

# Угловые и амплитудные зависимости критического тока в гибридных гетероструктурах с антиферромагнитной прослойкой

Ю.В. Кислинский<sup>1</sup>, Г.А. Овсянников<sup>1,2</sup>, Ф.В. Комиссинский<sup>1,2</sup>, И.В. Борисенко<sup>1</sup>, К.И. Константианян<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН, Моховая ул. 11-7, Москва 125009, Россия.

<sup>2</sup> Чалмерский технологический университет, Гетеборг, Швеция.

e-mail: [yulii@hitech.cplire.ru](mailto:yulii@hitech.cplire.ru)

В последнее время значительное внимание уделяется переходам сверхпроводник/антиферромагнетик/сверхпроводник (S/AF/S), например, созданы структуры  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4/\text{La}_2\text{CuO}_4/\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$ , с толщиной барьера в одну элементарную ячейку [1]. Переходы Джозефсона с AF барьерами предложены в качестве устройств, критический ток которых может контролироваться слабыми магнитными полями [2]. Мы исследовали структуры  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  с антиферромагнитной прослойкой  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2$ .

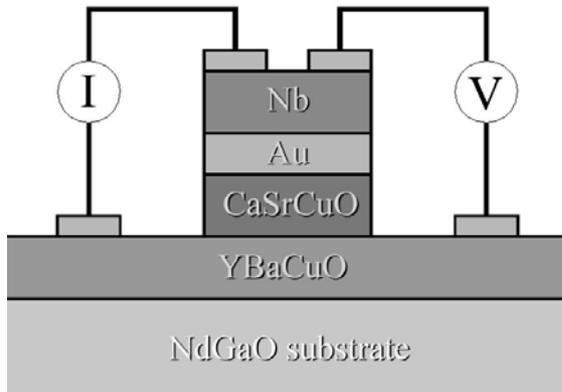


Рис. 1. Разрез структуры. Толщины слоев:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  200 nm,  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2$  20 ÷ 50 nm, Au 10 ÷ 20 nm, Nb – 200 nm.

Эпитаксиальные гетероструктуры  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  напылялись на подложки из  $\text{NdGaO}_3$ , с помощью лазерной абляции при температуре  $T=800\text{C}$ . После охлаждения, без разрыва вакуума наносилась пленка Au. Использовались два состава  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2$  с  $x = 0.15$  и  $x = 0.5$ . Слой Nb получен магнетронным распылением. Квадратные переходы размерами  $L^2$  от  $10 \times 10$  до  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  были изготовлены методами фотолитографии и ионного травления [3].

Зависимости критического тока гетероструктуры от магнитного поля имели спадающий с увеличением H характер со слабыми осцилляциями. На рис. 2 показаны зависимости  $I_C(H)$  для перехода с прослойкой AF толщиной  $t = 20 \text{ nm}$  и, для сравнения, перехода  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Отметим, что ширины главных пиков  $I_C(H)$  примерно равны,

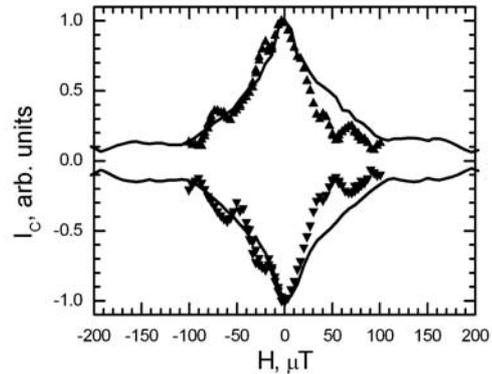


Рис. 2.  $I_C(H)$  для  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2/\text{YBCO}$ , с размером  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  – треугольники.  $I_C(H)$  для  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{YBCO}$  с размером  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  - линии.

Поле H перпендикулярно плоскости подложки.

хотя линейные размеры переходов, L различаются в 5 раз. Известно, что период осцилляций по полю обратно пропорционален L [4]. Для обоих переходов зависимости  $I_C(H)$  имеют форму, характерную для распределенного перехода, при этом переход с AF прослойкой имеет  $I_C = 335 \mu\text{A}$ ,  $L/\lambda_J = 0.6$ ; переход без прослойки -  $I_C = 166 \mu\text{A}$ ,  $L/\lambda_J = 0.4$ . Джозефсоновская глубина проникновения  $\lambda_J$  рассчитывалась следующим образом :

$$\lambda_J = \left( \frac{h}{4\pi \cdot e \mu_0 d j_C} \right)^{1/2},$$

где  $d = \lambda_{L1} + \lambda_{L2} + t$ ,  $\lambda_{L1} = 150 \text{ nm}$  для YBCO,  $\lambda_{L2} = 70 \text{ nm}$  для Nb.

Если поле H параллельно плоскости подложки, то ширина пиков переходов с AF прослойкой тоже значительно меньше, чем в ее отсутствии (Рис. 3).

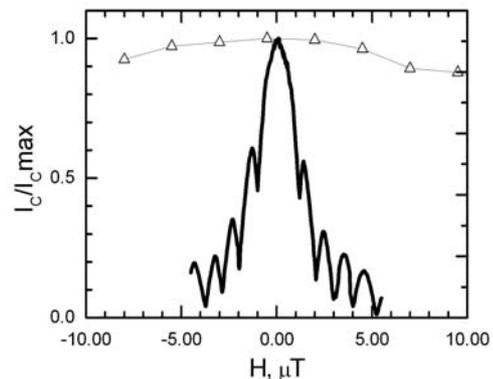


Рис. 3. Магнитополевая зависимость для перехода размером  $L=50 \mu\text{m}$ , с барьером  $t=50 \text{ nm}$  – толстая линия.  $I_C(H)$  для перехода без AF барьера, того же размера, показана треугольниками. Поле  $H$  параллельно плоскости подложки.

Из рис. 3 следует, что ширина пиков  $I_C(H)$  в поле, которое параллельно подложке, для перехода с AF слоем  $1 \mu\text{T}$ , что в 2,5 раза меньше, чем при измерении ширины пиков в перпендикулярном поле.

На Рис. 3 показана зависимость  $I_C(H)$  для сосредоточенного перехода с AF прослойкой.

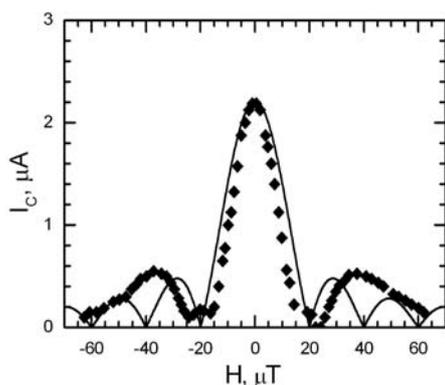


Рис.4.  $I_C(H)$  для  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2/\text{YBCO}$ , с размером  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  и  $t = 50 \text{ nm}$  – ромбы. Сплошная линия – теоретическая фраунгоферова зависимость. Поле  $H$  перпендикулярно плоскости подложки.

Из сравнения данных рисунков 2 и 4 видно, что период  $I_C(H)$  по полю уменьшился с  $50$  до  $20 \mu\text{T}$  с возрастанием толщины слоя  $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$  с  $20$  до  $50 \text{ nm}$ . Форма зависимости  $I_C(H)$  близка к фраунгоферовой при малых полях, так как имеется один пик, который значительно превышает другие по высоте. Однако, ширины боковых пиков примерно равны ширине центрального, то есть при полях, при которых в переход входит более одного кванта потока, экспериментальные зависимости отклоняются от простой теории, представленной в [4].

Степень увеличения чувствительности переходов к магнитному полю за счет слоя антиферромагнетика можно оценить из сравнения зависимостей периодов по магнитному полю от размеров переходов для двух образцов, в одном из которых  $t = 50 \text{ nm}$ , а в другом слой  $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$  – отсутствует.

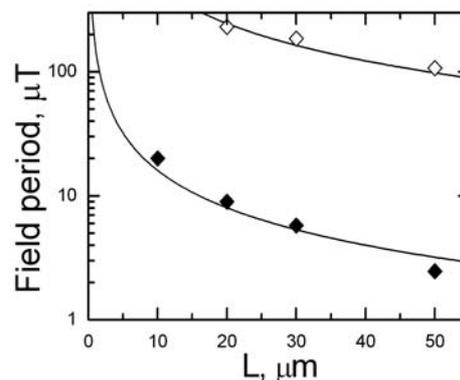


Рис. 5. Ширины пиков  $I_C(H)$  в зависимости от размеров переходов для образца  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{YBCO}$  – открытые ромбы, для образца с барьером  $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$   $50 \text{ nm}$  – заполненные ромбы. Расчетные зависимости вида  $1/L$  – сплошные линии.

Измерения ширины пиков зависимостей  $I_C(H)$  показали, что эти ширины пропорциональны размерам переходов в минус первой степени. За счет наличия барьерного слоя  $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_2$  толщиной  $50 \text{ nm}$  периоды зависимостей  $I_C(H)$  уменьшились примерно в 30 раз. Столь значительное изменение периодов связано со свойствами материала барьера, а не с увеличением толщины слоя  $d$ , в который проникает магнитный поток.

При исследовании гетероструктур  $\text{Nb}/\text{Au}/\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  с прослойкой антиферромагнетика  $20 \div 50 \text{ nm}$  было установлено, что произведение нормального сопротивления  $R_N$  на критический ток  $I_C$  составляло  $150 \div 200 \mu\text{V}$ . Это произведение оказалось примерно вдвое выше, для переходов Джозефсона, которые были сделаны по аналогичной технологии, но без слоя антиферромагнетика.

Работа частично поддержана программами ОФН РАН, Миннауки, РФФИ, программой FP6 Европейского союза, программой Европейского научного фонда AQDJJ и ТНЮХ, шведской программой KVA.

- [1] Bozovic I., Logvenov G., Verhoeven M.A.J., Caputo P., Goldobin E., Geballe T.H., Nature, **422**, 873 (2003).
- [2] Gorkov L.P., Kresin V.Z., Physica C, **367**, 103, (2002).
- [3] Овсянников Г.А. Борисенко И.В., Комиссинский Ф.В., Кислинский Ю.В., Зайцев А.В., Письма в ЖЭТФ, **84**, 5, 320, (2006).
- [4] А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона. Физика и применения. М. : Мир, (1984).