

ПОЗДНЯКОВА О. Д., ШОРОХОВ А. В.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ОДНОМЕРНОМ МАССИВЕ КОНТАКТОВ ДЖОЗЕФСОНА¹**

Аннотация. Теоретически изучена параметрическая генерация высокочастотного электромагнитного излучения массивами контактов Джозефсона. Вычислена поглощенная мощность внешнего высокочастотного излучения в одномерном массиве одинаковых синхронизированных последовательно соединенных контактов Джозефсона, найдена мощность параметрического усиления внешнего излучения в массиве контактов при разных параметрах нагрузки, изучено влияние параметров нагрузки на усиление. Мощность усиления в массиве из тысячи контактов составила несколько мкВт, что согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: массив контактов Джозефсона, параметрическое усиление.

POZDNYAKOVA O. D., SHOROKHOV A. V.

**PARAMETRIC AMPLIFICATION OF HIGH-FREQUENCY RADIATION
IN ONE-DIMENSIONAL JOSEPHSON JUNCTION ARRAY**

Abstract. The article presents a study of parametric generation of the high frequency electromagnetic radiation by Josephson junction arrays. The absorbed power of the external high-frequency radiation in one-dimensional array of identical synchronized series-connected Josephson junctions is calculated, the power of parametric amplification of external radiation is found for the junction array at various load parameters, the effect of load parameters on the gain is studied. The power gain for a thousand-contact array is a few microwatts. That is consistent with the experimental data.

Keywords: Josephson junctions array, parametric amplification.

Хорошо известно, что если ток через джозефсоновский контакт превышает некоторое критическое значение, обусловленное свойствами самого контакта, на контакте возникает разность потенциалов, и контакт начинает генерировать высокочастотное электромагнитное излучение [1]. Частота такого джозефсоновского излучения может достигать нескольких сотен ГГц.

¹ Публикация выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания, проект № 2.2665.2014.

В настоящее время актуальной проблемой является создание компактных когерентных источников ТГц излучения, поэтому повышение порога генерации в режиме нестационарного эффекта Джозефсона до ТГц частот представляет большой интерес. Одним из способов решения данной проблемы является параметрическая генерация, при которой собственное джозефсоновское излучение выступает в роли накачки [2-7]. Поскольку мощность излучения одного контакта мала для практического применения (порядка нескольких нВт), в последнее время все большую актуальность приобретает исследование массивов контактов Джозефсона, допускающих в настоящее время, благодаря успехам в технологии их изготовления, синхронизацию, необходимую для достижения когерентного излучения достаточной мощности, которая может достигать нескольких мкВт [8; 9]. В данной работе рассмотрен линейный массив контактов Джозефсона, связанных внешней нагрузкой и синхронизированных во внешнем высокочастотном электромагнитном поле, и исследованы возможности данной системы для генерации ТГц излучения.

Вблизи критической температуры для анализа высокочастотных явлений мы используем удобную резистивную модель [10]. Для некоторых типов джозефсоновских контактов (например, для точечных контактов) емкость контакта можно не учитывать из-за ее малости. Поэтому в дальнейшем мы пренебрегаем емкостью контакта. Заметим, что контакты с малой емкостью легче согласовывать с внешними электродинамическими системами СВЧ [11].

Параметрическое усиление внешнего ВЧ излучения одиночным контактом Джозефсона хорошо изучено теоретически и экспериментально, как было отмечено выше. Рассмотрим кратко особенности параметрической генерации одиночного контакта, необходимые в дальнейшем для понимания процессов генерации массивами таких контактов.

Согласно резистивной модели, при $T \approx T_c$ полный ток через джозефсоновский контакт можно представить в виде $I(t) = I_J + I_N = I_c \sin(\varphi) + V/R_J$, где $I_J = I_c \sin(\varphi)$ – джозефсоновский ток куперовских пар, I_c – критический ток, φ – разность фаз контактирующих сверхпроводников, I_N – нормальный ток электронов проводимости, $V = I_N R_J$ – напряжение на контакте, R_J – сопротивление контакта в нормальном состоянии [4]. Эквивалентная схема контакта представлена на рис. 1.

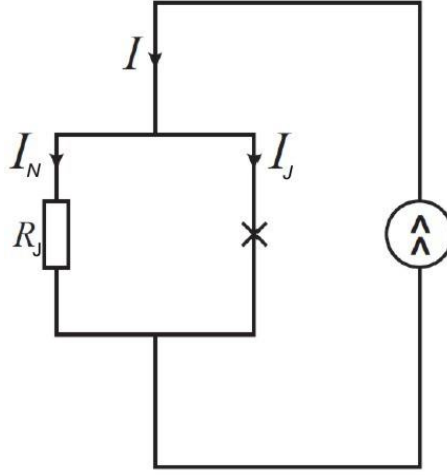


Рис. 1. Эквивалентная схема контакта Джозефсона без учета емкости.

Действие внешнего электромагнитного излучения частоты ω_1 приведет к появлению дополнительного переменного тока через контакт. Тогда полный ток $I(t) = I_{dc} + I_1 \cos(\omega_1 t)$, где I_{dc} – постоянный ток. Учитывая связь между напряжением на контакте и разностью фаз $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V(t)$, из резистивной модели получим уравнение для разности фаз:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} + \sin(\varphi) = i_{dc} + i_1 \cos(\Omega_1 \tau), \quad (1)$$

где $\tau = \omega_c t$, $\omega_c = \frac{2e}{\hbar} V_c$ – характерная частота контакта, $V_c = I_c R_J$ – характерное напряжение,

$i_{dc} = \frac{I_{dc}}{I_c}$, $i_1 = \frac{I_1}{I_c}$, $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{\omega_c}$. Уравнение (1) является уравнением нелинейного передемпфированного маятника. Решение данного уравнения приводит к хорошо известному результату: на статической ВАХ контакта появляются ступеньки, называемые ступеньками Шапиро [12] (см. рис. 2).

Вычислим среднюю поглощенную мощность внешнего высокочастотного излучения на его частоте по формуле:

$$\frac{P}{I_1 V_c} = \langle \dot{\varphi} \cos(\Omega_1 \tau) \rangle_\tau. \quad (2)$$

Численный анализ показал, что вблизи первой ступеньки Шапиро возможно появление области отрицательной мощности, то есть контакт будет генерировать ВЧ излучение (Рис. 2).

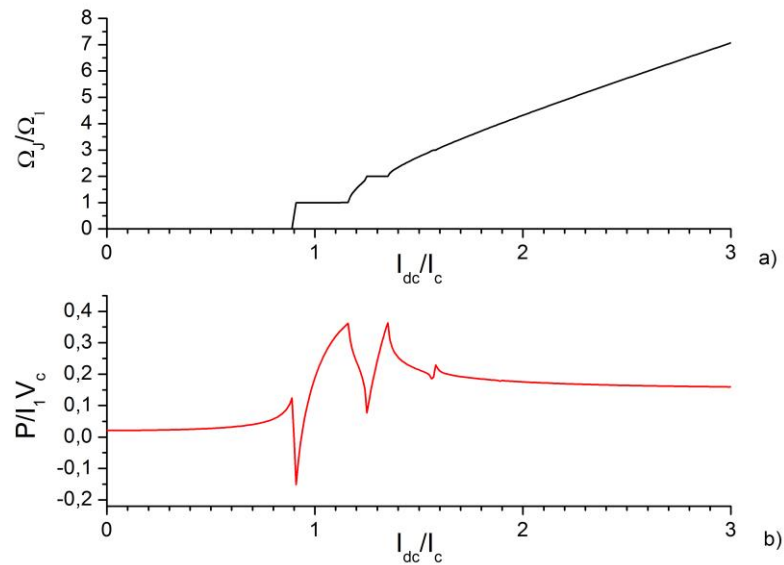


Рис. 2. ВАХ джозефсоновского контакта (a) и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (b) для частоты $\omega_1 = 0.4\omega_c$ и амплитуды переменного тока $I_1 = 0.3I_c$

Рассмотрим теперь массив контактов Джозефсона. Связь между контактами в массиве осуществляется за счет нагрузки. В общем случае нагрузка характеризуется активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C . Существуют различные способы соединения джозефсоновских контактов в массив и различные механизмы, и модели их синхронизации [13-16]. В данной работе мы изучаем одномерный массив последовательно соединенных контактов Джозефсона.

Рассмотрим массив N одинаковых контактов, связанных с помощью внешней нагрузки, как показано на Рис. 3.

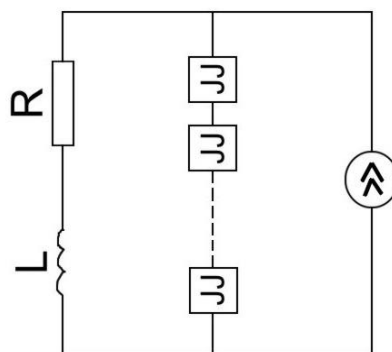


Рис. 3. Массив N одинаковых контактов, связанных с помощью внешней LR-нагрузки.

Эквивалентная схема каждого джозефсоновского контакта (JJ) представлена на Рис. 1.

Поместим массив контактов во внешнее высокочастотное излучение. Зафиксируем полный ток в виде $I(t) = I_{dc} + I_1 \cos(\omega_1 t)$. Тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\hbar}{2eR_J} \frac{d\varphi_k}{dt} + I_c \sin(\varphi) + I_{Load} = I_{dc} + I_1 \cos(\omega_1 t), & k = 1, 2, \dots, N \\ \frac{\hbar}{2e} \sum_{k=1}^N \frac{d\varphi_k}{dt} = L \frac{dI_{Load}}{dt} + RI_{Load} \end{cases}, \quad (3)$$

где I_{Load} – ток через нагрузку, где L и R – индуктивность и активное сопротивление нагрузки.

Рассмотрим случай, когда разность фаз на всех контактах одинакова $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_N = \varphi$, т. е. контакты синхронизированы. Стабильность такого состояния может быть достигнута в случае LR-нагрузки, а наличие емкости нагрузки может привести к нарушению синхронизированного состояния контактов в массиве [17; 18], поэтому мы рассматриваем нагрузку без емкости. В случае синхронизации система уравнений (3) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} + \sin(\varphi) + i_{Load} = i_{dc} + i_1 \cos(\Omega_1 \tau) \\ N \frac{d\varphi}{d\tau} = l \frac{di_{Load}}{d\tau} + ri_{Load} \end{cases}, \quad (4)$$

где $i_{Load} = \frac{I_{Load}}{I_c}$, $l = \frac{L}{L_c}$, $L_c = \frac{\hbar}{2eI_c}$, $r = \frac{R}{R_J}$. Следует отметить, что импеданс нагрузки должен быть согласован с сопротивлением массива ($|Z_{Load}| \approx NR_J$) [16].

Численно решив систему уравнений (4), среднюю поглощенную мощность для массива контактов можно найти по формуле (2). ВАХ и графики зависимости поглощенной мощности от постоянного тока для тысячи контактов представлены на Рис. 4.

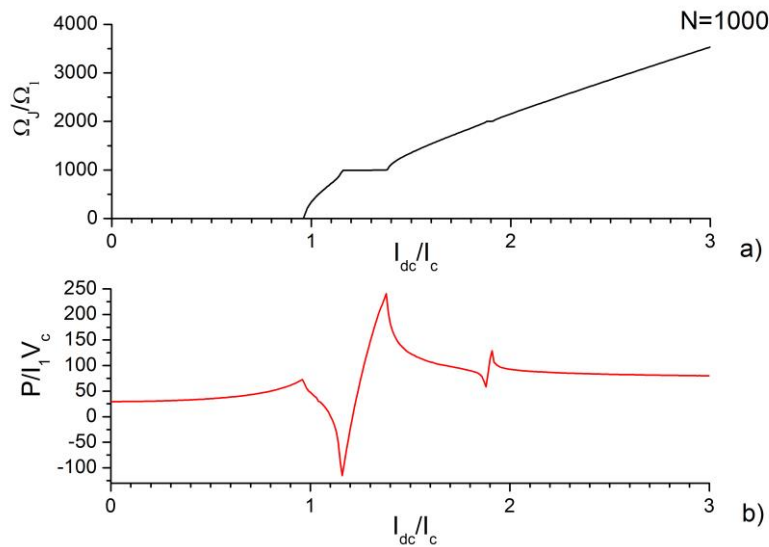


Рис. 4. ВАХ (a) и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (b) для массива из тысячи контактов, связанных внешней LR-нагрузкой. $\omega_1 = 0.4\omega_c$, $I_1 = 0.3I_c$, $L = 10L_c$, $R = 10^3 R_J$

Из Рис. 2 и 4 видно, что при увеличении числа контактов поглощенная мощность (усиление) значительно увеличивается.

Численный анализ показал, что чем больше индуктивность нагрузки, тем меньше усиление. В связи с этим рассмотрим случай, когда $L = 0$ (Рис. 5).

Сравнивая графики на Рис. 4 и 6, можно заметить, что поглощенная мощность (усиление) для массива контактов больше в случае чисто активной нагрузки.

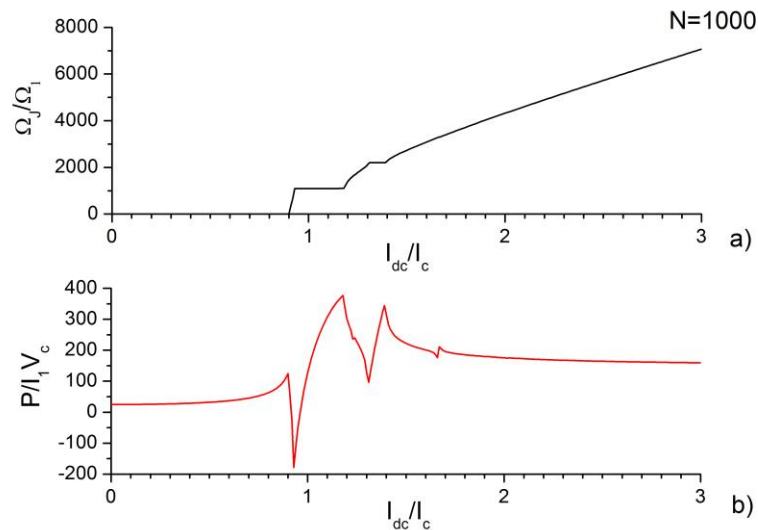


Рис. 5. ВАХ (а) и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для массива из тысячи контактов, связанных внешней R-нагрузкой. $\omega_1 = 0.4\omega_c$, $I_1 = 0.3I_c$, $L = 0$, $R = 10^4 R_j$

Мы рассмотрели одиночный контакт Джозефсона и массив из нескольких таких контактов, связанных внешней нагрузкой и синхронизированных во внешнем высокочастотном электромагнитном поле. Нами теоретически изучено влияние параметров внешней нагрузки на поглощение (усиление) внешнего высокочастотного излучения массивом синхронизированных джозефсоновских контактов, а также численно найдены области усиления для массива при различных параметрах изучаемой системы. Численный анализ показал следующие результаты: (1) с увеличением индуктивности нагрузки уменьшаются область усиления и выигрыш в усилении от увеличения числа контактов в массиве; (2) с увеличением активного сопротивления нагрузки при чисто активной нагрузке увеличиваются области усиления и поглощения, при этом области усиления для массива нескольких контактов совпадают с областями усиления для одиночного контакта; (3) усиление существенно возрастает при увеличении числа контактов Джозефсона в массиве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Josephson B. D. Possible new effects in superconductive tunneling // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
2. Выставкин А. Н., Губанков В. Н., Кузьмин Л. С. и др. Об особенностях параметрической регенерации в точечных сверхпроводящих контактах // Радиотехника и электроника. – 1971. – В. 15. – С. 896.
3. Auracher F. and Van Duzer T. rf impedance of superconducting weak links // J. Appl. Phys. – 1973. – V. 44. – No. 2. – P. 848.
4. Выставкин А. Н., Губанков В. Н., Лещенко Г. Ф. и др. О параметрическом преобразовании и усилении с использованием сверхпроводящих точечных контактов // Радиотехника и электроника. – 1970. – В. 15. – С. 2404.
5. Kanter H. and Vernon F. L. High-Frequency Response of Josephson Point Contacts // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – P. 3174.
6. Kanter H. and Silver A. H. Self-Pumped Josephson Parametric Amplification // Appl. Phys. Lett. – 1971. – V. 19. – P. 515.
7. Kanter H. A novel parametric negative resistance effect in Josephson junctions // Appl. Phys. Lett. – 1973. – V. 23. – P. 350.
8. Fengbin Song, Franz Muller, Thomas Scheller, Alexei Semenov, Ming He et al. Compact tunable sub-terahertz oscillators based on Josephson junctions // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 98. – P. 142506.
9. Masashi Tachiki, Krsto Ivanovic, Kazuo Kadowaki, and Tomio Koyama. Emission of terahertz electromagnetic waves from intrinsic Josephson junction arrays embedded in resonance LCR circuits // Phys. Rev. B. – 2011. – V. 83. – P. 014508.
10. Асламазов Л. Г., Ларкин А. И. Эффект Джозефсона в точечных сверхпроводящих контактах // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 9. – С. 47.
11. Лихарев К. К., Семенов В. К. Электродинамические свойства сверхпроводящих точечных контактов // Радиотехника и электроника. – 1971. – В. 11. – С. 2167.
12. Shapiro S. Josephson currents in superconducting tunneling: the effect of microwaves and other observations // Phys. Rev. Lett. – 1963. – V. 11. – P. 80.
13. Darula M., Doderer T. and Beuven S. Millimetre and sub-mm wavelength radiation sources based on discrete Josephson junction arrays // Supercond. Sci. Technol. – 1999. – V. 12. – P. R1-R25.
14. Filatrella G., Pedersen N. F., and Wiesenfeld K. High- Q cavity-induced synchronization in oscillator arrays // Phys. Rev. E. – 2000. – V. 61. – P. 2513.

15. Juan A. Acebron, L. L. Bonilla, Conrad J. Perez Vicente, Felix Ritort, and Renato Spigler. The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena // Rev. Mod. Phys. – 2005. – V. 77. – P. 138.
16. Jain A. K., Likharev K. K., Lukens J. E., and Sauvageau J. E. Mutual phase-locking in Josephson junction arrays // Phys. Rep. – 1984. – V. 109. – P. 309.
17. Hadley P. and Beasley M. R. Dynamical states and stability of linear arrays of Josephson junctions // Appl. Phys. Lett. – 1987. – V. 50. – P. 621.
18. Hadley P., Beasley M. R., and Wiesenfeld K. Phase locking of Josephson-junction series arrays // Phys. Rev. B. – 1988. – V. 38. – P. 8712.