

СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВТСП ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МОСТИКОВЫХ СТРУКТУР

Л.Э.Аматуни, А.А.Ахумян, Р.Б.Айрапетян,
К.И.Константинян, Р.М.Мартirosян, Г.А.Овсянников¹⁾

В ВТСП мостиковых структурах экспериментально обнаружено узкополосное излучение электромагнитных волн на частоте 21 ГГц с интенсивностью до $P = 3 \cdot 10^{-11}$ Вт, обусловленное когерентным движением квантов магнитного потока (вихрей) через сверхпроводящую гранулированную пленку под действием транспортного тока.

В сверхпроводящих мостиковых структурах (МС) при размере мостика много больше длины когерентности явления, присущие эффекту Джозефсона, например, ступеньки Шапиро на вольтамперной характеристике (ВАХ), возникающие при СВЧ воздействии, вызваны когерентным движением квантовых вихрей под действием транспортного тока¹⁻⁴. Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию динамических процессов в МС¹⁻⁵, данные о непосредственном наблюдении узкополосного излучения, обусловленного когерентным движением вихрей до настоящего времени отсутствуют. Шумоподобное излучение в ВТСП пленках, связанное с движением квантовых вихрей наблюдалось в работе⁶. Существенной особенностью гранулированной ВТСП мостиковой структуры (МС) является появление вихрей с большим электромагнитным радиусом — гипервихрей⁷ и их когерентное движение даже в отсутствие внешнего электромагнитного воздействия^{5, 8}.

В настоящей работе приводятся результаты непосредственного наблюдения узкополосной собственной генерации, возникающей в ВТСП МС при когерентном движении вихрей под действием транспортного тока. Исследовались Y-Ba-Cu-O МС следующих размеров: ширина (направление поперек транспортного тока) $w = 20 - 60$ мкм, длина $l = 40 - 120$ мкм, толщина пленки $d = 1$ мкм. Критические температуры самой МС и берегов, образующих МС были $T_{CM} = 70 - 80$ К и $T_{CB} = 85 - 90$ К, соответственно. Пленки наносились магнетронным напылением на постоянном токе, геометрия МС образывалась методами фотолитографии. Сапфировые подложки с МС в центре устанавливались в волноводной секции, снабженной короткозамыкающим поршнем. Образец экранировался от внешних электромагнитных полей экраном из аморфного пермаллоя, обеспечивающим ослабление поля Земли по крайней мере на порядок. Измерения ВАХ проводились при температурах $T = 4,2 - 100$ К по обычной четырехточечной схеме в режиме задания тока. Одновременно измерялась мощность высокочастотного сигнала, возникающего на МС, с помощью радиометрического приемника с флуктуационной чувствительностью $\Delta T = 0,1$ К при максимальной полосе приема $\Delta F = 300$ МГц, постоянной времени интегрирования $\Delta t = 1$ С на одной из частот в диапазоне перестройки $f = 18 - 22$ ГГц.

Форма автономной ВАХ, показанная на рис. 1, а также температурная зависимость критического тока $I_c(T)$ МС, аналогичная приведенной в⁵, указывает на то, что механизмом нелинейности в исследованных МС является возникновение и движение вихрей под действием транспортного тока при $I > I_c$ ³⁻⁵. Соотношение размеров МС: $l = 120$ мкм, $w = 50$ мкм, размеров гранул в пленке $a = 1$ мкм, лондоновской глубины проникновения для данного материала ВТСП $\Lambda_L = 150$ нм и плотности сверхпроводящего тока $j_c = 2 \cdot 10^3$ А/см², определяющей джозефсоновскую глубину проникновения $\Lambda_j = 5$ мкм, указывает согласно^{5, 7}, что в исследованных МС образуются гипервихри, в которых отсутствует область подавления параметра порядка, как в джозефсоновских вихрях, а глубина проникновения магнит-

¹⁾ Институт радиотехники и электроники АН СССР.

ного поля существенно превышает размер джозефсоновского перехода, образованного между двумя гранулами. Значения постоянного дифференциального сопротивления R_d на участках ВАХ, соответствующих движению отдельной строчки вихрей в МС, увеличиваются с ростом постоянного тока. Нестабильные участки ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением R_d обусловлены, скорее всего, термически активированным крипом тотока^{9, 10}. Изменение формы ВАХ исследованных пленочных ВТСП МС в СВЧ поле (см. рис. 1)

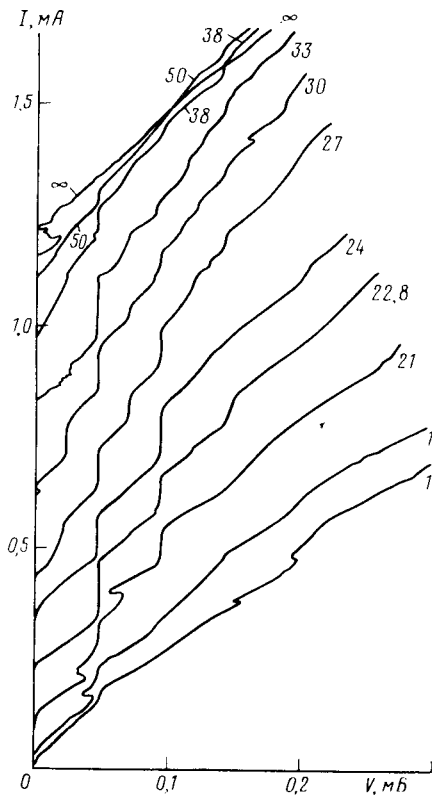


Рис. 1. Семейство ВАХ МС при $T = 4,2$ К для различных уровней мощности P_e СВЧ воздействия частотой $f_e = 23$ ГГц. Цифрами указаны величины ослабления P_e в дБ.

во многом схоже с поведением ВТСП керамических МС⁵, а именно: существенной асимметрией ВАХ, наличием гармонических и субгармонических ступеней тока при величинах напряжений $V_{m, n}$ на МС, связанных с f_e джозефсоновским соотношением:

$$V_{m, n} = (n/m) \hbar f_e / 2e, \quad (1)$$

где n, m — целые числа.

На рис. 2 представлены автономная ВАХ МС и зависимость мощности излучения $P(I)$. Видно, что положение первых трех пиков генерации (одного большого и двух слабовыраженных) связано с частотой генерации соотношением (1) с $m = 1$ и $n = 1, 2, 3$. Это, а также линейный участок на ВАХ с дифференциальным сопротивлением $R_d = R_0 = \text{const}$ в этом диапазоне напряжений ($V = 40 - 120$ мкВ) свидетельствует об одной строчке вихрей в МС. При заданном токе через МС движение вихрей имеет периодический характер и при прохождении одного вихря разность квантомеханических фаз сверхпроводящих берегов МС изменяется на 2π . В результате каждый вихрь наводит переменную составляющую напряжения с частотой

той, определяемой скоростью движения вихрей v ¹¹:

$$f = Nv / b, \tag{2}$$

где b — характерный размер вихревой структуры ($b \sim w$), N — число вихрей в строке.

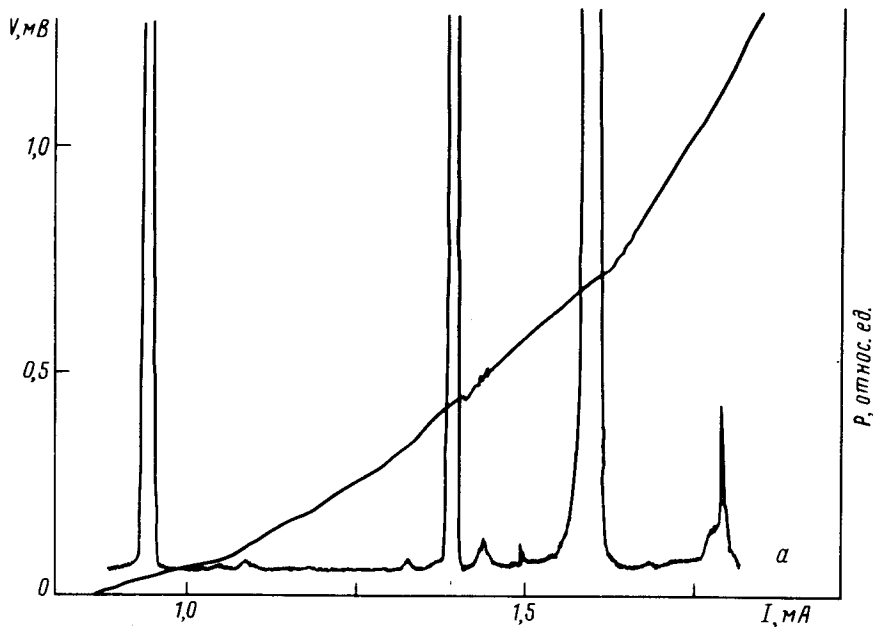


Рис. 2. ВАХ МС и зависимость $P(I)$ на частоте 21,15 ГГц при $T = 4,2$ К, снятые одновременно

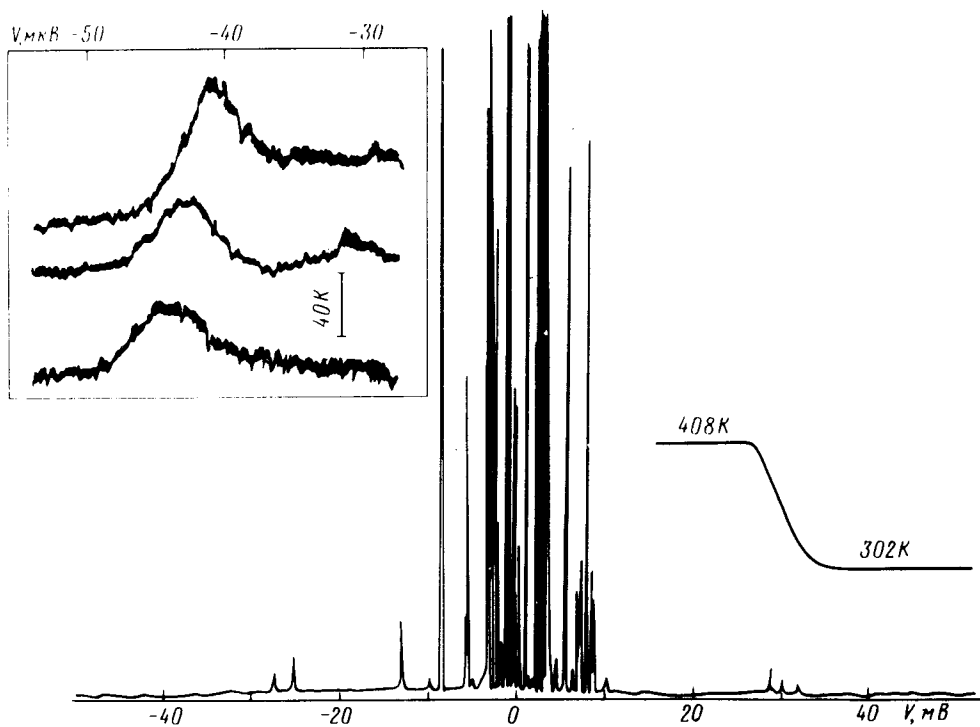


Рис. 3. Зависимость $P(V)$ при $T = 4,2$ К, $f = 21,15$ ГГц, $AF = 300$ МГц, $\Delta t = 1$ с. Справа — калибровочная запись. Цифрами указаны температуры эталонных термостатированных согласованных нагрузок. На вставке изображены $P(V)$ торцевого джозефсоновского перехода Nb-Si-Nb ¹³ на частотах $f = 17,9; 19,3; 21,8$ ГГц

Субгармонические пики в спектре генерации ($n = 2, 3$) связаны с существенным отличием соотношения ток–фаза от синусоидального, характерного для сосредоточенных джозефсоновских переходов^{1, 2}. При больших значениях напряжения на МС спектр излучения $P(V)$ имеет неэквидистантный характер. Новые пики $P(V)$ при увеличении V появляются на участке ВАХ с $R_d = 3R_0$, что соответствует наличию в МС трех строчек вихрей. Два пика на этом участке ВАХ вероятно обусловлены изменением числа вихрей в строчке при $Nv = \text{const}$ (см. (2)). Отметим, что при четном числе строчек вихрей ($R_d = 2pR_0, p = 1, 2 \dots$) генерация не наблюдается, что вероятно связано с антифазным характером генераций в соседних строчках. Это тоже подтверждается слабой зависимостью мощности излучения от V на МС, что следует из анализа зависимости $P(V)$ в большом масштабе по напряжению, представленного на рис. 3. Из рис. 3 также видно, что генерация наблюдается в МС вплоть до напряжений смещения $V = 8$ мВ, что соответствует заполнению всей площади МС вихрями.

Максимальное значение мощности излучения МС, оцененное с учетом рассогласования импеданса МС с СВЧ трактом, а также потерями в СВЧ тракте равно $P_m = 3 \cdot 10^{-11}$ Вт. Это существенно больше, чем наблюдалось в эксперименте для джозефсоновских мостиковых переходов¹², и значения P_m , полученного в нашей измерительной системе при замене МС на торцевой джозефсоновский переход¹³ (см. вставку к рис. 3).

Авторы благодарны Волкову А.Ф. за полезные обсуждения и Гудкову А.Л., Лаптеву В.Н., Махову В.И. за предоставленные образцы.

Литература

1. Лихарев К.К. ЖЭТФ, 1971, **61**, 1700; УФН, 1979, **127**, 185.
2. Асламазов Г.Л., Ларкин А.И. ЖЭТФ, 1975, **68**, 766.
3. Губанков В.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1973, **18**, 292.
4. Kuriki S., Goto K. J. Appl. Phys., 1981, **52**, 5257.
5. Амагуни Л.Э. и др. Письма в ЖЭТФ, 1989, **49**, 559.
6. Копорка J., Lung G. Europhys. Lett., 1989, **8**, 549.
7. Сонин Э.Б. Письма в ЖЭТФ, 1988, **47**, 415.
8. Волков А.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1989, **49**, 86.
9. Dew–Hughes D. Criogenics, 1988, **28**, 674.
10. Larkin A.I. et al. Physica B, 1988, **152**, 266.
11. Fiory A.T. Phys. Rev. Lett., 1971, **27**, 501.
12. Губанков В.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1975, **21**, 489.
13. Гудков А.Л. и др. Письма в ЖТФ, 1985, **11**, 1423.