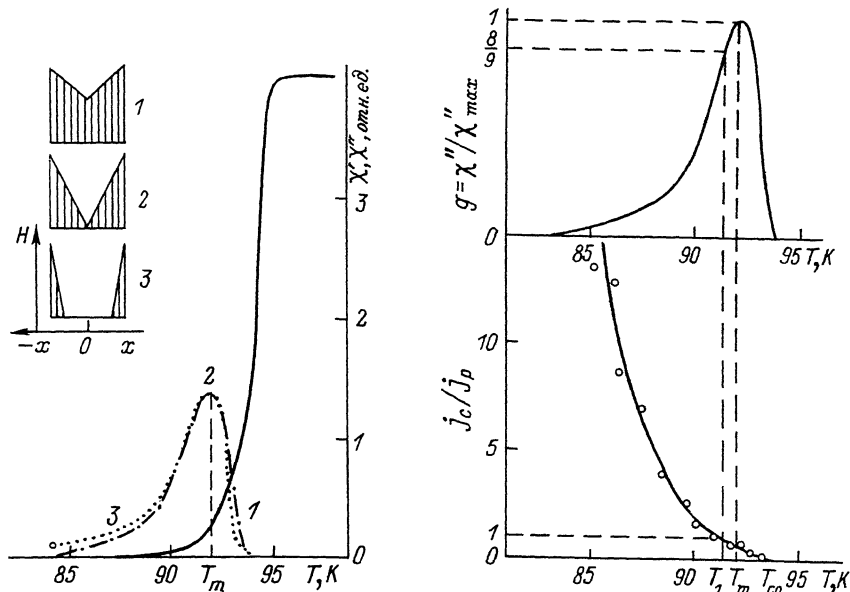


Рис. 1. Экспериментальные зависимости $\chi'(T)$, $\chi''(T)$ (непрерывная и штрих-пунктирные линии) для металлооксида $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Точками обозначен теоретический расчет гистерезисных потерь по (1). На вставке показан характер проникновения магнитного поля в образец при различных температурах (1–3).

Рис. 2. Температурная зависимость функции $q = \chi''/\chi''_{max}$ (вверху) и восстановленная из нее по формулам (2) температурная зависимость j_c/j_p для металлокерамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (непрерывная линия). Светлые кружки – экспериментальные значения j_c .

ческого состояния $\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_c$, справедливое для различных многосвязанных структур, в которых имеет место захват магнитного потока [3–5]. В этом приближении удельная мощность гистерезисных потерь $Q = \frac{1}{V} \int \vec{E} \vec{j}_c dV$, где электрическое поле \vec{E} определяется уравнением Максвелла $\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ (при малых переменных полях H величину μ можно полагать постоянной). Используя приведенные выражения для относительной величины гистерезисных потерь в плоскопараллельной пластинке, получаем

$$\chi''(T)/\chi''_{max} = Q/Q_{max} = \frac{8}{3} \begin{cases} 1/(3\beta), & \beta \geq 1 \\ \beta(1 - \frac{2}{3}\beta), & \beta \leq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

параметр $\beta(T) = j_c(T)/j_p$, где характерная плотность тока $j_p = H_m/b$, $2b$ - ширина пластины, H_m - амплитуда внешнего переменного поля (от частоты f этого поля гистерезисные потери не зависят).

Согласно выражениям (1) гистерезисные потери, возникающие при перематывании перколяционного кластера в гранулярной среде, пренебрежимо малы при $T \approx T_{CO}$, когда $j_c(T) \approx 0$, достигают максимума при $T = T_m$, когда переменная составляющая магнитного поля достигает середины образца, и стремятся к нулю при $T \ll T_m$, что связано с выталкиванием магнитного потока на края образца по мере роста критического тока в среде (вставка рис. 1). Наблюдается хорошее согласие теоретической и экспериментальной зависимостями $\chi''(T)/\chi''_{max}$ (при $\mu_0 H_m = 10^{-5}$ Тл), если для температурной зависимости $j_c(T)$ использовать формулу $j_c(T) = j_c^0 [(T_c - T)/\Delta T_c]^n$, где показатель $n \approx 1.5$ найден из экспериментально измеренной температурной зависимости критического тока $I_c(T)$ образца (см. [6]).

Обращая выражения (1), можно решить задачу нахождения температурной зависимости $j_c(T)$ в металлокерамике по величине относительных гистерезисных потерь $q = \chi''(T)/\chi''_{max}$:

$$j_c(T)/j_p = \begin{cases} \frac{8}{9}q & , \quad \frac{8}{9}q \geq q \geq 0 \\ \frac{3}{4}(1 + \sqrt{1-q}) & , \quad 1 \geq q \geq \frac{8}{9} \\ \frac{3}{4}(1 - \sqrt{1-q}) & , \quad 1 \geq q \geq 0 \end{cases} . \quad (2)$$

Восстановленная по формулам (2) температурная зависимость $j_c(T)$ показана на рис. 2 вместе с функцией $j_c(T)$, полученной непосредственно из измерений четырехзондовым способом по модуляционной методике ($j_c^{2Kc}(77\text{ K}) \approx 10 \text{ A/cm}^2$). Хорошее согласие этих кривых доказывает возможность получения прямой информации о функциональной зависимости $j_c(T)$ бесконтактным индуктивным способом.

В заключение отметим, что найденные по $\chi''(T)$ зависимости $j_c(T)$ ($j_c(T) \sim (T_c - T)^{3/2}$) большого количества образцов металлокерамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ свидетельствуют о реализации на межгранулярных прослойках в высокотемпературных сверхпроводниках слабосвязанных контактов $S-N-S$ -типа.

Л и т е р а т у р а

- [1] М а с а к и Н., Т а к а н о М., И к е д а У. - Jap. J. Appl. Phys., 1987, v. 26, N 10, p. L1749-L1751.
- [2] О д а У., Н а к а д а И., К о х а р а Т. - Jap. J. Appl. Phys., 1987, v. 26, Suppl. 3, p. 1023-1024.
- [3] У и л с о н М. Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. 407 с.
- [4] И о ф ф е Л.Б., Л а р к и н А.И. - ЖЭТФ, 1981, т. 81, № 2. с. 707-718.

- [5] Дьяченко А.И. Вихри в джоуфсоновских средах. Донецк, 1984, 64 с. – (Препринт/АН УССР. ДонФТИ: № 7(77)).
- [6] Свистунов В.М., Дорошенко Н.А., Ревенко Ю.Ф., Григуть О.В., Таренков В.Ю. – ФТТ, 1988, т. 30, в. 5, с. 1555–1558.

Поступило в Редакцию
26 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 22

26 ноября 1988 г.

СТРУКТУРНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КРИСТАЛЛОВ СИСТЕМЫ ОКИСЛОВ $Bi-Sr-Ca-Cu-O$

М.П. Петров, А.И. Грачев,
А.В. Иванов, М.В. Красинькова,
Н.Ф. Картенко, В.А. Пименов,
В.В. Поборчий, В.В. Потапов,
С.С. Рувимов, С.И. Шагин

Интерес к системе $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ вызван сообщениями о существовании фазы с $T_c \approx 110$ К [1], однако сложность химического состава, многофазность материала, пока не позволяли ее идентифицировать.

Цель настоящего сообщения – привести данные комплексного исследования структурных и физических характеристик сверхпроводящих кристаллов, полученных в указанной системе окислов.

Образцы кристаллов были получены методом спонтанной кристаллизации из расплава при медленном охлаждении. В качестве исходных компонентов были взяты Bi_2O_3 , $SrCO_3$, $CaCO_3$, CuO марки ЧДА в атомном соотношении по металлу $Bi : Sr : Ca : Cu = 2 : 2 : 1 : 2$. Синтез проводился на воздухе в платиновом тигле в температурном интервале $1000-1200$ °С [2]. Скорость охлаждения до 800 °С не превышала 5 °/час.

В результате синтеза была получена достаточно плотная стекло-видная масса, при раскалывании которой основной объем составили кристаллиты черного цвета неправильной формы, имевшие одну или несколько хорошо выраженных зеркальных граней. Характерный размер кристаллитов составил ~ 10 мм³. При дроблении образцов были обнаружены тонкие (~ 10 мкм) кристаллические пластинки с размером, не превышающим 1 мм².

Результаты рентгеноструктурного анализа полученных кристаллитов говорят о присутствии в них фазы с параметрами: $a = 5.410(5)$, $b = 5a = 27.00(5)$ и $c = 30.90(5)$ Å. Однако в ряде случаев, отдельные кристаллиты имеют параметр $c = 24.52(6)$ Å. Этот результат согласуется с данными [3] о присутствии двух струк-