

НАБЛЮДЕНИЕ АНОМАЛЬНОГО СВЧ ИМПЕДАНСА ТОЧЕЧНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОНТАКТОВ

*А. Н. Выстаскин, В. Н. Губанков, Л. С. Кузьмин,
К. К. Лихарев, В. В. Мигулин, А. М. Спицын*

1. Ранее нами [1], а несколько позже другими авторами [2] было показано, что из обычной "резистивной" модели сверхпроводящего S-c-S контакта малых размеров [3] следует существование особенности его СВЧ импеданса Z для частот ω , близких к частоте собственной джозефсоновской генерации ω_v . При этом для $\omega \gg \omega_v$ действительная часть Z может принимать отрицательные значения. В настоящей статье мы сообщаем об экспериментальном наблюдении этого эффекта в точечных сверхпроводящих контактах.

2. Существование аномальной (расходящейся в отсутствие флуктуаций при $\omega = \omega_v$) части импеданса было предсказано [1, 2] для случая, когда через контакт протекают только ток смещения I и гармонический ток сигнала \tilde{I} , т. е. неявно предполагалось, что для всех частот, кроме ω , импеданс внешней электродинамической системы бесконечен. Как показано в [4], для проявления эффекта достаточно, чтобы контакт был включен, например, в резонатор последовательного типа с полосой много меньшей ширины линии генерации.

Мы использовали включение контакта в центральную жилу коаксиального полуволнового резонатора 3-см диапазона с полосой ~ 20 МГц, тогда как ширина линии генерации составляла не менее 100 МГц. Измерялся (с помощью приемника П5-10 с полосой 8 МГц) коэффициент от-

ражения от резонатора, включенного в СВЧ тракт (волновод), слабого ($\lesssim 10^{-9}$ см) СВЧ сигнала: $|\Gamma|^2 = (P_r - P_o)/P_i$. Здесь P_r — мощность, поступающая в приемник, P_i — мощность монохроматического сигнала, вводимого в тракт, $P_o = P_r|_{P_i=0}$ — та часть мощности генерации, которая попадает в полосу приемника¹⁾. Частота сигнала подстраивалась в резонанс системы, в этом случае, как известно,

$$\Gamma = (\text{Re}Z + R_o - R_c) / (\text{Re}Z + R_o + R_c), \quad (1)$$

где R_o и R_c — пересчитанные к контакту сопротивления потерь в резонаторе и связи с трактом.

3. На рис. 1 приведены зависимости $|\Gamma|^2$ и среднего напряжения \bar{V} от тока смещения при различных уровнях P_i для одного из исследованных контактов (Nb — Nb, 4,2°K, нормальное сопротивление $R = (45 \pm 5) \cdot 10^{-3}$ ом). В данном случае величина связи тракта и резонатора была выбрана больше критической: $R_c > R_o$, поэтому увеличение $|\Gamma|^2$ соответствует уменьшению $\text{Re}Z$. Видно, что при $\bar{V} \approx V_\omega$ (т. е. $\omega_v = \omega$) величина $\text{Re}Z$ имеет особенность, вид которой хорошо соответствует теоретически предсказанному при учете конечной ширины линии генерации [1, 4]. Для минимального значения сопротивления контакта (кривая 1) обработка по формуле (1) дает: $(\text{Re}Z)_{\min}/R = -1,7 \pm 0,5$. Погрешность здесь связана в основном с неточностью нахождения величин R_o, R_c ²⁾.

Теория [4] дает $(\text{Re}Z)_{\min}/R = -3 \pm 1$; при этом используются значения параметров резистивной модели $\Omega = 0,6 \pm 0,1$ и $l_f \rho / l_o = 0,034 \pm 0,004$, полученные из экспериментальных зависимостей $\bar{V}(I)$ и $P_o(I)$; $\Omega = \omega \hbar / 2eI_o R$, $l_f \rho$ — эффективный размах шумового тока.

Мы наблюдали аномальный импеданс во всех исследованных контактах, для которых уменьшением внешних наводок смогли добиться необходимого [4] сужения линии генерации (нормальные сопротивления $R \lesssim 0,1$ см). Для низкоомных контактов ($R \approx 10^{-2}$ ом), характеристики которых сильно отличаются от следующих из резистивной модели, эффект также наблюдается, хотя его величина заметно меньше, чем следует из теории. Кроме того, на низкоомных контактах отчетливо проявляются особенности импеданса, подобные основной, при напряжениях $\bar{V} \approx V_\omega/n$ ($n = 2, 3, 4$). Эти дополнительные особенности легко объясняются взаимодействием сигнала с высшими гармониками джоуфсоновской генерации, роль которых возрастает при уменьшении R .

¹⁾ В большинстве наших экспериментов из-за узости полосы приемника наблюдалось соотношение $P_o \ll P_r$.

²⁾ Нахождение R_o, R_c из (1) затруднено тем, что $\text{Re}Z > 0$ даже при $I < I_o$ [5].

При возрастании P_i выше некоторого значения P_s наблюдается насыщение эффекта, т. е. изменение величины $|\Gamma|^2$ (кривая 2, рис. 1). Значение P_s находится в хорошем согласии с проведенными в [1] оценками. В соответствии с теорией, именно при мощностях $\sim P_s$ происходит формирование на вольтамперной характеристике контакта первой ступени тока (рис. 1).

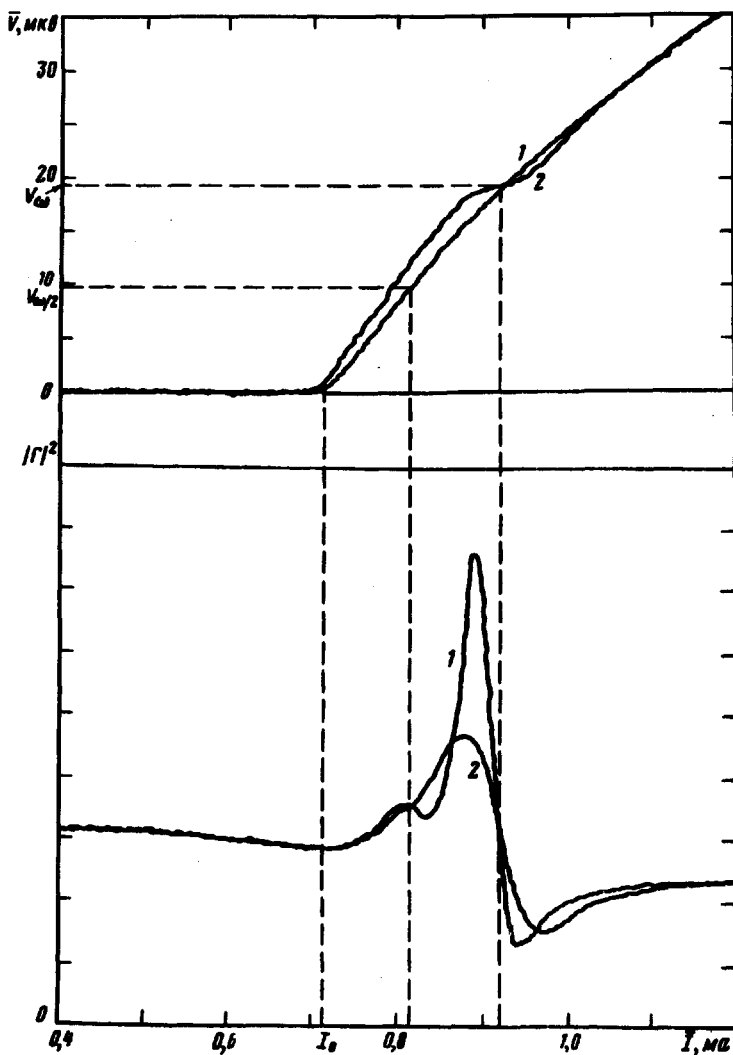


Рис. 1. Зависимости $|\Gamma|^2$ и \bar{V} от \bar{I} . Значения P_i : 1 — $8 \cdot 10^{-11}$ Вт, 2 — $2,5 \cdot 10^{-9}$ Вт. Одно деление по оси $|\Gamma|^2$ соответствует $0,1 \pm 0,03$. Значение $\bar{V} = V_\omega = 19,2$ мВ соответствует равенству частот генерации и сигнала ($\omega/2\pi = 9,32$ ГГц).

4. Наличие аномальных эффектов той же природы при взаимодействии внешнего СВЧ поля с джоульсоновской генерацией контакта обнаруживается также при изучении комбинационного излучения из контакта на частотах $|\pm\omega_v \pm \omega|$. Мы наблюдали такое излучение, ненамного (~ 20 МГц) расстроив частоту ω падающего СВЧ сигнала относительно частоты приемника. В этом случае комбинационные компоненты долж-

ны попадать в приемник при $\omega_{\nu} = 2\omega/n$, т. е. $\bar{V} \approx 2V_{\omega}/n$, $n = 1, 2, \dots$. Из приведенной в [5] формулы для коэффициентов преобразования следует, что в отличие от обычного монотонного убывания интенсивности комбинационного излучения с ростом n у нас это излучение при $P_i \rightarrow 0$ должно быть максимально при $n = 2$.

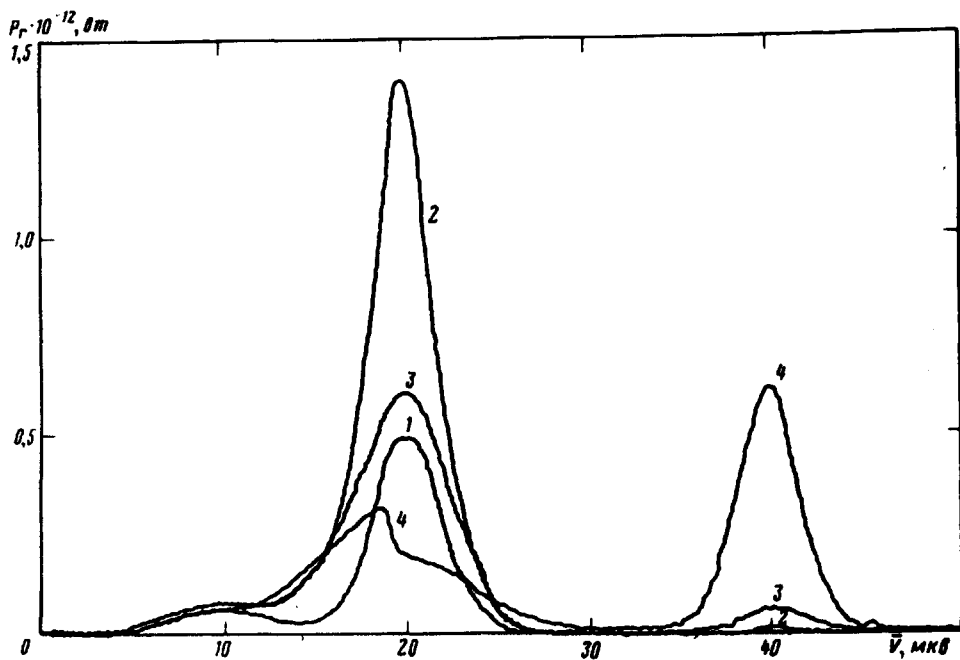


Рис. 2. Комбинационное излучение из того же контакта. Кривая 1 показывает уровень джозефсоновской генерации ($P_i = 0$). Значения P_i для остальных кривых: 2 — $2 \cdot 10^{-9}$ вт, 3 — $6 \cdot 10^{-9}$ вт, 4 — $2 \cdot 10^{-8}$ вт

На рис. 2 показаны зависимости мощности в приемнике P_r от \bar{V} при различных значениях мощности падающего сигнала P_i . Ширина линий комбинационных компонент определяется шириной линии генерации. Видно, что в соответствии с теорией при малых значениях преобразование максимально при $n = 2$. Насыщение эффекта наступает для всех n (мы наблюдали $n = 1, 2, 3$) при примерно одинаковых уровнях $P_r - P_0$, иногда значительно превышающих уровень генерации P_0 .

5. Проведенные исследования подтверждают, что в S -с- S джозефсоновских контактах сверхпроводников могут осуществляться специфические параметрические (комбинационные) взаимодействия СВЧ поля с джозефсоновскими колебаниями [1, 2]¹⁾. Как следует из оценок [4], эти взаимодействия должны влиять на электродинамические

¹⁾ По всей вероятности, именно регенерацией резонатора при этих взаимодействиях объясняется полученное в [6] излучение из точечного сверхпроводящего контакта на собственной ("неджозефсоновской") частоте резонатора.

свойства контактов даже на частотах, существенно превышающих характерную частоту $\omega_0 = 2eI_0 R / \hbar$, т. е. для реальных точечных контактов как в миллиметровом, так и в субмиллиметровом диапазонах.

Институт радиотехники и
электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
10 января 1973 г.

Литература

- [1] А.Н.Выставкин, В.И.Губанков, Л.С.Кузьмин, К.К.Лихарев, В.В.Мигулин, РТЭ, 17, 895, 1972.
 - [2] Н.Kanter, F.L.Vernon. J. Appl. Phys., 43; 3174, 1972; В.Т.Ulrich, T.Lee, Report at Appl. S.—C.Conf., Annapolis, Maryland, USA, May 1972.
 - [3] W.C.Stewart. Appl. Phys. Lett., 12, 277, 1968; D.E.McCumber, J. Appl. Phys., 39, 3113, 1968; Л.Ф.Асламазов, А.И.Ларкин. Письма в ЖЭТФ, 9, 150, 1969.
 - [4] К.К.Лихарев, В.К.Семенов, РТЭ, 18, 1973 (в печати)
 - [5] К.К.Лихарев, В.К.Семенов. Письма в ЖЭТФ, 15, 625, 1972.
 - [6] В. Т. Ulrich, Phys. Lett., 42a, 119, 1972.
-