

**ПРИРОДА СВЧ ОТКЛИКА УВаCuO ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО
ПЕРЕХОДА НА БИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ***А.П.Липатов¹⁾, А.А.Веревкин, И.И.Венгрус*, О.В.Снигирев⁺**Московский педагогический государственный университет им. В.И.Ленина
119435 Москва, Россия*** Институт земного магнетизма и радиоизмерений РАН
142092 г. Троицк, Московская обл., Россия**⁺ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 августа 1996 г.

При воздействии СВЧ излучения на джозефсоновские переходы из УВаCuO на бикристаллической подложке наряду с джозефсоновским откликом обнаружен вклад в отклик, связанный с туннелированием квазичастиц через каналы, образованные локализованными состояниями в области джозефсоновского перехода. Показано, что он связан с увеличением проводимости через эти каналы при воздействии излучения на переход.

PACS: 74.50.+g

В настоящее время наиболее воспроизводимым типом джозефсоновских переходов (ДП) из высокотемпературных сверхпроводников являются переходы на бикристаллических подложках [1 - 3]. Это качество в совокупности с другими характеристиками делает подобные переходы притягательными для изготовления криоэлектронных устройств на основе эффекта Джозефсона, в том числе приемников излучения миллиметровой и субмиллиметровой областей спектра.

Для определения параметров СВЧ детектора на таком ДП необходимо провести исследование характеристик перехода при воздействии на него СВЧ излучения. Как известно [3 - 5], при таких исследованиях может быть получена также важная информация о физической природе самой слабой связи. При воздействии СВЧ излучения на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) ДП на бикристаллической подложке наблюдаются обычные ступеньки Шапиро [2, 3], однако их амплитуда и, соответственно, джозефсоновский отклик быстро затухают при увеличении напряжения смещения V до величин, сравнимых с характеристическим напряжением $V_c = I_c \cdot R_n$ (I_c - критический ток, R_n - нормальное сопротивление).

В большинстве экспериментов с ДП на бикристаллической подложке [1 - 4] исследовалось взаимодействие ДП с СВЧ излучением при $V \ll V_c$. Целью нашей работы было выяснение природы отклика ДП на бикристаллической подложке на СВЧ излучение в более широком диапазоне напряжений смещения, включая область $V > V_c$.

Исследовалось поведение отклика на электромагнитное излучение с частотой $\nu_r = 135$ ГГц джозефсоновского перехода, изготовленного на бикристаллической подложке [6] из стабилизированного иттрием ZrO_2 . Тонкие пленки УВаCuO наносились на подложку с помощью лазерного испарения и имели

¹⁾ e-mail:andy@rpl.mpgu.msk.su

стехиометрию, близкую к (123). Исследованные переходы имели ширину 2 мкм и толщину 100 нм. При проведении эксперимента образец находился непосредственно в жидком гелии при $T = 4.2$ К. Далее приведены данные для ДП с максимальным значением нормального сопротивления $R_n = 28$ Ом и $I_c = 22$ мкА ($V_c \approx 0.62$ мВ).

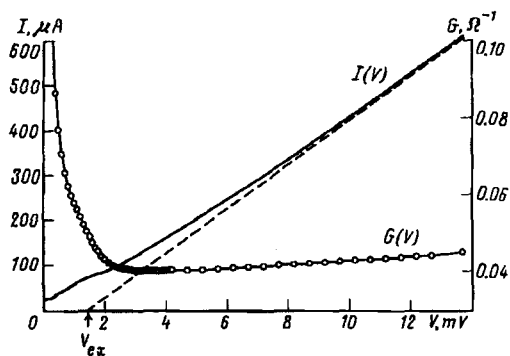


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика $I(V)$ и зависимость проводимости $G(V)$ для исследованного образца в отсутствие падающего излучения. V_{ex} - избыточное напряжение

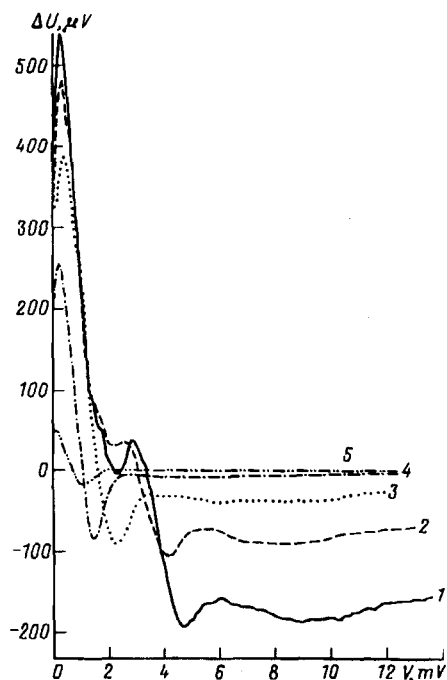


Рис. 2. Отклик ДП при различных значениях СВЧ мощности. Кривые 1-5 соответствуют ослаблению излучения на 0; 2; 7; 14; 25 дБ по отношению к исходной мощности 1 мкВт, измеренной на входном фланце макета

На рис. 1 показаны ВАХ ДП и зависимость его проводимости $G = I / V$ от напряжения в отсутствие излучения. Характерной особенностью ВАХ данного образца является отсутствие избыточного тока и наличие избыточного напряжения V_{ex} , что характерно для структур, в которых перенос тока осуществляется с участием туннельного механизма проводимости. Видно, что кривая $G(V)$ имеет выраженный минимум при напряжении $V \sim 3$ мВ. В области $V \leq 3$ мВ превалирует компонента, связанная с наличием джозефсоновской проводимости. При более высоких напряжениях начинается увеличение $G(V)$, которое было объяснено в рамках модели Глазмана - Матвеева [7], разработанной для структур, в которых перенос нормального тока обусловлен прыжковым механизмом проводимости - процессами неупругого резонансного туннелирования через конечное число локализованных состояний (ЛС). К таким структурам относятся ДП на бикристаллических подложках [8]. Согласно [7], проводимость

в этом случае может быть определена как

$$G = \langle G_1 \rangle + \langle G_2(T, 0) \rangle + \langle G_2(0, V) \rangle, \quad (1)$$

где $\langle G_1 \rangle$ – усредненная проводимость однопримесного канала, а $\langle G_2(T, 0) \rangle$ и $\langle G_2(0, V) \rangle$ – средние значения зависящих соответственно от T и V компонент проводимости двухпримесного канала токопереноса. Как показано в [7], $\langle G_2(T, 0) \rangle \sim T^{4/3}$ и $\langle G_2(0, V) \rangle \sim V^{4/3}$, что для исследованных нами структур подтверждается данными работ [8, 9].

На рис.2 приведены зависимости отклика ДП при различных значениях СВЧ мощности (кривые 1 – 5). Первые максимумы отклика на всех кривых наблюдаются при напряжении смещения $V_r \sim 0.3$ мВ, связанном с частотой СВЧ излучения джозефсоновским соотношением $V_r = h\nu_r/2e$. Затем следует плавный спад, и при $V > 1$ мВ наблюдается минимум отклика (при этом его величина $\Delta U < 0$), после чего его амплитуда немонотонно уменьшается, проходя через еще один широкий минимум при $V \geq 5$ мВ. С ростом мощности излучения амплитуда последнего возрастает. Следует отметить, что такое поведение отклика нетипично для ДП. Согласно резистивной модели [5], после прохождения отрицательного максимума отклика при $V \geq V_r$ его величина ΔU монотонно спадает и определяется только нелинейностью ВАХ [10]:

$$\Delta U = \frac{1}{2R_d} \frac{d^2V}{dI^2} P, \quad (2)$$

где R_d – дифференциальное сопротивление в рабочей точке, P – падающая на образец мощность, а d^2V/dI^2 – крутизна (вторая производная) ВАХ.

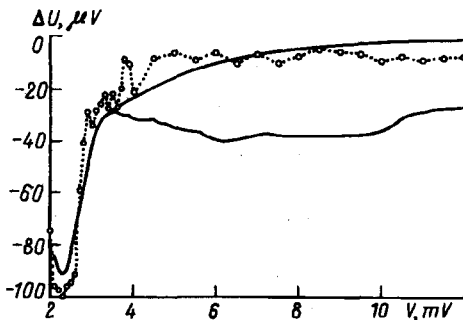


Рис. 3. Отклик ДП при $V > V_c$: а – расчет по резистивной модели для идеальной ВАХ с учетом флуктуаций [7], б – расчет по резистивной модели для экспериментальной ВАХ (формула (2)), с – экспериментальная кривая 3 (рис. 2)

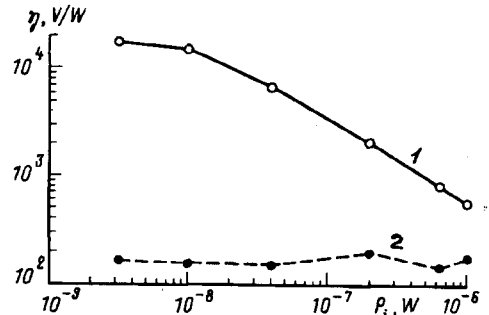


Рис. 4. Зависимость вольт-ваттной чувствительности η двух компонент отклика от падающей мощности P_i на входном фланце макета. Кривая 1 – селективный джозефсоновский отклик, кривая 2 – отклик, связанный с неупругим резонансным туннелированием

На рис.3 крупным планом показано различие между откликами одиночного джозефсоновского перехода и наблюдавшегося в нашем эксперименте в области $V > 2$ мВ (при этом $\Delta U < 0$). Кривая а представляет собой результаты расчета отклика $\Delta U(V)$, проведенного в [7] в рамках резистивной модели ДП при идеальной ВАХ и флуктуационных параметрах, соответствующих исследованному нами образцу. По экспериментальной ВАХ, снятой под воздействием

СВЧ излучения, были определены $R_d(V)$ и крутизна ВАХ и затем по формуле (2) рассчитан отклик ΔU (кривая *b*). Экспериментальные данные представлены кривой *c*. Результаты, представленные зависимостями *a* и *b*, в целом совпадают – при возрастании напряжения смещения амплитуда джозефсоновского отклика монотонно уменьшается. В то же время амплитуда экспериментально измеренного отклика (кривая *c*) несколько увеличивается, начиная с $V \geq 3.5$ мВ. Это указывает на то, что при напряжениях смещения $V \geq 3 \div 5$ мВ доминирует компонента СВЧ отклика, имеющая неджозефсоновскую природу, для которой соответствующее $\Delta U < 0$. При использовании в экспериментах частот модуляции 1 кГц и 100 кГц величина этой компоненты отклика не менялась. Это позволяет сделать вывод, что указанная компонента не связана с нагревом решетки.

На рис.4 показаны зависимости вольт-ваттной чувствительности η от мощности падающего излучения. Для селективного джозефсоновского отклика [10] экспериментальные точки хорошо ложатся на зависимость стандартного вида [5, 11] (кривая 1), связанного с выходом ДП в режим насыщения при величине падающей мощности $P_i \sim 2 \cdot 10^{-8}$ Вт. Величина η_2 , связанная с неджозефсоновской компонентой отклика, измеренная при напряжении смещения 7 мВ, практически не зависит от мощности (кривая 2) и меньше, чем η_1 , в $\sim 10^2$ раз. Таким образом, для данной компоненты отклика ее величина ΔU прямо пропорциональна падающей на образец мощности.

Следует отметить, что значения P_i измерялись на фланце волноводного тракта, к которому присоединена детекторная камера. Оценка величины вольт-ваттной чувствительности, приведенной к переходу, с учетом потерь на рассогласование с детекторной камерой составляет в режиме джозефсоновского детектирования $\eta_1 \sim 10^5$ В/Вт. Это значение находится в хорошем согласии с реально достигаемыми значениями для единичного ДП на основе YBaCuO [12]. Для неджозефсоновской компоненты отклика соответствующие оценки приводят к величине $\eta_2 \leq 10^3$ В/Вт.

Главной отличительной особенностью наблюдавшегося отклика неджозефсоновской природы является то, что он противоположен по знаку первому максимуму джозефсоновского отклика, наблюдаемому при $V < V_c$. Это прямо указывает, что он обусловлен увеличением тока через переход (при фиксированном напряжении) вследствие увеличения проводимости при воздействии излучения.

Как известно, наряду с откликом джозефсоновской природы в структурах на основе YBaCuO наблюдается отклик электронно-разогретой природы, однако в этом случае падающее излучение приводит к увеличению сопротивления проводящей области, находящейся в резистивном состоянии [13], что также соответствует положительному по знаку отклику ($\Delta U > 0$). В сверхпроводниках возможно также наблюдение неравновесного отклика, связанного с явлением кинетической индуктивности [14], но его величина при низких частотах модуляции очень мала и растет прямо пропорционально частоте модуляции, что не наблюдалось в нашем эксперименте. Таким образом, в рамках эффектов [13, 14] невозможно объяснить поведение неджозефсоновской компоненты отклика, наблюдаемой при больших напряжениях смещения.

Учет влияния прыжкового механизма проводимости позволяет качественно объяснить особенности второго типа отклика ДП на бикристаллической подложке. Естественно предположить, что под действием падающего излучения

происходит увеличение энергии квазичастиц в области барьера, что приводит к увеличению вероятности их неупругого резонансного туннелирования через каналы, образованные локализованными состояниями. Результатом такого процесса является увеличение компоненты проводимости $\langle G_2(T, 0) \rangle$ при $V \gg kT/e$ (отметим, что в рамках модели [7] увеличение температуры эквивалентно увеличению напряжения на барьере).

Схожий механизм квазичастичной проводимости ("photon assisting tunneling") наблюдается в структурах типа SIS и сопровождается появлением на ВАХ перехода "фотонных ступенек" [15]. Их отсутствие на ВАХ ДП может быть объяснено тем, что энергии фотонов 2-миллиметрового диапазона волн (0.6 мЭВ) недостаточно для классического переброса квазичастицы через потенциальный барьер ЛС, но достаточно для увеличения ее энергии и, соответственно, вероятности туннелирования.

Таким образом, экспериментально показано наличие в отклике YBaCuO ДП на бикристаллической подложке двух компонент: джозефсоновской, обладающей при малых напряжениях смещения $V \leq V_c$, и неджозефсоновской, обусловленной увеличением прыжковой проводимости под действием СВЧ облучения. Вторая компонента отклика доминирует при напряжениях $V > V_c$.

Работа выполнялась в рамках программы "Университеты России" и поддерживалась Научным советом государственной программы по высокотемпературной сверхпроводимости, проекты 93084 и 93018.

Авторы выражают благодарность Е.М.Гершензону и А.В.Сергееву за полезные замечания, В.А.Ильину и В.А.Куликову за обсуждение результатов, С.И.Красносвободцеву за помощь при изготовлении образцов и Д.Я.Чернову за помощь в обработке экспериментальных данных.

-
1. J.C.Macfarlane, L.Hao, C.M.Pegrum et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **5**, 2212 (1995).
 2. A.Beck, A.Stenzel, O.M.Froehlich et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **5**, 2192 (1995).
 3. T.Saton, M.Yu.Kupriyanov, J.S.Tsai et al., *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **5**, 2612 (1995).
 4. К.И.Константинян, А.Д.Маштаков, Г.А.Овсянников и др., *ЖЭТФ* **107**, 1742 (1995).
 5. К.К.Лихарев, Б.Т.Ульрих, *Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории*, М.: Изд-во МГУ, 1978.
 6. И.И.Венгрус, М.Ю.Куприянов, А.Г.Маресов и др., *СФХТ* **6**, 1730 (1993).
 7. Л.И.Глазман, К.А.Матвеев, *ЖЭТФ* **94**, 332 (1988).
 8. И.И.Венгрус, М.Ю.Куприянов, О.В.Снигирев и др., *Письма в ЖЭТФ* **60**, 372 (1994).
 9. M.Yu.Kupriyanov and J.S.Tsai, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **5**, 2531 (1995).
 10. H.Kanter and F.L.Vernon, *J. Appl. Phys.* **43**, 3174 (1972).
 11. В.А.Куликов, Л.В.Матвеев, В.В.Мигулин, *СВЧ отклик последовательно соединенных джозефсоновских переходов*, Препринт ИЗМИРАН N46(993), 1992.
 12. Л.С.Кузьмин, Е.Е.Солдатов, А.Н.Тавхелидзе и др., *СФХТ* **3**, 2650 (1990).
 13. Э.Е.Аксаев, Е.М.Гершензон, Г.Н. Гольцман и др., *СФХТ* **3**, 1928 (1990).
 14. G.N.Gol'tsman, P.Kouminov, I. Goghidze, and E.M.Gershenson, *Physica C* **235-240**, 1979 (1994).
 15. J.R.Tucker and M.J. Feldman, *Rev. Mod. Phys.* **57**, 1055 (1985).