

## ОБНАРУЖЕНИЕ СВЧ ДЖОЗЕФСОНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МОСТИКАХ

*В.Н.Губанков, В.П.Кошелец, Г.А.Овсянников*

Сообщается о непосредственном наблюдении СВЧ джозефсоновского излучения в тонкопленочных сверхпроводящих мостиках.

1. Среди различных типов слабосвязанных сверхпроводников тонкопленочные мостики выгодно отличаются возможностями корректной оценки электромагнитных параметров и контроля геометрии мостиков слабой связи. Однако до сих пор джозефсоновские свойства мостиков

исследовались по косвенным признакам (влияние магнитного поля на критический ток, поведение мостиков в СВЧ поле и т. д.). В данной работе сообщается о непосредственном наблюдении джозефсоновского излучения из автономных тонкопленочных мостиков. Это излучение в СВЧ диапазоне наблюдалось, по-видимому, впервые.

Мы исследовали генерацию СВЧ излучения в оловянных мостиках "переменной" толщины, у которых толщина  $d$  пленки мостика намного меньше толщины  $d_0$  пленки "берегов": Как было показано ранее [1,2], в подобной структуре удается добиться большей локализации области слабой связи по сравнению с "плоскими" мостиками Дайема [3] и реализовать когерентные эффекты под действием транспортного тока  $I$ .

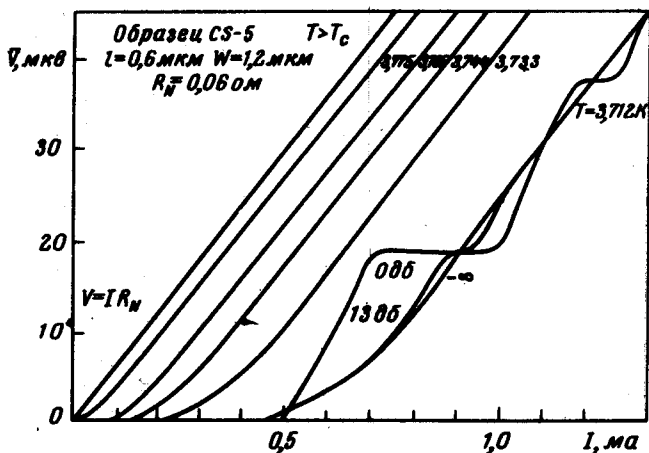


Рис. 1. Семейство ВАХ при изменении температуры. Для  $T = 3,712 \text{ K}$  приведены ВАХ при различных уровнях падающей СВЧ мощности. Частота воздействующего сигнала равна  $f_{\text{рез}} (9,510 \text{ ГГц})$

2. Исследуемые мостики имели прямоугольную форму с размерами: длина  $l = 0,5 + 1 \text{ мкм}$ , ширина  $w = 1 + 3 \text{ мкм}$ , толщина пленки мостика  $d \approx 300 \text{ \AA}$ . Последовательность операций при изготовлении была следующей. Сначала вдоль подложки из оптически полированного кристаллического кварца устанавливалась нить, диаметр которой определял будущую ширину  $w$  и напылялся слой монооксида кремния ( $\text{SiO}$ ) толщиной  $\sim 300 \text{ \AA}$ . После удаления нити и получения канала в  $\text{SiO}$  напылялась толстая пленка олова  $d_0 \approx 5 \cdot 10^3 \text{ \AA}$  ( $p \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ тор}$ , скорость напыления  $\sim 100 \text{ \AA/сек}$ ). Далее пленка олова разрезалась лезвием бритвы в направлении перпендикулярном каналу, и тем самым удалялась по всей ширине подложки, исключая пленку в канале; ширина реза определяла величину  $l$ . Эта методика позволяла получать мостики с воспроизводимыми параметрами ( $R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}} = 20 \pm 5$ ) и обладала преимуществами по сравнению с описанной в [4] методикой "двойного царапания": поперечное сечение мостика представляло собой прямоугольник, а  $d$  можно было выбирать, изменяя толщину слоя  $\text{SiO}$ . В работе приведены результаты для одного из мостиков.

Для проведения СВЧ экспериментов образец включался в центральную жилу двухполуволнового коаксиального 3-см резонатора и располагался в середине. Для лучшего СВЧ контакта переход от массивной центральной жилы к пленке мостика был сделан на расстоянии  $\lambda/4$  от торцов. Регулируемая связь резонатора с волноводом осуществлялась штырем связи и поршнем, расположенным в конце волновода. Пересчитанные к мостику сопротивления потерь в резонаторе ( $R_0 = 0,3 + 0,1 \text{ ом}$ ) и связи с СВЧ трактом ( $R_{\text{СВ}} = 0,1 \div 1 \text{ ом}$ ) определялись из измерения коэффициента отражений от резонатора слабого ( $\leq 10^{-9}$  Вт) сигнала. Добротность резонатора была  $\sim 200$ . Для наблюдения генерации использовался приемник П5-10, настроенный на резонансную частоту резонатора,  $f_{\text{рез}} = 9,510 \text{ Гц}$ .

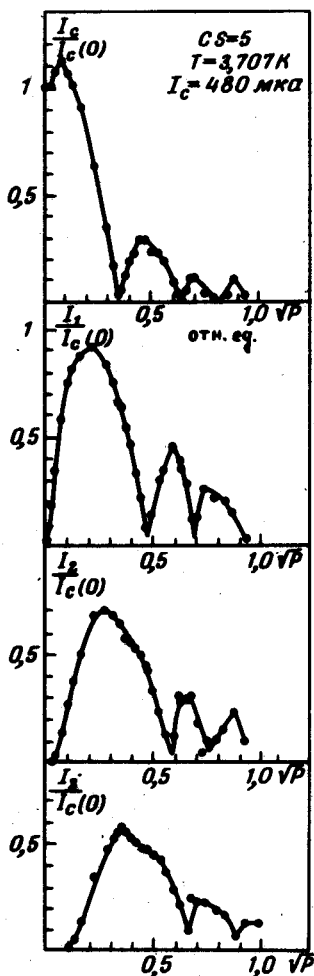


Рис. 2. Зависимости  $I_0, I_{1,2,3}$  от уровня падающей СВЧ мощности ( $P_{\text{СВЧ}}$ )

3. При температурах, близких к  $T_c$ , характерная глубина проникновения нормального к плоскости пленки магнитного поля и длина когерентности были больше  $w, l$ . Выполнение этих условий дает основание сравнивать экспериментальные результаты с "резистивной" моделью [5], в которой ток в области слабой связи считается равным сумме то-

ков сверхпроводящих  $\left( I_0 \sin \left[ \frac{2e}{h} \int V dt \right] \right)$  и нормальных  $(V/R_N)$  электронов. Правомерность этого сравнения подтверждается прежде всего отсутствием периодических изменений дифференциального сопротивления с ростом  $I$  (рис. 1), возникающих у мостиков "переменной" толщины больших размеров [2] и связанных с движением вихрей в области слабой связи. Температурная зависимость критического тока  $I_0$  мостиков в диапазоне  $\Delta T = T_c - T = 0,05 - 0,2\text{K}$  была линейной, в соответствии с [5].

При воздействии внешнего сигнала с  $f = f_{\text{рез}}$  на ВАХ появлялись джозефсоновские ступеньки тока. Осцилляционные зависимости<sup>1)</sup>  $I_0$  и ступенек тока от  $P_{\text{СВЧ}}$  (рис. 2), изменения формы и периодов осцилляций  $I_{0,1,2,3,\dots}$  с ростом  $I_0$  при понижении  $T$  качественно согласуются с рассчитанными из "резистивной" модели. Обработка по [6] зависимостей  $I_{0,1}(P_{\text{СВЧ}}, T)$  и сравнение результатов с  $I_0(T)$  свидетельствует о том, что при  $\Delta T = 0 + 0,1\text{K}$  "резистивную" модель можно использовать и для количественного описания джозефсоновских СВЧ свойств мостиков, во всяком случае при не слишком больших значениях усредненного по времени напряжения  $\bar{V}$  и  $I - I_0$ . Корректность такого описания подтверждается симметрией первых ступенек тока относительно ВАХ автономного мостика при слабом внешнем сигнале (рис. 1).

Следует отметить, что, одновременно с джозефсоновскими свойствами, в ряде случаев в мостиках наблюдался эффект стимулированной СВЧ полем сверхпроводимости, который проявлялся в небольшом подрастании  $I_0$  под действием слабого сигнала. Этот эффект наблюдался по крайней мере в диапазоне  $\Delta T = 0 + 0,2\text{K}$ ; детальное его изучение нами не проводилось.

4. Спектры генерации автономного мостика в зависимости от  $\bar{V}$  представлены на рис. 3. Видно, что максимумы спектральной плотности излучения  $P_{\text{Макс}}$  наблюдаются при  $\bar{V}$ , связанных с  $f_{\text{рез}}$  джозефсоновским соотношением:  $\bar{V} = \frac{h}{n 2e} f_{\text{рез}}$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — гармоники излучения. При данном уровне флуктуаций (амплитуда флуктуационного тока  $I_f \ll 10 \mu\text{ка}$ ) малая по сравнению с  $(R_0 + R_{\text{СВ}})$  величина  $R_N$  исключала заметное влияние возможных аномальных особенностей СВЧ импеданса мостика [7] на характер зависимости  $P(\bar{V})$ . По мере понижения температуры интегральная мощность излучения  $P_{\text{Макс}} \Delta \bar{V}$  ( $\Delta \bar{V}$  — ширина полосы излучения по уровню  $P_{\text{Макс}}/2$ ) возрастает в соответствии с расчетом [5,6]. При  $\Delta T = 0,05 + 0,15\text{K}$  имеется количественное совпадение теоретических и

<sup>1)</sup> Аналогичные зависимости  $I_{0,1,2,3}$  от  $P_{\text{СВЧ}}$  были получены для мостиков с размерами  $l \approx 1 \mu\text{мм}$ ,  $w \approx 3 \mu\text{мм}$ , изготовленных по технологии, описанной в работе [2].

экспериментальных зависимостей  $P_{\max} \Delta \bar{V}$  от  $T$  для первой гармоники излучения (см. вставку рис. 3). Дальнейшее увеличение  $\Delta T$  приводит к появлению теплового скачка напряжения на ВАХ автономного мостика в области  $\bar{V} \approx 20$  мкВ. Это в свою очередь вызывает резкое падение интегральной мощности первой гармоники, регистрируемой приемником. Попытки уменьшения  $\Delta \bar{V}$  с помощью подключения низкоомного шунта ( $R_{\text{ш}} \approx 0,01$  Ом) не дали желаемых результатов, вероятно из-за возникновения низкочастотных, релаксационных колебаний, описанных в работе [8].

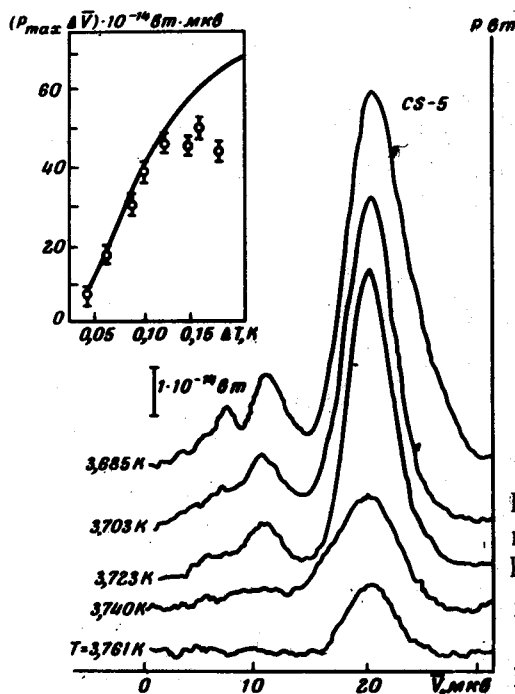


Рис. 3. Семейство спектров генерации мостика при изменении температуры. На вставке показаны зависимости  $P_{\max} \Delta \bar{V}$  первой гармоники излучения от  $T$  (сплошная линия — теория [5, 6], точки — эксперимент)

Таким образом, проведенные эксперименты являются прямым доказательством существования джозефсоновского излучения в сверхпроводящих тонкопленочных мостиках, причем используемая геометрия слабой связи приводит к усилению наблюдаемых когерентных эффектов.

Авторы благодарны В.В. Мигулину, А.Н. Выставкину, К.К. Лихареву и Л.С. Кузьмину за обсуждение результатов работы и полезные замечания.

Поступила в редакцию  
28 февраля 1975 г.  
После переработки  
10 марта 1975 г.

#### Литература

- [1] К.К. Лихарев. ЖЭТФ, 61, 1700, 1971; К.К. Лихарев, Л.А. Якобсон. ЖТФ, 45, №7, 1975.

- [2] В.Н.Губанков, В.П.Кошелец, К.К.Лихарев, Г.А.Овсянников. Письма в ЖЭТФ, 18, 292, 1973.
- [3] P.Andersen, A.Dayem. Phys. Rev. Lett., 13, 195, 1964; A.Dayem, I.Wiegand. Phys. Rev., 155, 419, 1967.
- [4] P.E.Gregers-Hansen, M.T.Levinsen, L.Pedersen, C.I.Sjøstrøm. Solid State Comm., 9, 661, 1971; T.M.Klapwijk, T.V.Veenstra Phys. Lett., A47, 351, 1974.
- [5] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. Письма в ЖЭТФ, 9, 156, 1969.
- [6] A.N.Vystavkin, V.N.Gubankov, L.S.Kyzmin, K.K.Likharev, V.V.Migulin, V.K.Semenov. Rev. Phys. Appl., 9, 79, 1974.
- [7] А.Н.Выставкин, В.Н.Губанков, Л.С.Кузьмин, К.К.Лихарев. В.В.Мигулин, А.М.Спицин. Письма в ЖЭТФ, 17, 284, 1973; В.Н.Губанков, В.В.Крылов, Л.С.Кузьмин, К.К.Лихарев, В.К.Семенов. Тезисы докладов НТ-18, стр. 162, г. Киев, 1974.
- [8] И.Х.Албегова, Б.И.Бородай, И.К.Янсон, И.М.Дмитренко, ЖТФ, 39, 911, 1969.
-