

## О ВОЗМОЖНОСТИ КВАНТОВАНИЯ КОНДАКТАНСА В РЕЗИСТИВНОМ СОСТОЯНИИ СЛОИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ, ВЫЗВАННОМ СВЧ ПОЛЕМ

Ю.И.Латышев

Институт радиотехники и электроники РАН

103907 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 декабря 1997 г.

Обнаружено, что на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) слоистых структур с внутренним эффектом Джозефсона при транспорте поперек слоев по действием СВЧ поля наблюдаются ступени постоянного дифференциального сопротивления, величина которого близка обратному кванту кондактанса,  $h/2e^2$ . Предложено качественное объяснение этого результата.

PACS: 74.72.Hs, 74.80.Dm

Как известно, в слоистых сверхпроводниках возможно наблюдение внутреннего эффекта Джозефсона на естественной слоистой кристаллической структуре материала (в качестве обзора см., например, [1]). Строго говоря, для наблюдения обоих эффектов Джозефсона, стационарного и нестационарного, необходимо, чтобы размер контакта в плоскости слоев был меньше характерной джозефсоновской длины  $\lambda_J = s(\lambda_c/\lambda_{ab})$ , где  $s$  – расстояние между элементарными сверхпроводящими слоями,  $\lambda_c, \lambda_{ab}$  – анизотропная лондоновская глубина проникновения. В типичных слоистых ВТСП-материалах типа BSCCO  $\lambda_J$  составляет  $\sim 1 - 2$  мкм. В последнее время были предприняты значительные усилия для уменьшения латеральных размеров подобных структур. Было показано, что стационарный внутренний эффект Джозефсона начинает проявляться на переходах с размерами  $< 20$  мкм [2]. Попытки наблюдения нестационарного внутреннего эффекта Джозефсона на образцах с размерами  $< 10$  мкм, тем не менее, не дали положительных результатов [3,4]. Вместо ожидавшихся ступеней постоянного напряжения, ступеней Шапиро, на ВАХ переходов под действием СВЧ поля в ряде случаев наблюдались резистивные особенности, положение которых по напряжению зависело от мощности СВЧ поля. В настоящей работе сообщается о наблюдении на ВАХ под действием СВЧ поля ступеней постоянного дифференциального сопротивления  $R_d$ , величина которого близка обратному кванту кондактанса,  $R_d \approx h/2e^2$ .

Эксперимент проводился на переходах типа overlap, полученных селективным ионноплазменным травлением высококачественных монокристаллических вискероов BSCCO 2212 [2]. Основные результаты будут приведены для перехода с размерами  $L_a \times L_b \times L_c = 4 \times 8 \times 0.12$  мкм. Переход помещался в 3-сантиметровом волноводе в пучности  $E$ -поля. ВАХ измерялись четырехзондовым методом. Измерения проводились в основном при гелиевых температурах. Критическая плотность тока вдоль оси  $c$  составляла  $3 \cdot 10^2 - 10^3$  А/см<sup>2</sup> при 4.2 К, примерно на 3 порядка меньше, чем измеренная на тех же вискерах вдоль оси  $a$ .

На рис.1 показано семейство ВАХ образца в резистивном состоянии, вызванном СВЧ полем, при мощностях СВЧ излучения, падающего на образец,  $W > 200$  мкВт. В отсутствие воздействия СВЧ излучения критический ток образца  $I_c$  составляет

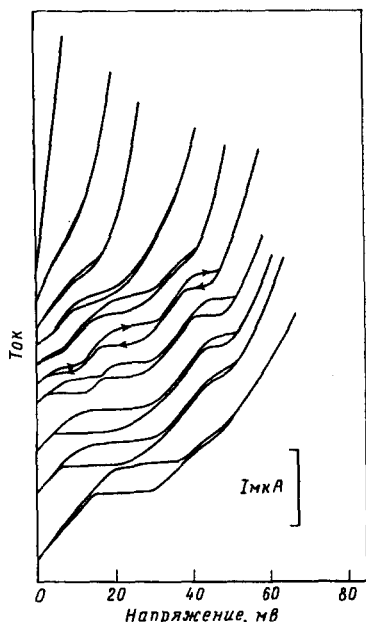


Рис.1. Ступеньки постоянного дифференциального сопротивления, вызванные на ВАХ BSCCO 2212 слоистой структуры СВЧ полем частотой 11.5 ГГц. Кривым сверху вниз соответствуют следующие значения падающей мощности в мВт: 0.20; 0.40; 0.63; 0.89; 1.26; 1.48; 1.59; 1.78; 1.87; 2.19. Размеры структуры составляли  $4 \times 8 \times 0.12$  мкм вдоль осей  $a, b$  и  $c$ , соответственно;  $T = 4.2$  К. Кривые смещены по оси токов, так что нуль каждой кривой по току соответствует нулю по напряжению

$\approx 100$  мкА. Критический ток подавлялся до нуля при  $W \approx 20$  мкВт. Как видно из рис.1, действие СВЧ поля приводит к появлению резистивных особенностей (ступенек) на ВАХ. Отметим характерные черты наблюдавшихся особенностей: 1) ступеньки соответствуют приблизительно одному наклону (дифференциальному сопротивлению) величиной 13–14 кОм, не зависящему от мощности излучения (рис.2); 2) ступеньки расположены приблизительно эквидистантно по  $V$  с интервалом  $\Delta V \approx 10$  мВ; 3) амплитуда ступенек по току немонотонно зависит от  $W$ ; 4) ступеньки расположены в области токов  $\approx 1$  мкА, а величина первой и второй ступенек по току составляет  $\approx 0.5$  мкА.

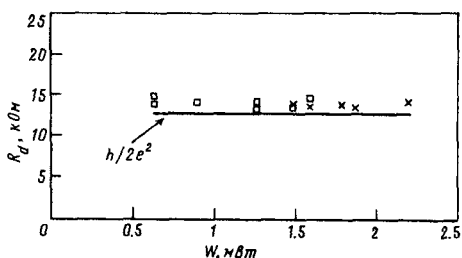


Рис.2. Зависимость дифференциального сопротивления первой ( $\square$ ) и второй ( $\times$ ) ступенек от мощности СВЧ излучения. Сплошная кривая соответствует величине  $R = h/2e^2$

Наиболее примечательным результатом оказывается то, что величина дифференциального сопротивления на ступеньке оказывается близкой величине обратного кванта кондуктанса,  $h/2e^2$  (рис.2).

Предлагаемая интерпретация основана на том, что слоистый сверхпроводник вдоль оси  $c$  можно рассматривать как систему с модулированным потенциалом (см. рис.3), например, в силу того, что модуль параметра порядка модулирован поперек слоев [1]. При этом потенциал рассматривается в квазиклассическом смысле.

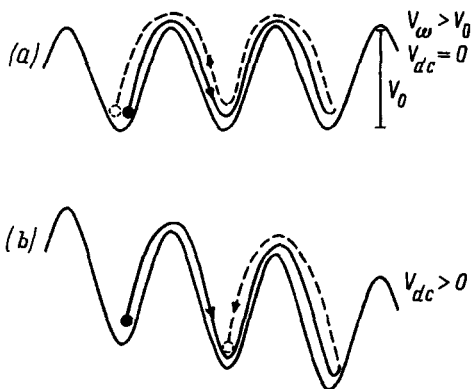


Рис.3. Схематическая картина траектории перемещения заряда под действием СВЧ поля достаточно большой амплитуды в периодическом потенциале за первые полпериода (сплошная кривая) и за вторую половину периода (штриховая кривая) в условиях действия только СВЧ поля (а) и в условиях совместного действия СВЧ и постоянного поля (б)

Пусть в минимум потенциала помещен заряд  $q$ ,  $q = ne$ , и приложено внешнее высокочастотное поле  $E_\omega$  достаточно большой амплитуды, чтобы перебросить заряд из одной потенциальной ямы в другую. Это вызовет переменный ток в системе, однако очевидно, что усредненный за период постоянный ток  $\langle I_{dc} \rangle$  будет равен нулю. Представим теперь, что, помимо переменного поля, приложено также постоянное поле  $E$  (рис.3б). Тогда окажется возможной ситуация, когда за первый полупериод заряд будет двигаться вперед в большем среднем поле, чем назад, и может переместиться вперед на две ( $n$ ) ямы, а назад – на одну ( $n - k$ ) яму (рис.3б), то есть окажется, что за период колебаний внешнего поля произошло перемещение заряда на одну ( $k$ ) яму. Другими словами, появится ненулевой средний за период постоянный ток, связанный с этими процессами:

$$\langle I_{dc} \rangle = knef. \quad (1)$$

Подобная ситуация известна, как  $ac-dc$ -интерференция, в системах с волной зарядовой плотности (ВЗП) в модели, когда движение ВЗП рассматривается как движение заряженной частицы в периодическом потенциале (см., например, [5]). В то же время возможно перемещение заряда путем подбарьерного джозефсоновского туннелирования. В этом случае под действием напряжения  $V_{dc}$  в системе возникают переменные токи, частота которых пропорциональна  $V_{dc}$ :

$$V_{dc} = pN\hbar\nu/2e, \quad (2)$$

где  $p$  – номер гармоники,  $N$  – число элементарных переходов в контакте. В случае, когда частоты обоих рассмотренных процессов сравниваются,  $f = \nu$ , можно ожидать резонанса, проявляющегося в некоторой области захвата частот  $\delta f = \delta\nu$ , откуда следует

$$\frac{dV}{dI} = \alpha \frac{\hbar}{2e^2}, \quad (3)$$

где  $\alpha = pN/kn$ . Таким образом, резонансные ступеньки напоминают ступени Шапиро, но с конечным наклоном, определяемым величиной  $\alpha\hbar/2e^2$ .

Величина  $\hbar/2e^2$  составляет  $\approx 12.7$  кОм. На эксперименте наблюдается величина  $\approx 13.5$  кОм (рис.2). В рамках рассмотренной модели это должно соответствовать условию  $\alpha \approx 1$ . Оценка параметра  $\alpha$  для эксперимента дает следующее. Для нашего

образца  $N \approx 80$ , положение первой ступеньки по току соответствует  $\approx 0.5$  мкА, что дает для  $f = 11.5$  ГГц величину  $kn \approx 300$ . Величина  $p$  может быть оценена из (2), считая положение первой ступеньки по  $V$  равным  $\Delta V \approx 10$  мВ. Это дает для  $p$  величину  $p = 4$ . Окончательно имеем  $\alpha = pN/kn \approx 1$  в хорошем согласии с моделью.

Оценки величины СВЧ полей, начиная с которых проявляются ступеньки, дают величину амплитуды СВЧ потенциала на индивидуальном переходе  $\sim 20$  мВ, что сравнимо с величиной модуляции потенциала  $V_0$  поперек слоев, составляющую  $\sim \Delta = 15 - 30$  мВ.

В эксперименте отчетливо наблюдались две ступеньки, амплитуды которых по току немонотонно зависели от мощности излучения, причем максимум амплитуды первой ступеньки примерно соответствовал по мощности появлению второй ступеньки, а максимум амплитуды второй ступеньки – исчезновению первой ступеньки. Ступеньки имеют гистерезисный характер по току. Такое поведение во многом напоминает поведение ступеней Шапиро в *underdamped*-режиме. При этой второй ступеньке, по всей видимости, соответствует резонанс на гармонике с удвоенной частотой относительно первой ступеньки.

Таким образом, предложенная модель качественно описывает наблюдаемое явление. Пока еще остается не вполне ясным, таким образом система подстраивается, сохраняя в условиях резонанса параметр  $\alpha \approx 1$ , и как этот параметр будет зависеть от размеров перехода, числа элементарных слоев и других характеристик системы.

Работа частично докладывалась на Первой Международной конференции по внутреннему эффекту Джозефсона и ТГц-плазменным колебаниям, Сендай, 1997. Автор благодаря участникам конференции С.Н.Артеменко, И.Бозовичу, Н.Онгу, П.Мюллеру, А.Устинову, а также П.Монсо и О.Буиссону за обсуждение результатов работы. Работа была поддержана Российской государственной программой по высокотемпературной сверхпроводимости (проект 95028). Автор благодарен Центру исследований при низких температурах (CRTBT-CNRS), Гренобль, где была выполнена часть работы.

- 
1. P.Müller, *Intrinsic Josephson Effects in Layered Superconductors*, Ed. R.Helbig, Festkörperproblem, Advances in Solid State Physics, vol. 34, Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 1994, p.1.
  2. Yu.I.Latyshev, J.E.Nevelskaya, and P.Monceau, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 932 (1996).
  3. Yu.I.Latyshev, P.Monceau, and V.N.Pavlenko, in *Proceed. of Intern. Symp. Intrinsic Josephson effect and THz Plasma Oscillations in High Tc superconductors*, Feb.23–25, 1997, Sendai, *Physica C***293**, 174 (1997).
  4. W.Prusseit, M.Rapp, K.Hirata and T.Mochiku, *ibid.* p.25.
  5. For a review, see *Density Waves in Solids*, Ed. G.Gruner, Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.