

## НЕДИССИПАТИВНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ОТКЛИК МИКРОКРИСТАЛЛОВ $Y-Ba-Cu-O$ ОБУСЛОВЛЕННЫЙ СИНФАЗНОСТЬЮ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ТОКОВ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*М.М.Афанасьев, Е.В.Блинов, Л.С.Власенко,  
М.П.Власенко, Ю.П.Степанов, В.Г.Флейшер*

Обнаружены и исследованы индукционные эффекты, зависящие от размеров микрокристаллов  $Y-Ba-Cu-O$  и связанные с недиссипативным вкладом джозефсоновских токов, сфазированных в слабых (менее  $1 \text{ Э}$ ) магнитных полях.

В многочисленных работах, посвященных исследованию влияния слабых магнитных полей на ВЧ и СВЧ свойства ВТСП при температурах ниже критической рассмотрены различные механизмы потерь энергии, связанные с джозефсоновскими переходами <sup>1-4</sup>. В частности, наблюдение серий узких линий СВЧ поглощения в экспериментах с монокристаллами ВТСП объясняется диссипативным движением флюксонов <sup>2</sup>.

Приводимые в настоящей работе экспериментальные данные для образцов с изолированными микрокристаллами  $Y-Ba-Cu-O$  различных размеров позволяют идентифицировать недиссипативный вклад джозефсоновских токов, фазы которых в различных частицах не сильно различаются в магнитных полях  $H_0 < 1 \text{ Э}$ .

Эксперименты проводились с образцами состава  $Y_1Ba_2Cu_3O_{6,9}$ , полученными методом керамического синтеза с дополнительной термообработкой на стадии спекания при температуре  $950^\circ \text{C}$  в течение 46 ч в результате которой гранулы приобретали кристаллическую структуру и имели размеры до 100 мкм. Затем проводилось их дробление и разделение частиц по размерам, которые для образцов 1, 2, 3, 4 составляли 1–4 мкм, 2–6 мкм, 3–10 мкм, 10–50 мкм, соответственно. Каждый образец имел вес  $\sim 40 \text{ мГ}$ . Частицы изолировались друг от друга в парафиновой матрице. Образцы помещались в катушку колебательного контура, настроенного на частоту 9 МГц, а переменное поле  $H_1 \sin \omega t$  создавалось другой катушкой, соосной с катушкой регистрирующего контура. Постоянное магнитное поле  $H_0 \parallel H_1$  изменялось в пределах  $\pm 100 \text{ Э}$ . Эксперименты проводились либо в магнитном экране, либо при компенсации поперечных к  $H_0$  компонент внешнего магнитного поля. В работе регистрировались сигналы, соответствующие изменениям напряжения  $U$  на контуре с образцом при сканировании поля  $H_0$ . Сигналы наблюдались как с применением низкочастотной модуляции поля  $H_0$  и синхронного детектирования так и непосредственно с ВЧ детектора. Отметим здесь, что напряжение  $U$  складывается из наведенного переменным полем  $H_1$  напряжения  $U_H$  и суммарного напряжения

$U_{\Sigma} = \Sigma U_k$  ( $U_k$  — соответствует вкладу отдельной частицы), индуцированного токами в образце, т.е.  $U = U_{\Sigma} + U_H$ .

На рис. 1 а, б представлены сигналы на выходе ВЧ детектора для образцов 3 и 4, охлажденных в нулевом магнитном поле (ZFC), при сканировании поля  $H_0$  через нулевое значение. Как видно из рисунка, с увеличением размеров частиц амплитуда сигналов увеличивается, а ширины соответствующих линий уменьшаются. Ширина линий, измеренная между максимумами производной  $dU/dH_0$  составляла 0,97, 0,72, 0,45, и 0,27 Э для образцов 1, 2, 3 и 4, соответственно. Следует отметить, что ширина наблюдаемых линий сопоставима с полями, создающими 1 квант потока на средних площадях сечения  $\bar{S}$  частиц в образце.

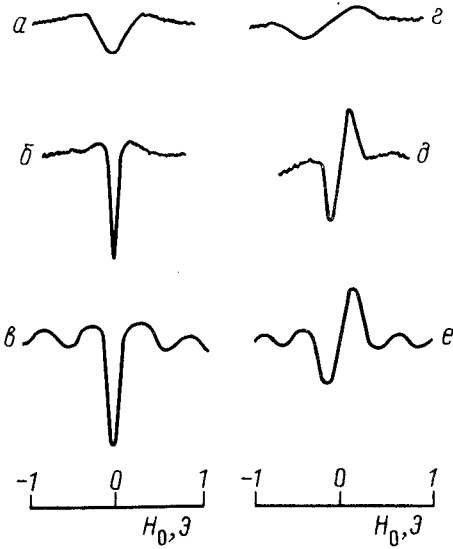


Рис.1

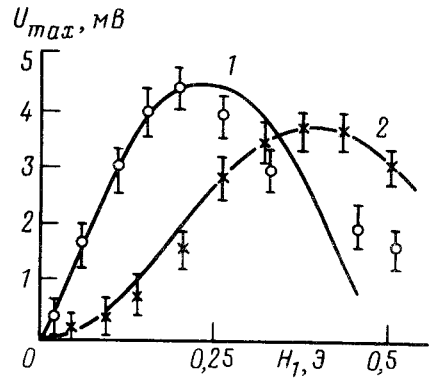


Рис.2

Рис. 1. Сигналы высокочастотного отклика образцов № 3 (а, з) и № 4 (б, д) на 1-й (а, б) и 2-й (з, д) гармониках; в, е — рассчитанные сигналы.

Рис. 2. Зависимость амплитуды высокочастотного отклика на 1-й (кривая 1) и 2-й (кривая 2) гармониках от амплитуды переменного поля  $H_1$  для образца № 4. Сплошные кривые расчет, точки — эксперимент.

Полученные результаты можно объяснить, предположив наличие токов в микрокристаллах, текущих по контурам с площадями  $S_k$ , содержащим слабые связи. В постоянном поле  $H_0$  и переменном  $H_1 \sin \omega t$  джозефсоновский ток в таком контуре будет <sup>5</sup>:

$$i_k(t) = -I_c \sin(\alpha_0 + \alpha_1 \sin \omega t + \gamma), \quad (1)$$

где  $\alpha_0 = 2\pi S_k H_0 / \Phi_0$ ,  $\alpha_1 = 2\pi S_k H_1 / \Phi_0$ ,  $\gamma = 2\pi L_k i_k(t) / \Phi_0$ ,  $I_c$  — критический ток слабой связи,  $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-7}$  Гс · см — квант магнитного потока,  $L_k$  — индуктивность контура с площадью  $S_k$ .

Член  $L_k i_k / \Phi_0$  определяет разброс фаз джозефсоновских токов в нулевом поле для частиц с разной величиной  $L_k$ . Считая этот член малым, после разложения (1) в ряд с помощью функций Бесселя, получаем

$$i(t) = -I_c [J_0(\alpha_1) \sin \alpha_0 + 2J_1(\alpha_1) \cos \alpha_0 \sin \omega t + 2J_2(\alpha_1) \sin \alpha_0 \cos 2\omega t + \dots]. \quad (2)$$

В измерительном колебательном контуре, настроенном на частоту  $\omega$ , этот ток индуцирует напряжение  $U_k = -M_1 S_k (di_k/dt)$ , которое складывается с напряжением, наведенным переменным полем  $U_H = -M_2 \omega \cos \omega t$  ( $M_1$  и  $M_2$  — коэффициенты пропорциональности). Для сигнала на частоте  $\omega$  из (2) имеем

$$U_\omega = -M_2 \omega \cos \omega t + 2M_1 I_c \omega \cos \omega t \sum_k S_k J_1(\alpha_1) \cos \alpha_0. \quad (3)$$

Таким образом, недиссипативный отклик джозефсоновских токов приводит к появлению противофазного по отношению к создаваемому полем  $H_1$  индукционного сигнала, что приводит к уменьшению напряжения, детектируемого амплитудным детектором на контуре при  $H_0 = 0$ . При этом знак сигнала оказывается противоположным знаку обычно наблюдаемых сигналов поглощения ВЧ и СВЧ мощности в ВТСП в слабых магнитных полях<sup>1</sup>.

На рис. 1 в показан вид сигнала, рассчитанный согласно (3). Учет разброса фаз токов  $i_k$ , обусловленного разбросом значений индуктивностей  $L_k$  (см. член  $L_k i_k / \Phi_0$  в (1)), и уменьшения  $I_c$  с ростом  $H_0$  приводит к дополнительному сглаживанию осцилляций на кривой  $U_\omega(H_0)$  на рис. 1в и к лучшему совпадению с экспериментальной формой сигнала.

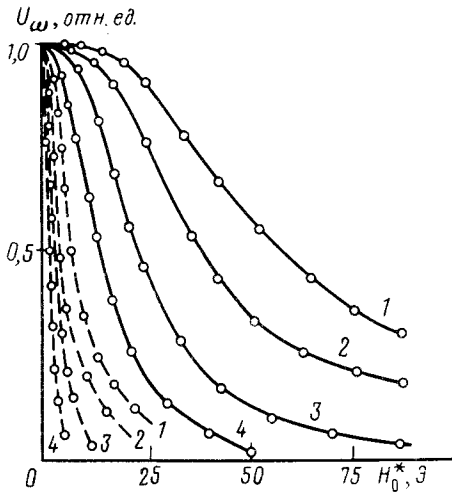


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала на 1-й гармонике в нулевом магнитном поле от напряженности намагничивающего поля  $H_0$  после ZFC (сплошные линии) и после FC (пунктирные линии) для образцов 1, 2, 3 и 4.

Нелинейность джозефсоновских токов приводит к появлению сигналов на гармониках основной частоты, которые были зарегистрированы в экспериментах вплоть до 4-ой. На рис. 1г, д показаны зарегистрированные сигналы на второй гармонике для разных образцов, а на рис. 1е форма рассчитанного сигнала  $U_{2\omega} \sim 4M_1 I_c \omega \sin 2\omega t \sum_k S_k J_2(\alpha_1) \sin \alpha_0$ . Отметим, что величина и фаза сигналов на четных гармониках зависит от взаимной ориентации полей  $H_0$  и  $H_1$ .

Рассмотренная модель подтверждается также зависимостями величин сигналов от амплитуды переменного поля  $H_1$ , которые описываются функциями Бесселя. Соответствующие экспериментальные данные и расчетные зависимости представлены на рис. 2. При расчете использовалось среднее значение площади  $\bar{S}$ , полученное для данного образца из ширины линии на основной частоте. При уменьшении размеров частиц максимальные значения сигналов на первой и второй гармониках достигаются при больших значениях поля  $H_1$ .

Для всех образцов максимальная интенсивность индуцированных сигналов наблюдалась при ZFC. При намагничивании образцов в поле  $H_0^*$  после ZFC, а также при FC интенсивность сигналов в нулевом поле уменьшалась, как это показано на рис. 3. Такое поведение сигналов объясняется захватом частицами магнитного потока, приводящим к разбросу фаз токов при  $H_0 = 0$ .

Таким образом обнаруженные особенности ВЧ свойств частиц ВТСП микронных размеров в полях  $< 1$  Э объясняются недиссипативными изменениями джозефсоновских токов, фазы которых близки в нулевом поле. По-видимому, аналогичную природу имеют узкие линии в слабых полях, наблюдавшиеся в экспериментах по СВЧ поглощению<sup>4</sup>. Вопрос о конкретной физической модели джозефсоновских переходов и контуров тока в изолированных частицах ВТСП микронных размеров требует отдельного рассмотрения.

Авторы благодарны Ю.М.Гальперину, В.И.Козубу и Б.П.Захарчене за обсуждение работы.

#### Литература

1. *Dučić A. et al.* Phys. Rev. B, 1989, 39, 4249.
2. *Blazey K.W. et al.* Phys. C, 1989, 157, 16.
3. *Maniwa Y. et al.* Phys. C, 1988, 156, 755.
4. *Бугай А.А., и др.* Тезисы II Всес. конф. по ВТСП. Киев, 1989, т. 1, стр. 224.
5. *Бароне А., Патерно Дж.* Эффект Джозефсона. М.: Мир, 1984.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
24 апреля 1990 г.