

## Дисперсия джозефсоновского тока в гибридных гетеропереходах на металлооксидных сверхпроводниках

Ю.В. Кислинский, К.И. Константибян, Г.А. Овсянников  
 Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия  
 Ф.В. Комиссинский  
 Чалмерский технологический университет, Гетеборг, Швеция

**В гетеропереходах Nb/Au/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>, изготовленных на пленках YBCO с наклонной осью c, обнаружено уменьшение максимальной амплитуды первой ступени Шапиро с увеличением частоты СВЧ воздействия. Возникновение дробного детекторного отклика и дробной n=1/2 ступени Шапиро указывают на наличие второй гармоники в ток-фазовой зависимости сверхпроводящего тока.**

Экспериментально установлено, что в металлооксидных пленках сверхпроводника YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) реализуется сложный тип симметрии сверхпроводящего параметра порядка, в котором преобладает  $d_{x^2-y^2}$ -компонента (*d*-сверхпроводник) [1]. В контактах *d*-сверхпроводников последовательность зеркальных и андреевских отражений квазичастицы вызывает образование связанных андреевских состояний при малых энергиях (НСАС) на (110) плоскости *d*-сверхпроводника, локализованных вблизи границы раздела на расстоянии порядка длины когерентности [2]. Несинусоидальная ток-фазовая зависимость (ТФЗ), содержащая компоненту  $\sin(2\varphi)$ , вызванная НСАС, наблюдалась в экспериментах в 45° бикристаллических переходах [3], так и в гетеропереходах на YBCO [4]. Помимо несинусоидальной ТФЗ гетеропереходов (ГП) Nb/Au/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> на наклонных YBCO пленках, в работе сообщается об обнаружении частотной дисперсии сверхпроводящего тока, которая не описывается известными теоретическими расчетами.

На подложках (7 10 2) NdGaO<sub>3</sub>, были выращены YBCO пленки с отклонением оси c от нормали к подложке на угол 11°. Лазерное напыление проводилось при температуре 790° С и давлении кислорода 0.6 мбар. Критические температуры YBCO были 85 – 90 К, плотности тока -  $5 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup> при 77 К. На поверхности наклонных пленок в микроскопе атомных сил наблюдались ступени роста, короткие стороны которых – плоскости (110) YBCO, а длинные стороны – (001). Высота ступеней - около 20 нм. Квадратные переходы со стороной L от 10 до 50 мкм были изготовлены напылением Au in situ, магнетронным напылением Nb и ионным травлением. Электрические параметры измерялись при 4 К под действием СВЧ в диапазоне 36 – 110 ГГц. Сопротивления  $R_N S$  ГП были выше  $7 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, что дает оценку прозрачности барьера Au/YBCO  $D \sim 10^{-5}$  [4]. Размеры ГП были меньше джозефсоновской глубины проникновения  $\lambda_J$ , которая для ГП с плот-

ностью критического тока 10 А/см<sup>2</sup> составляет 80 мкм. Высокие сопротивления и отсутствие избыточного тока на ВАХ подтверждают отсутствие сверхпроводящих закороток (рис. 1).

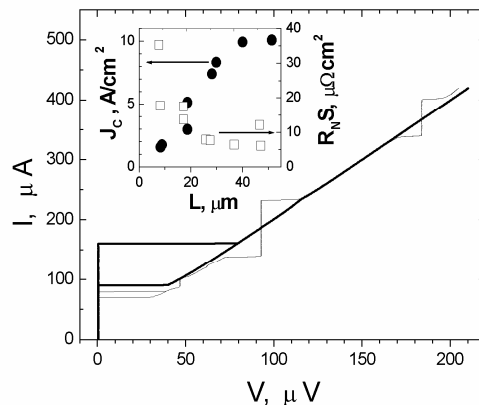


Рис. 1. Автономная ВАХ ГП 40x40 мкм<sup>2</sup> – толстая линия, и ВАХ под действием СВЧ 43,5 ГГц – тонкая линия. На вставке: плотности криттока - круги, значения  $R_N S$  – квадраты.

Вклад андреевских уровней с нулевой энергией проявлялся в наличии пика проводимости нулевого смещения полушириной 5 мВ. Пик измерялся по зависимости дифференциального сопротивления  $R_D(V)$ . Этот пик указывает на наличие *d*-сверхпроводящего электрода и перенос носителей через грани (110) YBCO [4].

Дробные ступени Шапиро при напряжениях  $V_{1/2} = hf/4e$  наблюдались на ГП в диапазоне частот 36 – 56 ГГц. На рис. 1 дробная ступень видна при  $V_{1/2} = 45$  мкВ. Эти ступени могут быть обусловлены наличием второй гармоники  $\sin 2\varphi$  в ТФЗ. ВАХ переходов имеют гистерезис, вызванный емкостью (параметр Маккамбера ГП 3÷6). Влияние емкости приводит к образованию дробных ступеней при превышении мощности СВЧ некоего порогового уровня [5]. Но при малых мощностях СВЧ воздействия около  $10^{-2} I_C^2 R_N$  нами наблюдался дробный детекторный отклик, что указывает на несинусоидальную ТФЗ.

При малых размерах переходов, зависимость критического тока  $I_0$  и высоты первой ступени  $I_1$  от СВЧ мощности хорошо описываются моделью резистивно-шунтированного перехода (RSJ) [6]. Высота субгармонической ступени от СВЧ мощности показана на рис. 2а.

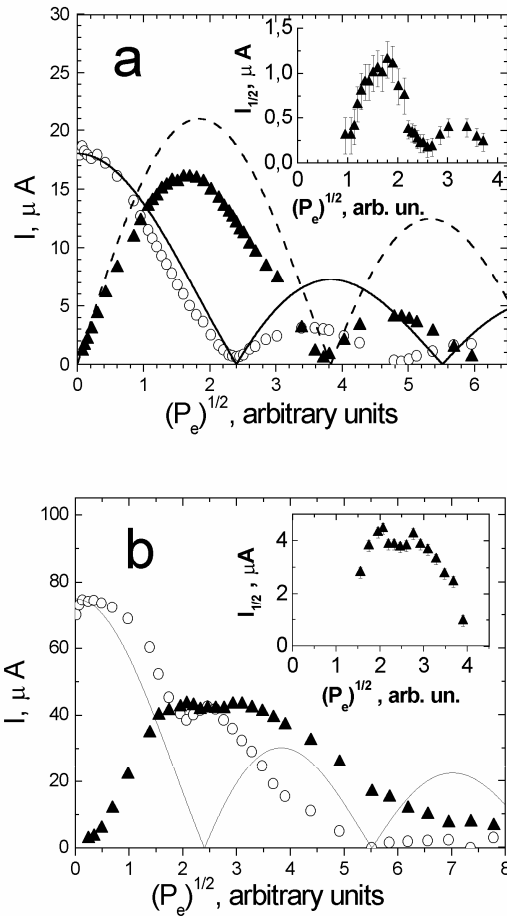


Рис.2. Зависимости от СВЧ мощности критического тока переходов – круги, высоты первой ступени – треугольники. Сплошная и штриховая линии - аппроксимации нулевой и первой функциями Бесселя соответственно; а – переход 20 мкм, частота 51.4 ГГц, б – переход 30 мкм, частота 55.7 ГГц. На вставках - высоты субгармонических ступеней.

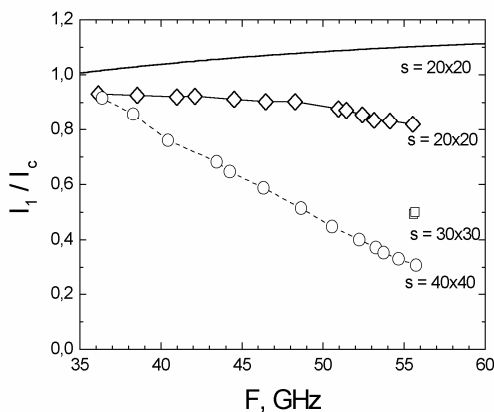


Рис.3. Зависимость высоты первой ступени Шапиро, которая нормирована на критический ток, от частоты СВЧ излучения. Сплошная линия – расчет по RSJ модели для перехода размером 20 мкм.

С увеличением размеров ГП зависимости  $I_c(P_e)$  и  $I_1(P_e)$  отклоняются от RSJ (рис 2b). Если для перехода  $L=20$  мкм отклонение  $I_{1\max}/I_c$  от RSJ значения для данного отношения  $hf_e/2eI_cR_N$  составляло 24%, то для перехода с  $L=30$  мкм уже 50%. Оказалось, что отношение максимумов субгармонической и первой ступеней не зависит от размеров ГП и примерно равно  $I_{1/2\max}/I_{1\max} \approx 0,1$ . Это отношение служит мерой компоненты  $\sin 2\phi$ .

На рис. 3 показана зависимость от частоты  $I_{1\max}/I_c$  для переходов трех размеров. Видно, что отклонение  $I_{1\max}/I_c$  от расчетов по RSJ модели для ГП малых размеров  $L=20$  мкм при частоте  $f_e=40$  ГГц мало (10 %). С увеличением  $L>20$  мкм это отклонение увеличивается, и наблюдается частотная зависимость  $I_{1\max}/I_c$ . Поскольку  $I_{1\max}/I_c$  пропорционально амплитуде первой гармоники джозефсоновской генерации, то уменьшение этой величины с частотой указывает на изменение сверхпроводящей компоненты тока  $I_S$ . В туннельных переходах  $s$ -сверхпроводников  $I_S$  сильно изменяется вблизи щели, что для Nb соответствует частоте 600 ГГц и щели 1.2 мВ. Из рис. 3 видно, что частотная зависимость  $I_1$  проявляется при напряжениях порядка 0.1 мВ. Возможно, она вызвана состояниями, которые возникают из-за потенциальной ямы вблизи границы. Их энергии значительно ниже щели YBCO.

Таким образом, из измерения динамических свойств ГП обнаружено, что даже для сосредоточенных (по сравнению с джозефсоновской глубиной проникновения) переходов проявляются зависящие от размера ГП дисперсионные особенности проявления эффекта Джозефсона, напрямую не связанные с величиной щели сверхпроводника

Авторы благодарны И.В. Борисенко, В.К. Корневу и Т.Ю. Карминской за обсуждение результатов. Работа финансировалась ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники”, грантами научных школ Президента России НШ-1344.2004.2, РФФИ 04-02-16818а, ИНТАС-2001-0809, ИНТАС- 2001-0249, МНТЦ-2369

1. С.С. Tsuei, J.R. Kirtley, Rev. Mod Phys. 72, 969 (2000).
2. Т. Lofwander, V. S. Shumeiko, G. Wendin, Superconducting Sci. Technol. 14, R53 (2001).
3. Е. Il'ichev, V. Zakozarenko, R. Ijsselsteijn, et al., Phys. Rev. Lett. 81, 894 (1998).
4. Ф.В. Комиссинский, Г.А. Овсянников, Ю.В. Кислинский и др., ЖЭТФ, 122, 1247 (2002).
5. Т. Y. Karminskaya, V. K. Kornev, Proceed. of Int. Student's Workshop on Microwave Applications of New Physical Phenomena, Saint-Petersburg, Russia, 7-9 June, 2004, to be published.
6. К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих, Системы с джозефсоновскими контактами, МГУ, Москва (1978).