

## ЗАВИСИМОСТЬ СТИМУЛИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПЛЕНОЧНЫХ МОСТИКАХ ОТ ИХ ДЛИНЫ

Ю. И. Латышев, Ф. Я. Надь

Экспериментально установлено, что с уменьшением длины мостика меньше некоторой  $\sim (D/\omega)^{1/2}$  происходит изменение механизма стимулирования в нем сверхпроводимости СВЧ излучением.

В последнее время большое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям неравновесных явлений в однородных и неоднородных сверхпроводниках и в частности одному из самых интересных эффектов — стимулированию сверхпроводимости СВЧ излучением (см., например, обзор [1]).

Фундаментальной причиной стимулирования критического тока в сверхпроводящих мостиках под действием излучения является возникающая при этом неравновесность функции распределения квазичастиц. В длинных однородных мостиках неравновесность возникает в результате непосредственного влияния электромагнитного поля на квазичастицы [2, 3], а в коротких, т. е. неоднородных мостиках (с характерным размером  $\sim \xi$ ), в результате осцилляций щели в перешейке мостика [4]. Следствием этого и являются различия в характере стимулирования в длинных и коротких мостиках. Стимулирование в длинных ( $L > \xi$ ) мостиках и его механизм достаточно хорошо экспериментально изучены [1, 5], для коротких получены качественные предварительные результаты [1, 6]. Как следует из теории [4] характер стимулирования существенно зависит от длины и от геометрии мостика. В связи с этим значительный интерес представляло исследование изменения характера стимулирования  $I_c$  с изменением длины мостика и выяснение относительного вклада упомянутых выше механизмов, а также "сопутствующих" им явлений — джозефсоновских и тепловых эффектов.

Нами исследованы длинные с  $L \gg \xi$  узкие тонкопленочные оловянные мостики (фактически, одномерный сверхпроводящий канал), двумерные плоские и трехмерные мостики переменной толщины как длинные, так и короткие (см. таблицу). Величины  $L$  и  $w$  в таблице указаны с точностью 0,2 мкм). Толщины перешейков всех мостиков были приблизительно одинаковы  $\sim 1000 \text{ \AA}$ , а толщины берегов трехмерных мостиков  $\sim 1$  мкм. Методы получения описаны ранее [5]. Величина

критического тока и ее зависимость от температуры и от мощности излучения ( $f = 9$  ГГц) определялись по вольтамперным характеристикам (ВАХ), записанным на двухкоординатном самописце. Точность измерения  $I_c$  составляла 1%, а точность поддержания температуры 1мК.

Таблица параметров образцов

№ образца	$L$ , мкм	$w$ , мкм	$R_n$	$T_c$ , К
Т-1	0,6	1,0	0,24	3,80
Т-2	0,7	1,0	0,22	3,75
Т-3	3,3	1,5	0,10	3,75
Д-1	0,6	0,5	0,66	3,78
Д-2	0,7	0,9	0,28	3,77
Д-3	1,0	1,2	0,55	3,83
Д-4	1,7	1,4	0,49	3,82
0-1	1360	0,9	135	3,79

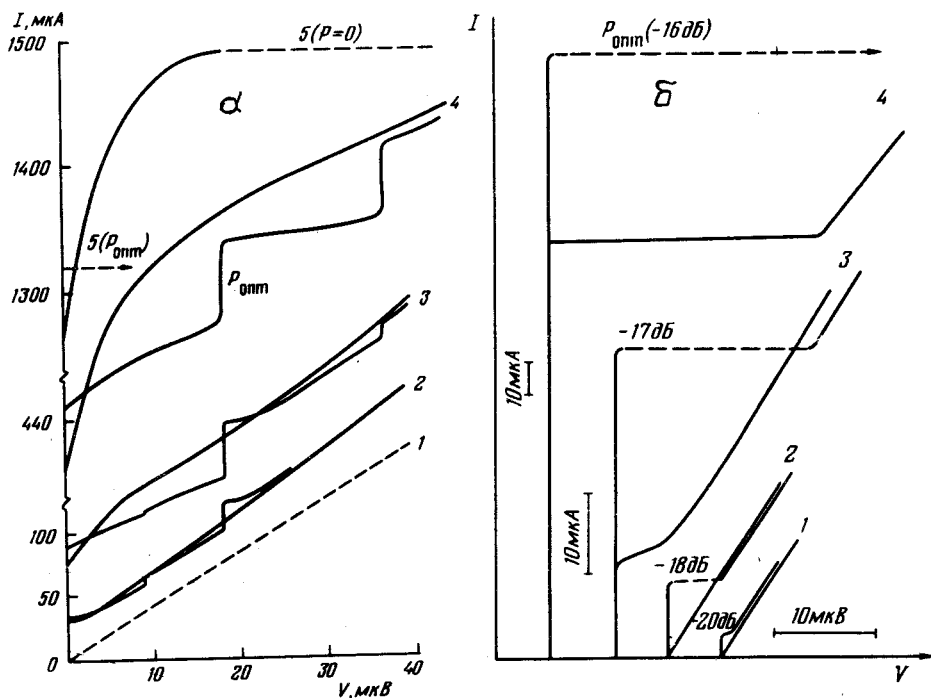


Рис. 1. Видоизменение вольтамперных характеристик сверхпроводящих мостиков в зависимости от температуры  $T$  и мощности  $P$  СВЧ излучения:  $a$  – ВАХ мостика Т-2 при  $T$ , К: 1 – 3,752, 2 – 3,726, 3 – 3,706, 4 – 3,587, 5 – 3,320 каждая при двух значениях  $P$ :  $P = 0$  и  $P = P_{opt}$ , которой соответствует затухание 20 – 30 дБ;  $b$  – ВАХ мостика Д-4 при  $T$ , К: 1 – 3,828, 2 – 3,825, 3 – 3,809, 4 – 3,760, каждая при  $P = 0$  и при  $P = P_{opt}$  (в дБ над соответствующей кривой)

На рис. 1 представлены ВАХ, типичные для коротких мостиков (рис. 1, а) и для длинных (рис. 1, б). ВАХ плоских мостиков и мостиков переменной толщины с близкими по размерам перешейками были качественно подобны, хотя и имелись некоторые количественные различия (см. ниже). Отметим основные особенности стимулирования сверхпроводимости в коротких мостиках. При  $T \lesssim T_c$  ВАХ имеет вид, близкий к гиперболическому, наблюдается нестационарный эффект Джозефсона, стимулирование  $I_c$  отсутствует. При понижении температуры появляется заметное стимулирование  $I_c$  (кривая 2, рис. 1, а), а позднее и характерный изгиб ВАХ необлучаемого мостика (кривая 3), обусловленный неравновесностью функции распределения квазичастиц вследствие джозефсоновских осцилляций щели при протекании постоянного тока  $I > I_c$  [6 – 8]. Дифференциальное сопротивление линейного начального участка ВАХ без облучения с понижением температуры уменьшается, и, наконец, уже при значительном удалении от  $T_c$  (для образца Т-2 более чем на 0,4К) на ВАХ появляются скачки напряжения и гистерезис (кривая 5), обусловленные тепловыми эффектами [9]. Действие излучения во всей этой области температур вызывает увеличение  $I_c$ , однако, как видно из рис. 1, а  $I_c(P)$  никогда не превышает характерную величину тока, соответствующую изгибу ВАХ без излучения  $I_s^0$ .

От мощности излучения  $P$  величина  $\eta = I_c(P)/I_c(0)$  зависит следующим образом. Сначала при малых мощностях  $\eta$  практически постоянно или немного  $\sim$ на 2% понижается. При увеличении  $P$   $\eta$  растет, достигает максимума  $\eta_{max}$  (случай, представленный на рис. 1, а) и далее осцилляторно уменьшается приблизительно пропорционально  $I_c(\sqrt{P})$ , т. е. так же как осциллирует уменьшаясь критический ток джозефсоновского перехода. Изменение амплитуды  $n$ -ой ступеньки при этом близко к соответствующей зависимости  $I_n(\sqrt{P})$ . Иными словами, при некоторой мощности излучения, когда  $I_c$  перестает расти, эффект стимулирования подавляется нестационарным эффектом Джозефсона. Видимо по этой причине  $I_c(P)$  не достигает, как это предсказывает теория [4] своего максимального значения  $I_s^0$ .

Аналогично происходит видоизменение ВАХ коротких плоских мостиков приблизительно с такими же размерами перешейка (например, Д-1), за исключением того, что тепловой гистерезис начинается ближе к  $T_c$  (для Д-1 при  $T_c - T \approx 0,2\text{К}$ ) и джозефсоновские эффекты выражены в них слабее.

Качественно иная картина изменения ВАХ наблюдается в мостиках с  $L \gtrsim 1$  мкм. На рис. 1, б представлен, например, мостик Д-4. Здесь при  $T > T_c$  излучение наводит сверхпроводящий ток (кривые 1, 2), а при  $T \lesssim T_c$  значительно (в 3 – 5 раз) его увеличивает (кривые 3). При дальнейшем понижении температуры  $\eta_{max}$  уменьшается. На ВАХ таких мостиков не наблюдаются характерные изгибы при  $V \approx 0$ , джозефсоновские ступени отсутствуют, переход в резистивное состояние при  $P \neq 0$  является скачкообразным (т. е. фазовым переходом I рода) даже при высоких температурах, когда на ВАХ без облучения еще нет гистерезиса. Аналогичные особенности наблюдаются для очень длинных мостиков типа 0-1 и для длинного мостика переменной толщины Т-3.

Различие в характере стимулирования  $I_c$  в коротких и длинных мостиках особенно хорошо видно из температурных зависимостей  $\eta_{max}$ , представленных на рис. 2. В коротких мостиках с  $L < 1$  мкм стимулирование непосредственно вблизи  $T_c$  отсутствует, появляется на некотором удалении от  $T_c$ , становится максимальным при температурах когда  $L \sim \xi(T)$  и потом снова уменьшается, что согласуется с результатами работы [4]. Так для мостика Т-1 максимум  $\eta_{max}$  наблюдается при  $T_c - T = 0,16$ К, когда  $\xi(T) = 0,5$  мкм, что очень близко к длине мостика  $L = 0,6$  мкм. Для мостика Т-2  $T_c - T = 0,06$ К, соответственно  $\xi(T) = 0,8$  мкм и  $L = 0,7$  мкм. Следует отметить также, что для самого короткого образца Т-1 на нарастающем и спадающем участках зависимость  $\eta_{max}(T_c - T)$  в логарифмическом масштабе близка к линейной с наклоном  $1/5$ , что также неплохо согласуется с теорией [4], согласно которой  $\eta_{max} \sim (T_c - T)^{1/4}$ . Теория [4] дает ограничение на размер контакта  $\xi(T)(1 - T/T_c)^{1/4} \ll L \ll \sqrt{D/\omega}$ , где  $D = 1/3lv_F$ . Для олова при  $v_F = 0,65 \cdot 10^8$  см/сек,  $l = 1000$  Å,  $T_c - T = 0,2$ К,  $f = 9$  ГГц получаем  $0,2$  мкм  $< L < 0,62$  мкм. На эксперименте характер стимулирования меняется при  $L \lesssim 0,8$  мкм, что сравнительно близко к теории.

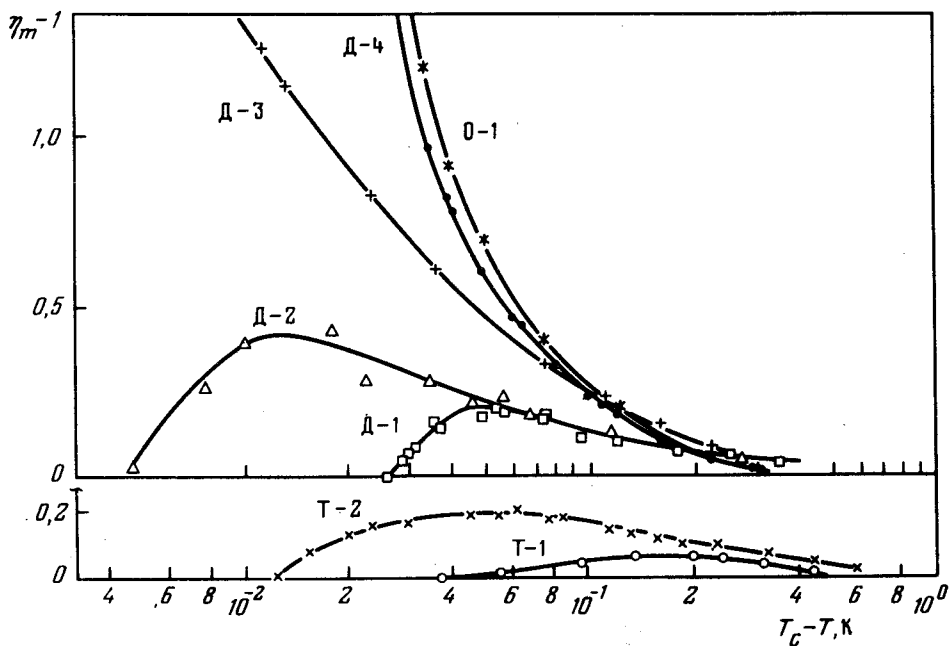


Рис. 2. Температурные зависимости  $\eta_{max}$  для мостиков различной длины (см. таблицу)

Из рис. 2 также хорошо видно, что с увеличением длины мостика граница появления стимулирования сдвигается к  $T_c$ . Причем, кривые  $\eta_{max}(T)$  для мостиков постоянной толщины Д-1, Д-2 лежат ближе к  $T_c$ , чем для мостиков переменной толщины (Т-1, Т-2) одинаковой геометрической длины. Это происходит, по-видимому, потому, что в Д-мостиках область неравновесности состояния распространяется на некоторое расстояние в берега мостика, увеличивая его эффективную длину. Од-

новременно со сдвигом к  $T_c$  происходит рост величины  $\eta_{max}$  (мостик Д-2) и наконец при  $L \gtrsim 1$  мкм характер температурной зависимости стимулирования изменяется — максимальное стимулирование  $I_c$  наблюдается при  $T \approx T_c$  с плавным спаданием при понижении температуры. Причем при дальнейшем увеличении  $L$  для всех узких длинных мостиков зависимость  $\eta_{max}(T)$  с точностью эксперимента близка к зависимости для Д-4 (например, кривая для мостика 0-1 длиной 1,36 мм).

Таким образом, полученные нами данные показывают, что с уменьшением длины мостика происходит переход от механизма стимулирования типа Элиашберга [2, 3] к механизму, рассмотренному Асламазовым Ларкиным [4].

Институт  
радиотехники и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
18 ноября 1978 г.

### Литература

- [1] В.М.Дмитриев, Е.В.Христенко. ФНТ, 4, 821, 1978.
- [2] Г.М. Элиашберг. Письма в ЖЭТФ, 11, 186, 1970.
- [3] В.И.Ивлев, С.Г.Лиситсын, Г.М.Элиашберг. J. Low Temp. Phys., 10, 449, 1973.
- [4] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. ЖЭТФ, 74, 2184, 1978.
- [5] Ю.И.Латышев, Ф.Я.Надь. ЖЭТФ, 71, 2158, 1976.
- [6] В.Н.Губанков, В.П.Кошелец, Г.А.Овсянников. ЖЭТФ, 73, 1435, 1977.
- [7] Л.Г.Асламазов, А.И.Ларкин. ЖЭТФ, 70, 1340, 1976.
- [8] M.Octavio, W.J.Skocpol, M.Tinkham. Phys. Rev., 17B, 159, 1978.
- [9] Ф.Я.Надь, О.Ю.Полянский. Депонированная статья ЦНИИ "Электроника" 1972, №764; Радиотехника и электроника 18, 2445, 1973.