

## ЭФФЕКТЫ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА СВЧ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

А.А. Бугай, А.А. Буш, И.М. Зарицкий, А.А. Кончиц,  
Н.И. Каширина, С.П. Колесник

При  $T = 4,2 \pm 77$  К в монокристаллах ВТСП  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $R = \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Y}$ ) впервые обнаружено пороговое по  $P_{\text{СВЧ}}$  возбуждение периодических по магнитному полю  $H$  пиков поглощения СВЧ мощности. Экспериментальные данные интерпретированы как эффекты макроскопической квантовой интерференции с участием субструктур, вероятнее всего, границ двойникования.

При исследовании керамик ВТСП были обнаружены интенсивные сигналы нерезонансного поглощения на СВЧ в низких магнитных полях  $H$ .<sup>1,2</sup>, происхождение которых активно дискутируется. Совсем недавно подобные эффекты обнаружены на монокристаллах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .<sup>3</sup>

Нами проведено исследование низкополевых откликов на СВЧ ряда монокристаллов  $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $R = \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Y}$ ). Эксперименты проводились на супергетеродинном спектрометре ЭПР ( $\nu \approx 9,4$  ГГц) без применения высокочастотной модуляции  $H$ -поля. Отклик, пропорциональный изменению отраженной от резонатора мощности СВЧ, регистрировался осциллографически непосредственно с широкополосного выхода приемника. Образцы монокристаллов ВТСП с типичными размерами  $0,5 \times 0,5 \times 0,05$  мм располагались в пучности  $H_1$  — компонента СВЧ-поля резонатора.

Обнаружено, что при некотором пороговом значении падающей СВЧ мощности  $P^*$ , зависящем от величины внешнего магнитного поля  $H$ , возникает периодическая по  $H$  последовательность импульсов отраженной мощности (рис.1). Величина сигнала критична к  $P_{\text{СВЧ}}$

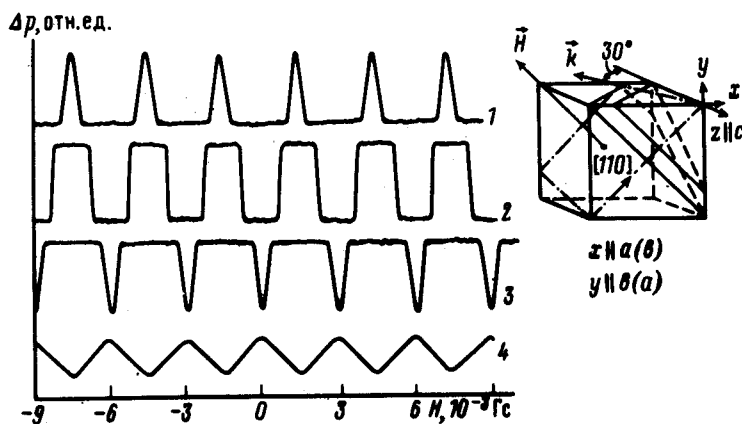


Рис.1 Периодическая последовательность пиков поглощения для образца  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  при  $P_{\text{СВЧ}} > P^*$  ( $P^* \approx -50,5$  дБ).  $T = 4,2$  К.  $P_{\text{СВЧ}}$ , — дБ: 1 — 50; 2 — 49,5; 3 — 49; 4 — 48,5. 0 дБ соответствует 0,1 Вт. Представлен также схематический вид исследуемого монокристалла с обозначением субструктур, обсуждаемых в работе

Максимальная величина импульсов наблюдается в интервале  $\sim \pm 1$  дБ по отношению к оптимальной мощности  $P^{\text{опт}} \approx P^* + 1$  дБ (рис.1, 2). При  $P_{\text{СВЧ}} > P^{\text{опт}}$  имеются более слабые максимумы сигналов той же последовательности.

Установлено, что поглощение СВЧ мощности существует и в отсутствие изменения  $H$ , сохраняя пороговый характер (рис.2). Максимальная величина пиков поглощения в изменяющемся  $H$ -поле соответствует полной амплитуде "ступеньки" 1 на рис.2 при выборе  $p^{\text{опт}}$  на ее полувысоте.

Исследование угловой зависимости периода наблюдаемых осцилляций  $\Delta H$  показало, что  $(\Delta H)^{-1} = (\Delta H_0)^{-1} |\sin \theta|$ , где  $\Delta H_0 \approx 3 \cdot 10^{-3}$  Гс – минимальный период осцилляций;  $\theta$  – угол между направлением  $H$  и вектором  $k$  (рис.1), либо направлением  $[110]$  при вращении  $H$  в плоскостях  $(zx)$  и  $(xy)$ , соответственно.

Из рис.1 видно, что положение каждого пика наблюдаемой последовательности жестко связано со значением  $H$ .

Эффект сохраняется вплоть до  $H \approx 500$  Гс, при этом амплитуда пиков имеет зависимость, представленную на рис.3 при подборе  $p_{\text{СВЧ}} \approx p^{\text{опт}}$ . Амплитуда периодических сигналов и соответствующее значение  $\sqrt{p^{\text{опт}}}$  с ростом  $T$  уменьшаются линейно с одинаковым наклоном до  $T \approx 65$  К. При  $T < 65$  К наблюдается резкий спад сигнала и его полное исчезновение при  $T \approx T_c \approx 75$  К (для исследуемого кристалла).

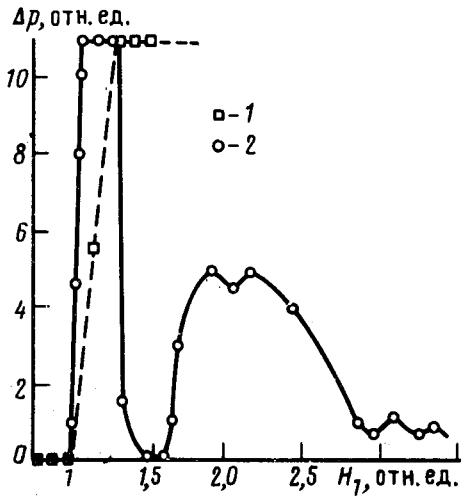


Рис.2

Рис.2 Зависимость величины сигналов поглощения СВЧ в образце  $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  от амплитуды  $H_1$  – компонента СВЧ поля в постоянном (1) и изменяющемся (2) внешнем  $H$ -поле

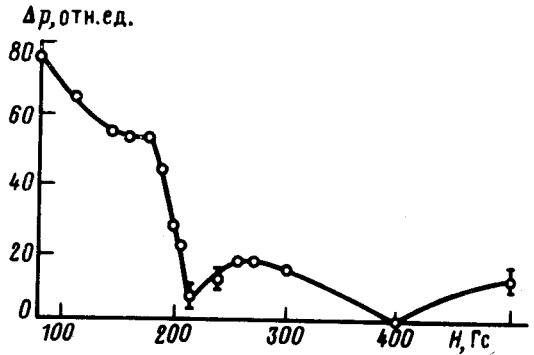


Рис.3

Рис.3 Зависимость амплитуды периодических сигналов от величины  $H$  поля.  $T = 4,2$  К. Ориентация кристалла та же, что и на рис. 1

Аналогичные эффекты возбуждения периодических последовательностей сигналов наблюдались и в других сверхпроводящих кристаллах. Однако, величина  $\Delta H_0$  существенно отличалась для различных образцов. Например, для одного из образцов  $DyBa_2Cu_3O_{7-\delta}$   $\Delta H_0 \approx 4$  Гс. Слабые сигналы обсуждаемого типа наблюдались также на монокристаллах  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ .

Наряду с сигналами, возникающими при определенном, пороговом значении  $p_{\text{СВЧ}}$  в некоторых образцах наблюдаются не критичные к  $p_{\text{СВЧ}}$  сигналы характерной "треугольной" формы (см. 1, кривая 4).

Полученные экспериментальные данные типичны для явлений квантовой интерференции в сверхпроводниках с джозефсоновскими связями <sup>4</sup>. Это свидетельствует о том, что в некоторых монокристаллах ВТСП реализуются естественные "сквид-структуры", слабыми связями в которых могут быть границы двойникования, направления которых указаны на рис.1 тонкими сплошными линиями, либо другие протяженные дефекты, например ступеньки роста.

Из величины  $\Delta H_0$  может быть оценена площадь контура "сквида"  $\Delta S_0 = (\Phi_0 / \Delta H_0) = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$  ( $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$  — квант магнитного потока). Используя линейный размер монокристалла в направлении  $[110]$   $l \approx 0,07 \text{ см}$ , получаем второй линейный размер  $\sim 10^{-3} \text{ см}$ , что в несколько раз меньше толщины кристалла. Если предположить, что слабой связью является граница двойникования, толщина которой  $\sim 10^{-6} \text{ см}$ , то из периода  $\delta H \approx 200 \text{ Гс}$  (рис.3) находим длину слабой связи  $\sim 10^{-3} \text{ см}$ , что не противоречит имеющимся в литературе данным о размерах двойников в монокристаллах ВТСП.

Пороговый по  $p_{\text{СВЧ}}$  характер возбуждения периодических последовательностей импульсов связан, по-видимому, с индуцированием при  $p_{\text{СВЧ}} \approx p^* H_1$  — компонентом СВЧ поля токов  $I \gtrsim I_c$  в контуре, включающем джозефсоновский переход, где  $I_c$  — критический ток слабой связи. Из полученных данных следует, что величина  $I_c$  определяет как значение  $p^{\text{опт}}$ , близкое к  $p^*$ , так и максимальную амплитуду пиков периодической последовательности (см.рис.1,2). Установленная экспериментально температурная зависимость этих величин связана с падением  $I_c$  с ростом  $T$ .

Наша интерпретация отличается от <sup>2,3</sup>, где рассматриваются процессы пиннинга-депиннинга флюксоидов, которые могут быть индуцированы лишь при наличии изменяющегося  $H$ -поля и не должны критически зависеть от  $p_{\text{СВЧ}}$ . Не исключено, что пороговый по  $H_1$  характер возникновения пиков поглощения в монокристаллах ВТСП обусловлен параметрическим возбуждением особого типа поверхностных волн, связанных с экранирующими сверхпроводящими токами, интерференция которых приводит к наблюдаемым эффектам.

Выяснение истинной природы наблюдаемого явления проводится в настоящее время.

#### Литература

1. Власенко Л.С., Семенченко М.Г., Степанов Ю.П. Письма в ЖТФ, 1987, **13**, 1435.
2. Portis A.M., Blazey K.W., Müller K.A., Bednorz J.G. Europhys.Lett., 1988, **5**, 467.
3. Blazey K.W., Portis A.M., Müller K.A. et al. Preprint of Proc.Int. Conf. MMHTSC, 1988, Interlaken, Switzerland.
4. Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. М.: Мир, 1984, 639 с.