

05.4;09;12

©1994

СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТОРЦЕВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Л.Э.Аматуни, Р.М.Мартиросян, К.И.Константинян

В работе сообщается об обнаружении и исследованиях собственного излучения от ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) торцевых переходов (ТП) методом прямого широкополосного радиометрического измерения на частотах $f = 25, 45$ и 58 ГГц в интервале температур от критических $T_C \geq 80$ до 4.5 К. Благодаря достаточно высоким значениям характерного напряжения $V_C = 1-2$ мВ при $T = 4.2$ К, сопротивления в нормальном состоянии $R_N = 1-10$ Ом и малой собственной емкости [1], ТП является одним из перспективных для СВЧ применений типом ВТСП джозефсоновских переходов (ДП).

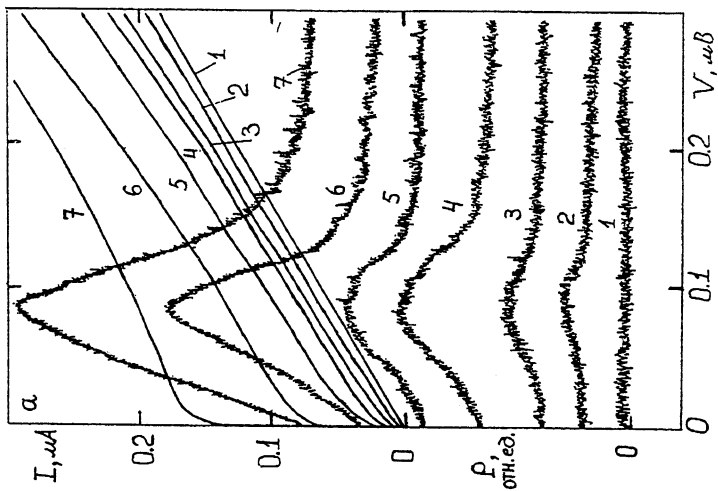
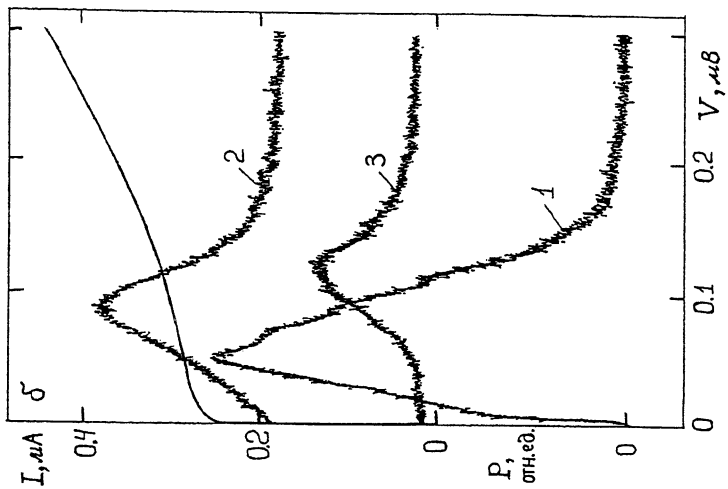
Ранее СВЧ свойства ВТСП ДП в миллиметровом диапазоне изучались лишь косвенными методами по измерению ступеней Шапиро и НЧ детекторного отклика при воздействии на ДП внешнего сигнала [1-4].

ТП изготавливались из эпитаксиальных YBCO пленок толщиной 200 нм на подложках (100) LaAlO_3 с размерами $10 \times 1.5 \times 0.3$ мм, имеющих в центре ступень высотой 300 нм и углом наклона к плоскости $\theta = 80^\circ$. Технология изготовления ТП описана в [1]. Поперечные изломы пленки на ступени образуют два последовательно соединенных слабых контакта. Из-за разных условий осаждения пленки на грани ступени, транспортные характеристики их сильно отличаются [1]. В эксперименте представлял большой интерес вопрос — сколько “работающих” ДП образует ТП с заданными технологическими параметрами. Эту проблему трудно было решить только по измерению сложной ВАХ ТП [1]. На СВЧ при двух работающих ДП с различными критическими токами ($I_{C1} \neq I_{C2}$) на заданной частоте f должно наблюдаться два пика излучения при различных напряжениях (V) смещения. Падения же V на каждом контакте должны быть одинаковыми и удовлетворять соотношению Джозефсона (где Φ_0 — квант потока):

$$V = \Phi_0 f. \quad (1)$$

Исследованы 10 ТП с ширинами $w = 16$ и 32 мкм; T_C их составляли 82–84 К, плотность критических токов $j_C = 10^2 - 10^4$ А/см² при $T = 78 - 4.5$ К. Диапазон частот был выбран не только для изучения поведения СВЧ характеристик ТП при изменении f в широких пределах, но и для уменьшения влияния на измерения термофлуктуаций, сильно проявляющихся в ДП на относительно низких f [5]. Образцы помещались в согласующую секцию уплотненного волновода с подстроечным поршнем, подключаемую через трансформатор к стандартному тракту с сечением 11×5.5 мм и далее — к измерительным радиометрам. Чувствительность радиометров была $\approx 10^{-24}$ Вт/Гц при полосе пропускания 2 ГГц и постоянной интегрирования $\tau = 1$ с. ВАХ ТП измерялись стандартным 4-х зондовым методом. Дифференциальное сопротивление R_d определялось путем детального измерения ВАХ в рабочей точке. Образцы охлаждались в криостате с системой замкнутого цикла. Пермалловый экран применялся для исключения влияния внешних магнитных полей.

Типичные результаты по обнаружению джозефсоновского излучения представлены на Рис. 1, а, показывающем серию ВАХ в диапазоне V до 0.3 мВ при различных T и соответствующие зависимости мощности излучения $P(V)$ на $f_2 = 44.5$ ГГц для образца $B1$ с $w = 32$ мкм. При T , близких к $T_C \approx 82$ К, форма ВАХ с выходом на нормальную кривую по закону Ома при больших V близка к предсказанной по теоретической резистивной модели ДП [5]. В области низких V ВАХ “размыты” термофлуктуациями. Только один пик излучения виден на $P(V)$, увеличивающийся по амплитуде с понижением T . Наивысшая температура регистрации излучения $T = 81$ К очень близка к T_C . Напряжение $V \approx 90$ мкВ, соответствующее максимумам пиков, соответствует f по (1), что свидетельствует о работе лишь одной слабой связи в ТП. Влияние на ТП флуктуаций сказывается и на $P(V)$: вблизи T_C форма пиков соответствует “гауссовскому” распределению [5]. Начиная с $T \approx 67$ К наблюдается значительное изменение формы пика. Данное значение T соответствует началу температурной трансформации ТП из состояния с однородным распределением тока по ширине w ($w \leq \lambda_J(T)$) в распределенное состояние ($w > \lambda_J(T)$), характеризующееся проникновением в ТП джозефсоновских вихрей и их когерентным движением перпендикулярно направлению тока [5,6]. Джозефсоновская глубина проникновения $\lambda_J = (\Phi_0/2\pi\mu_0 dj_C)^{1/2}$ (где μ_0 магнитная проницаемость вакуума, $d \approx 2\lambda_L$ — эффективная толщина ДП ($\lambda_L = 150$ нм для YBCO)), определяет размер одного вихря и при $T = 67$ К



равна 9 мкм. Раннее начало проникновения вихрей в ТП по сравнению с теоретической оценкой $w/\lambda_J = 4$ характерно для реальных ДП с неоднородными границами [6].

Наличие одного пика на $P(V)$ наблюдалось нами на всех f . На Рис. 1, б приведена ВАХ того же ТП и кривые $P(V)$, измеренные на трех частотах при $T = 35$ К. Напряжения $V_1 \simeq 50$ и $V_3 \simeq 120$ мкВ для пиков на f_1 и f_3 также хорошо соответствуют (1). Ширины пиков по шкале V , измеренные на уровне 3 дБ с поправкой на двухполосный режим приема радиометров, определяют ширины линий излучения: $\Delta f_1 \simeq \simeq 42$, $\Delta f_2 \simeq 30$, $\Delta f_3 \simeq 23$ ГГц. Уменьшение Δf с ростом f объясняется "отстройкой" рабочей точки от области ВАХ, наиболее подверженной влиянию флуктуаций. Однако даже наименьшая Δf_3 значительно превышает оценку $\simeq 6$ ГГц по формуле резистивной модели ДП (для измеренных $R_d \simeq \simeq 2.6$ и $R_N \simeq 1.7$ Ом), которая в экспериментальном случае преобладания термофлуктуаций ($k_\sigma T \gg eV$) имеет вид [6]:

$$\Delta f = \pi \Phi_0^{-2} (4k_\sigma T R_N) (R_d/R_N)^2 [1 + (I_C/2I)^2]. \quad (2)$$

Джозефсоновское излучение было зарегистрировано во всем широком интервале T для всех образцов. На рис. 2 представлены ВАХ и мощность излучения $P(I)$ на 44.5 ГГц при $T = 4.5$ К для образца ВЗ с $w = 32$ мкм. Лишь одиночные пики $P(I)$, соответствующие двум ветвям ВАХ, наблюдались в большом диапазоне $I = \pm 3$ Ома. На ВАХ видны особенности, проявляющиеся при низких T : гистерезис в области низких V , асимметрия ветвей относительно начала координат ($I = 0$) из-за захваченного потока в пленке ТП, значительный избыточный ток $I_{ex} > 2I_C$ при больших $V > 15$ мВ, где ВАХ определяется законом Ома $V = R_N(I - I_{ex})$, — которые не описываются резистивной моделью и характерны распределенным ДП с большим значением отношения $w/\lambda_J(T)$ [5] (равном 24 в данном случае).

На вставке в правой части рис. 2 для данного ТП приведены экспериментальные значения Δf на $f_1 = 24.7$ ГГц как функции от температурно зависимой величины R_d^2 . При малых $R_d \leq 2$ Ом (высокие температуры) зависимость $\Delta f(R_d^2)$ — линейная, в согласии с теорией (2) (для данно

Рис. 1. а — ВАХ и мощность излучения $P(V)$ на частоте 44.5 ГГц для образца В1 с шириной $w = 32$ мкм для различных значений температуры: 1 — 84, 2 — 81, 3 — 78, 4 — 75, 5 — 72, 6 — 67, 7 — 55 К ("нулевые уровни" $P(V)$ сдвинуты). б — ВАХ и мощности излучения $P(V)$, измеренные на частотах: 1 — 24.7, 2 — 44.5, 3 — 58 ГГц при $T = 35$ К для того же образца.

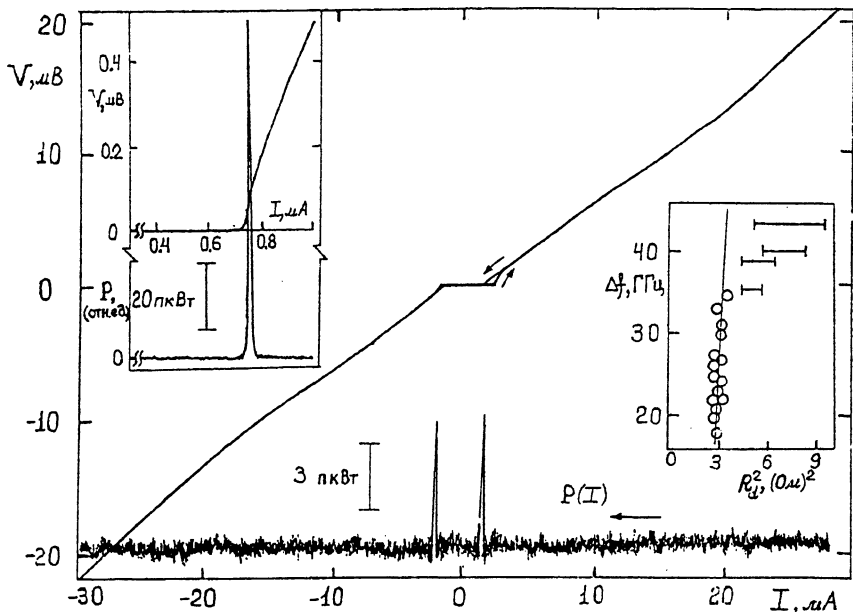


Рис. 2. ВАХ и мощность излучения $P(I)$ на частоте 44.5 ГГц при $T = 4.5$ К для образца ВЗ с $w = 32$ мкм; стрелками показаны направления свипирования тока смещения. На "правой" вставке — экспериментальные значения ширины полосы Δf в зависимости от изменяющейся с температурой величины R_d^2 . На вставке в левой части — ВАХ и $P(I)$ на $f = 44.5$ ГГц для образца В7 с $w = 16$ мкм при $T = 4.5$ К.

го ТП членом в квадратных скобках можно пренебречь). При низких T наблюдалась сильная девиация R_d в рабочей точке относительно Δf , что отмечено на рисунке горизонтальными отрезками. Отметим, что аналогичный линейный ход вблизи T_C , согласно теории [5], имела и соответствующая зависимость мощности излучения от квадрата критического тока $P(I_C^2)$ с плавным выходом на плато после некоторого значения $I_C(T)$. Отличие зависимостей $\Delta f(R_d^2)$ и $P(I_C^2)$ от предсказанных резистивной моделью в области низких T можно объяснить уменьшением $\lambda_J(T)$ до значений, сравнимых с размерами неоднородностей в ТП, образующих случайно расположенные по ширине w центры пиннига [2]. При этом когерентность движения вихрей нарушается, что сказывается на СВЧ характеристиках джозефсоновских ТП. Малая интенсивность излучения для данного ТП объясняется недостаточным его согласованием с трактом (малым R_N). Было выявлено, что мощность генерации P зависит не только от условия согласования, но и от шири-

ны ТП: для образцов с $w = 16$ мкм были измерены большие R . На вставке в левой части рис. 2 приводятся аналогичные характеристики, измеренные при тех же значениях f и T для одного из "узких образцов" с наибольшим значением СВЧ мощности $P = 104$ пкВт. Этот результат почти в 3 раза превосходит соответствующее значение для ВТСП гранулированных мостиков, состоящих из большого числа случайно расположенных слабых связей [7], и является рекордным на сегодняшний день для одиночных ДП.

Проведенные исследования показали, что в большом рабочем диапазоне напряжений и токов смещения ВТСП ЮВСО ТП с заданными параметрами представляют собой одиночные джозефсоновские переходы. На высоких температурах, вблизи азотной, свойства ТП лучше согласуются с выводами резистивной модели ДП. В распределенном состоянии ($w > \lambda_J(T)$) приложение слабого магнитного поля может привести к значительной оптимизации СВЧ характеристик ТП, о чем будет сообщено дополнительно.

Авторы благодарят доктора А.И.Брагински (Институт тонких пленок и ионотехники, Германия) за предоставленные образцы и интерес к работе.

Работа частично была поддержана Американским Физическим Обществом.

Список литературы

- [1] Herrmann K., Zhang Y., Mück H.-M., Schubert J., Zander W., Braginski A.I. // Supercond. Sci. Technol. 1991. V. 4. P. 583-586.
- [2] Siegel M., Herrmann K., Copeti C., Kabius B., Schubert J., Zander W., Braginski A.I. // IEEE Tran. Appl. Supercond. 1993. V. 3. P. 2369-2373.
- [3] Divin Yu.Ya., Mugind J., Pedersen N.F., Chaudhari P. // App. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 1-3.
- [4] Divin Yu.Ya., Andreev A.V., Fischer G.M., Mugind J., Pedersen N.F., Herrmann K., Glyantsev V.N., Siegel M., Braginski A.I. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 1295-1297.
- [5] Лухарева К.К. // Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. С. 320.
- [6] Waldram J.R., Pippard A.B., Clarke J. // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 1970. V. A268. P. 265-287.
- [7] Amatuni L.E., Constantinian K.Y., Hakhumian A.A., Hayrapetian R.B., Ovsyannikov G.A., Laptev V.N., Makhov V.I. // IEEE Trans. Magnetics. 1991. V. 27. P. 2724-2727.

Институт радиофизики
и электроники
Аштарак

Поступило в Редакцию
6 ноября 1993 г.