

О. Д. Позднякова, А. В. Шорохов

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНТАКТАМИ
ДЖОЗЕФСОНА В РЕЗОНАТОРЕ С СОБСТВЕННОЙ
ДЖОЗЕФСОНОВСКОЙ И ВНЕШНЕЙ НАКАЧКАМИ**

Аннотация.

Актуальность и цели. Контакты Джозефсона можно использовать для параметрического усиления высокочастотного излучения, в том числе и в терагерцовом диапазоне, при этом джозефсоновское излучение контакта выполняет функцию накачки. Однако мощность параметрического усиления одиночным контактом мала (единицы нВт), поэтому большой интерес представляют массивы 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 для больших массивов.

Материалы и методы. Расчеты вольт-амперной характеристики и поглощенной мощности контакта и массива контактов в резонаторе проводились в рамках резистивной модели контакта Джозефсона с использованием численных методов решения систем дифференциальных уравнений и интегрирования.

Результаты. Теоретически изучена параметрическая генерация высокочастотного электромагнитного излучения контактами и массивами контактов Джозефсона в резонаторе. Вычислены вольт-амперные характеристики и поглощенная мощность внешнего высокочастотного излучения контакта и однородного массива одинаковых последовательно соединенных контактов Джозефсона в резонаторе в рамках резистивной модели джозефсоновского контакта при разных параметрах резонатора и двух способах накачки: 1) в качестве излучения накачки используется джозефсоновское излучение; 2) используется дополнительная накачка внешним высокочастотным полем, при этом усиление происходит на его гармониках.

Выводы. Параметрическое усиление контактом Джозефсона во внешнем монохроматическом высокочастотном излучении и в резонаторе возможно не только вблизи первой ступеньки Шапиро, но и на субгармонических ступеньках, которые появляются на вольт-амперных характеристиках контакта в такой системе. Дополнительное внешнее высокочастотное излучение накачки может приводить к усилению не только на ступеньках, где джозефсоновская частота равна частотам внешних переменных сигналов, но и на других ступеньках, что увеличивает область параметрического усиления на гармониках высокочастотного излучения накачки.

Ключевые слова: массив контактов Джозефсона, параметрическое усиление, резистивная модель.

О. D. Pozdnyakova, A. V. Shorokhov

**PARAMETRIC AMPLIFICATION OF HIGH-FREQUENCY
ELECTROMAGNETIC RADIATION BY JOSEPHSON
CONTACTS IN A RESONATOR WITH OWN JOSEPHSON
AND EXTERNAL PUMPING**

Abstract.

Background. Josephson junctions may be used for parametric amplification of high-frequency radiation, including the THz range. In this case, Josephson junction radiation executes the pumping function. However, the power of parametric amplification by a single junction is low (nW figures), and, thus, of great interest are arrays of Josephson junctions, which due to the technological progress in the present time allow synchronization necessary for obtaining coherent radiation of sufficient power, capable of reaching several microW for large arrays.

Materials and methods. Calculation of volt-ampere characteristic and absorbed power of a junction and a junction array in a resonator were performed within a resistive model of Josephson junction using numerical methods of differential equations solving and integration.

Results. The authors theoretically studied parametric generation of high-frequency electromagnetic radiation by Josephson junctions and junction arrays in a resonator, calculated volt-ampere characteristics and absorbed power of external high-frequency radiation of a junction and a one-dimensional array of similar concatenated Josephson junctions in a resonator within a resistive model of Josephson junction at various resonator parameters and two pumping methods: 1) Josephson radiation was used as pumping radiation; 2) additional pumping by an external high-frequency field (amplification takes place on its harmonics).

Conclusions. Parametric amplification by the Josephson junction in external monochromatic high-frequency radiation and in a resonator is possible in vicinity of the first Shapiro step, as well as on sub-harmonic steps that appear on volt-ampere characteristics of a junction in such system. Additional external high-frequency pumping radiation may lead to amplification not just on steps, where the Josephson frequency equals to external variable signal frequencies, but on other steps, which increases the area of parametric amplification on harmonics of high-frequency pumping radiation.

Key words: Josephson junctions array, parametric amplification, resistively shunted Josephson junction.

Введение

Известно, что если ток через джозефсоновский контакт превышает некоторое критическое значение, обусловленное свойствами самого контакта, на контакте возникает разность потенциалов, что приводит к нестационарному эффекту Джозефсона [1]. Частота джозефсоновского излучения может достигать нескольких сотен ГГц. Вблизи критической температуры для анализа высокочастотных явлений удобно использовать резистивную модель [2], согласно которой джозефсоновский контакт может быть представлен в виде параллельного соединения идеального джозефсоновского контакта, через который течет только бездиссипативный ток куперовских пар, и резистивного элемента с активным сопротивлением, через который течет диссипативный ток одиночных электронов проводимости (нормальный ток). Для учета емкости контакта в резистивной модели в схему добавляют также конденсатор. Для некоторых типов джозефсоновских контактов (например для точечных контактов) емкость можно не учитывать, так как она очень мала. Контакты с малой емкостью легче согласовывать с внешними электродинамическими сверхвысокочастотными системами [3].

В рамках резистивной модели в [4] было найдено активное сопротивление точечного джозефсоновского контакта в слабосигнальном приближении и показано, что в такой системе возможно параметрическое усиление внеш-

него высокочастотного излучения благодаря нестационарному эффекту Джозефсона [4, 5]. В работе [6] было показано, что в резистивной модели в слабосигнальном приближении контакт Джозефсона можно рассматривать как реактивный элемент с переменной индуктивностью, и в [4, 5] было показано, что при некоторых частотах внешнего высокочастотного (ВЧ) излучения активное сопротивление контакта отрицательно, т.е. джозефсоновские контакты можно использовать для параметрического преобразования частоты, при этом в качестве излучения накачки можно использовать джозефсоновское излучение [7–9]. Благодаря параметрическому взаимодействию джозефсоновского и внешнего ВЧ-излучения на контакте частоту усиливаемого сигнала можно сдвинуть, в том числе и в ТГц-диапазон.

Мощность параметрического (неджозефсоновского) излучения одиночным джозефсоновским контактом очень мала (порядка нескольких нВт). В связи с этим большой интерес представляют массивы синхронизированных контактов Джозефсона, способных излучать когерентно. Мощность параметрического излучения, полученная с помощью больших массивов джозефсоновских контактов, может достигать нескольких мкВт [10, 11].

В данной работе мы рассмотрим параметрическое усиление внешнего ВЧ-излучения контактами и массивами контактов Джозефсона в резонаторе в двух случаях: 1) в качестве излучения накачки используется джозефсоновское излучение; 2) в качестве излучения накачки, помимо джозефсоновского, используется внешнее излучение; при этом усиливаемый сигнал является гармоникой внешнего излучения накачки.

1. Параметрическая генерация одиночным контактом Джозефсона

Параметрическое усиление внешнего ВЧ-излучения одиночным контактом Джозефсона хорошо изучено теоретически и экспериментально, как было отмечено выше. Рассмотрим коротко 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.

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 вольт-амперной характеристике (ВАХ) контакта появляются ступеньки, называемые ступеньками Шапиро [12] (рис. 2).

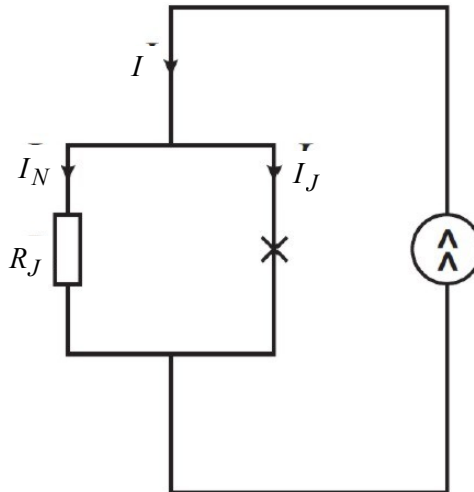


Рис. 1. Эквивалентная схема контакта Джозефсона без учета емкости

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, т.е. контакт будет генерировать ВЧ-излучение (рис. 2).

2. Одиночный контакт Джозефсона в резонаторе

Рассмотрим контакт Джозефсона в резонаторе. Резонатор представим как LC -контур (рис. 3).

Для данной системы можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\hbar}{2eR_J} \frac{d\varphi}{dt} + I_c \sin(\varphi) + \frac{dQ}{dt} = I_{dc} + I_1 \cos(\omega_1 t), \\ L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

где Q – заряд на обкладках конденсатора; L – индуктивность резонатора; C – емкость резонатора.

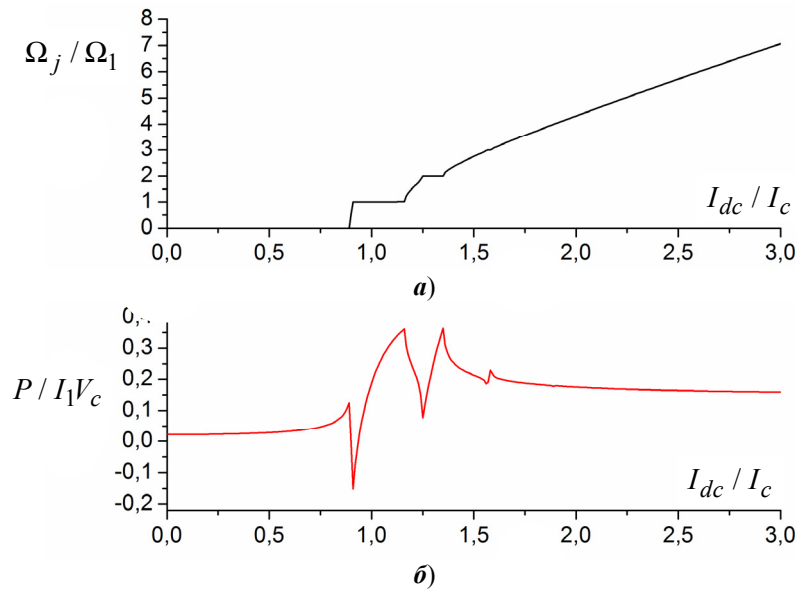


Рис. 2. ВАХ джозефсоновского контакта (а) и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты $\omega_1 = 0,4\omega_c$ и амплитуды переменного тока $I_1 = 0,3I_c$

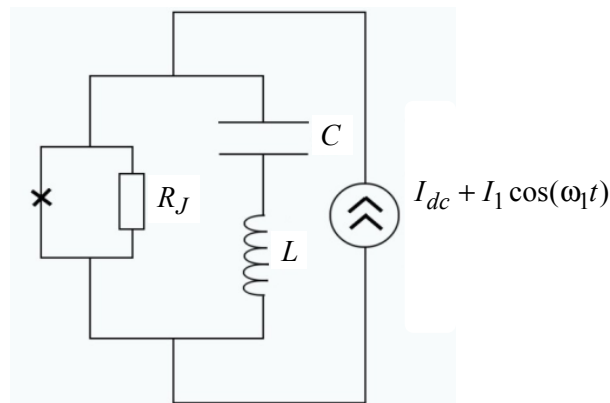


Рис. 3. Эквивалентная схема контакта Джозефсона в резонаторе

Перейдя в системе уравнений (3) к безразмерным величинам, получим

$$\begin{cases} \dot{\phi} + \sin(\phi) + \dot{q} = i_{dc} + i_1 \cos(\Omega_1 \tau), \\ \ddot{q} + \Omega_0^2 q = \frac{\dot{\phi}}{l}, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$q = \frac{2eR_J Q}{\hbar}; \quad \Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{l\beta}}; \quad l = \frac{L}{L_c}; \quad L_c = \frac{\hbar}{2eI_c}; \quad \beta = 2eR_J^2 I_c C.$$

Решив численно систему уравнений (4), можно найти среднюю поглощенную мощность по формуле (2). Численный анализ показал, что при $\Omega_0 = n\Omega_1$, где $n = 1, 2, 3, \dots$, амплитуда тока в резонаторе возрастает [13]. Однако если $\Omega_0 = \Omega_1$, то колебания тока в резонаторе и колебания ϕ происходят с джозефсоновской частотой, а не с частотой внешнего сигнала Ω_1 , и средняя поглощенная мощность принимает отрицательные значения только на джозефсоновской частоте.

Более интересен случай, когда $\Omega_0 = n\Omega_1$, где $n > 1$. В этом случае на ВАХ контакта могут возникать субгармонические ступеньки Шапиро и отрицательная поглощенная мощность (т.е. усиление внешнего сигнала) может возникать не только, когда $\Omega_J = \Omega_1$ (первая ступенька Шапиро), но и при $\Omega_J = \frac{\Omega_1}{2}$ (субгармонические ступеньки Шапиро) [14], как видно из рис. 4.

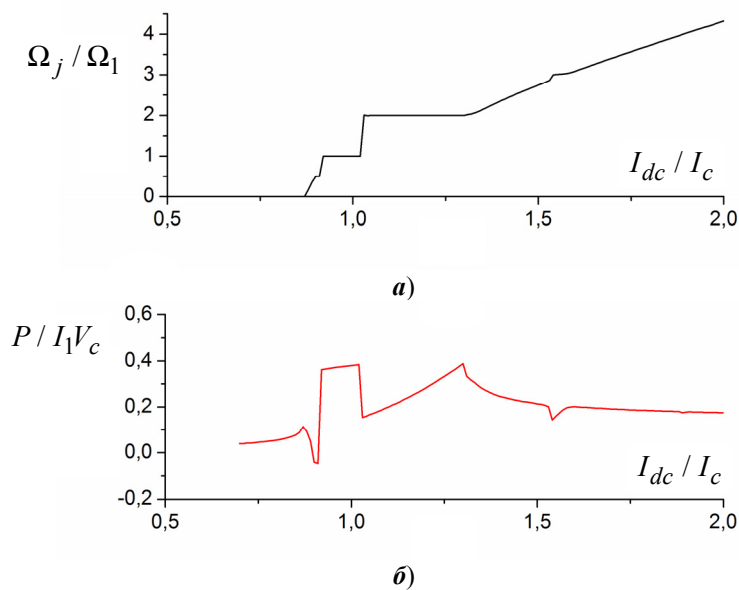


Рис. 4. ВАХ (а) джозефсоновского контакта в резонаторе и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_1 = 0,4\omega_c$, частоты резонатора $\omega_0 = 0,8\omega_c$ и амплитуды переменного тока $I_1 = 0,3I_c$, $\beta = 0,01$

На рис. 5 приведены графики для случая, когда собственная частота резонатора Ω_0 не кратна частоте внешнего сигнала Ω_1 . На рис. 5 видно, что должно быть усиление внешнего сигнала при $\Omega_J = 3\Omega_1 / 2$.

Параметрическая генерация с дополнительной (неджозефсоновской) накачкой

Рассмотрим контакт Джозефсона, помещенный во внешнее бихроматическое поле $E = E_1 \cos(\omega_1 t) + E_2 \cos(\omega_2 t)$, $\omega_2 = m\omega_1$, где $m = 2, 3, \dots$. Тогда

в режиме заданного тока уравнение для разности фаз контактирующих сверхпроводников будет иметь вид

$$\dot{\phi} + \sin(\phi) = i_{dc} + i_1 \cos(\Omega_1 \tau) + i_2 \cos(\Omega_2 \tau), \quad (5)$$

где $\Omega_2 = m\Omega_1$, $m = 2, 3, \dots$ Сигнал частоты ω_1 играет роль накачки.

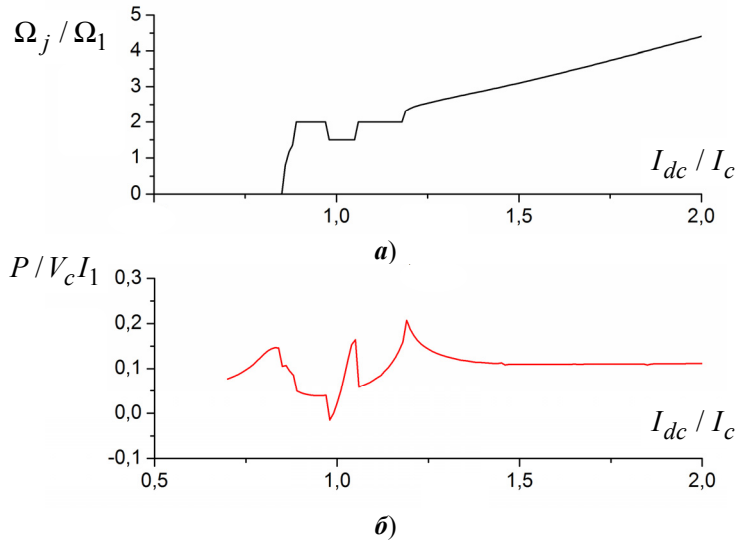


Рис. 5. ВАХ (а) джозефсоновского контакта в резонаторе и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_1 = 0,4\omega_c$, частоты резонатора $\omega_0 = 0,7\omega_c$ и амплитуды переменного тока $I_1 = 0,3I_c$, $\beta = 1$

Среднюю поглощенную мощность пробного сигнала частоты ω_2 будем искать в виде $\frac{P}{I_2 V_c} = \langle \dot{\phi} \cos(\Omega_2 \tau) \rangle_\tau$.

Как видно из графиков на рис. 6, средняя поглощенная мощность на частоте пробного сигнала может принимать отрицательные значения не только при $\Omega_j = \Omega_1$ и $\Omega_j = \Omega_2$, но и на других ступеньках Шапиро.

Если поместить контакт Джозефсона в бихроматическом излучении в резонатор, то, так же как и в случае только джозефсоновской накачки, поглощенная мощность пробного сигнала может принимать отрицательные значения только, если частота резонатора кратна частоте усиливаемого переменного тока. При малой емкости резонатора ($\beta \ll 1$) наличие резонатора практически не изменяет вид кривой поглощенной мощности и ВАХ. При некоторых параметрах системы наличие резонатора приводит к появлению дополнительных областей отрицательной поглощенной мощности (усиления), как видно из сравнения графиков на рис. 7 и 8.

Одномерный массив контактов Джозефсона в резонаторе

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 [13–18].

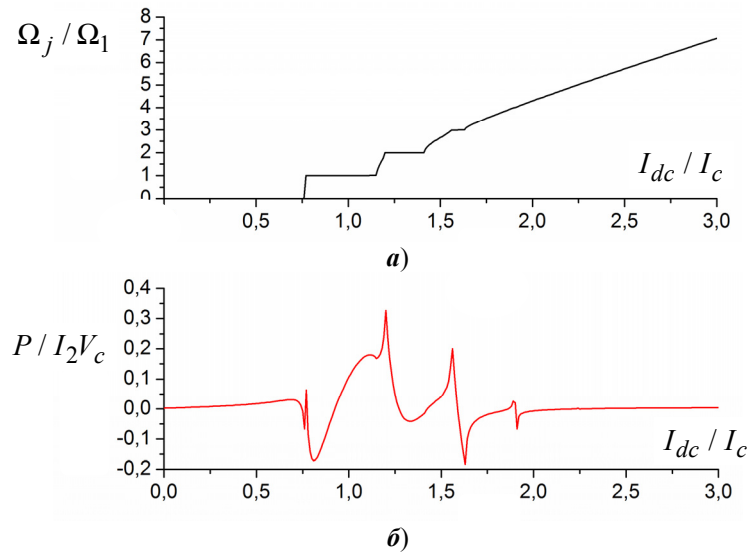


Рис. 6. ВАХ (а) джозефсоновского контакта в бихроматическом поле и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_2 = 0,8\omega_c$, частоты накачки $\omega_1 = 0,4\omega_c$ и амплитуд переменных токов $I_1 = 0,5I_c$ и $I_1 = 0,01I_c$

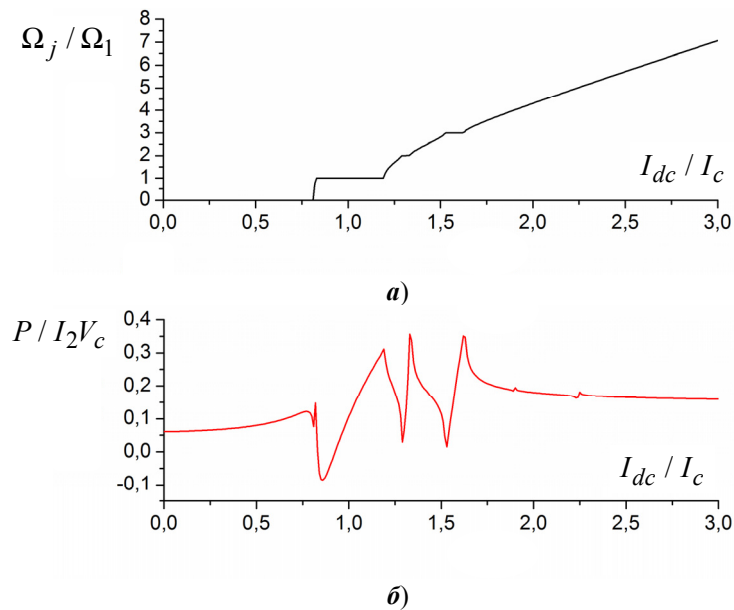


Рис. 7. ВАХ (а) джозефсоновского контакта в бихроматическом поле и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_2 = 0,8\omega_c$, частоты накачки $\omega_1 = 0,4\omega_c$ и амплитуд переменных токов $I_1 = I_2 = 0,3I_c$

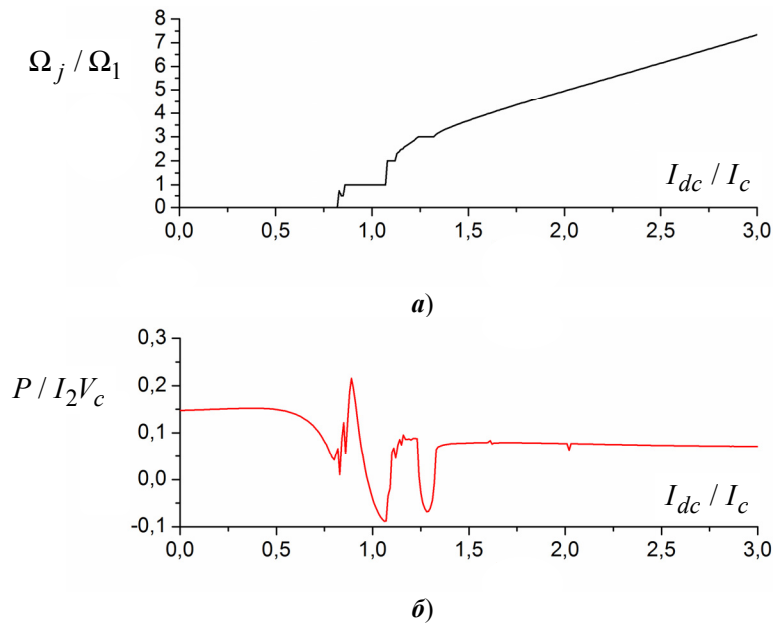


Рис. 8. ВАХ (а) джозефсоновского контакта в бихроматическом поле и в резонаторе и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока (б) для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_2 = 0,8\omega_c$, частоты накачки $\omega_1 = 0,4\omega_c$ и амплитуд переменных токов $I_1 = I_2 = 0,3I_c$, частоты резонатора $\omega_0 = 1,6\omega_c$ и $\beta = 1$

В данной работе мы изучаем одномерный массив, состоящий из N одинаковых последовательно соединенных контактов Джозефсона, в резонаторе (рис. 9). Каждый контакт описывается резистивной моделью (рис. 1).

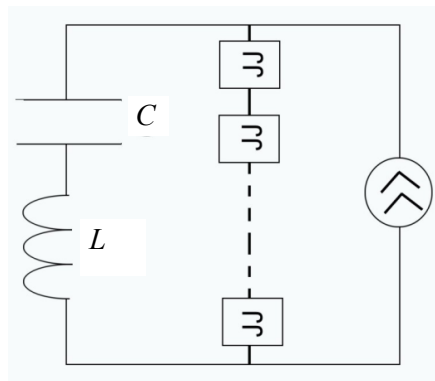


Рис. 9. Одномерный массив последовательно соединенных контактов Джозефсона

Одномерный массив в резонаторе можно описать системой $N+1$ уравнений. Первые N уравнений системы имеют вид (1) или (5), в зависимости от накачки. К этим уравнениям добавляется уравнение для резонатора в виде второго уравнения системы (4).

Контакты в массиве могут синхронизироваться при небольшой внешней емкости ($\beta \ll 1$) так, что колебания на контактах будут происходить в одной фазе или с одинаковой разностью фаз. Как видно из графиков на рис. 10 и 11, построенных для $N = 10$ контактов, величина усиления (отрицательной поглощенной мощности) возрастает пропорционально числу синхронизированных контактов в массиве.

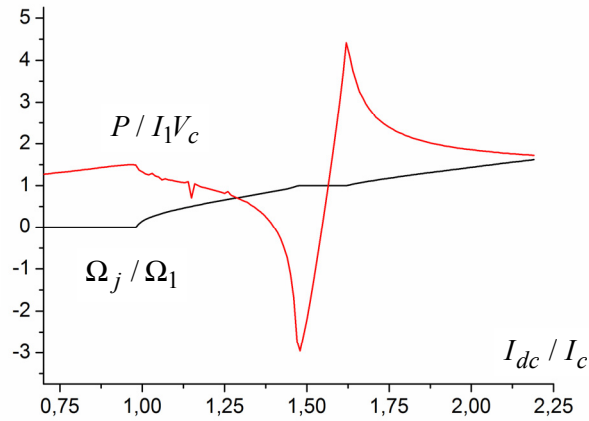


Рис. 10. ВАХ массива из $N = 10$ одинаковых последовательно соединенных джозефсоновских контактов в резонаторе и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_1 = 1,2\omega_c$, частоты резонатора $\omega_0 = 2,4\omega_c$ и амплитуды переменного тока $I_1 = 0,3I_c$, $\beta = 0,01$

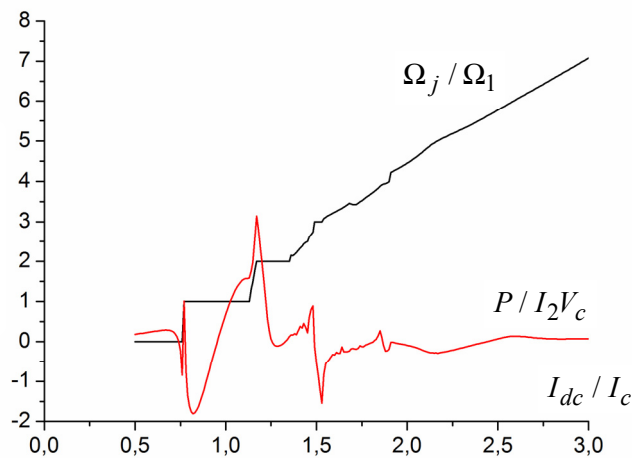


Рис. 11. ВАХ массива из $N = 10$ одинаковых последовательно соединенных джозефсоновских контактов в бихроматическом поле и в резонаторе и график зависимости поглощенной мощности от постоянного тока для частоты внешнего усиливаемого сигнала $\omega_2 = 0,8\omega_c$, частоты накачки $\omega_1 = 0,4\omega_c$ и амплитуд переменных токов $I_1 = 0,5I_c$ и $I_2 = 0,01I_c$, частоты резонатора $\omega_0 = 1,6\omega_c$ и $\beta = 0,01$

Заключение

В работе рассмотрен одиночный контакт Джозефсона и одномерный массив из нескольких таких последовательно соединенных контактов в резонаторе и во внешнем высокочастотном электромагнитном поле. Мы изучили параметрическое усиление в данных системах при двух способах накачки: 1) в качестве излучения накачки используется джозефсоновское излучение; 2) используется дополнительная накачка внешним ВЧ полем, при этом усиление происходит на его гармониках. Нами теоретически изучено влияние параметров резонатора на поглощение (усиление) внешнего высокочастотного излучения контактом Джозефсона и массивом контактов, а также численно найдены области усиления при различных параметрах изучаемой системы.

Численный анализ показал следующие результаты:

1) параметрическое усиление контактом Джозефсона во внешнем монохроматическом ВЧ-излучении и в резонаторе возможно не только на первой ступеньке Шапиро, но и на субгармонических ступеньках, которые появляются на ВАХ-контакта;

2) дополнительное внешнее ВЧ излучение накачки может приводить к усилению не только на ступеньках, где джозефсоновская частота равна частотам внешних переменных сигналов, но и на других ступеньках, что увеличивает область параметрического усиления;

3) последовательно соединенные контакты в одномерном массиве и в резонаторе могут синхронизироваться со временем при малой внешней емкости, что приводит к возрастанию усиления пропорционально числу синхронизированных контактов в массиве;

4) если собственная частота резонатора равна частоте внешнего переменного сигнала, средняя поглощенная мощность в такой системе принимает отрицательные значения на джозефсоновской частоте, т.е. для параметрического усиления резонатор необходимо настроить на гармонику внешнего ВЧ-излучения.

Список литературы

1. **Josephson, B. D.** Possible new effects in superconductive tunneling / B. D. Josephson // *Phys. Lett.* – 1962. – Vol. 1. – P. 251.
2. **Асламазов, Л. Г.** Эффект Джозефсона в точечных сверхпроводящих контактах / Л. Г. Асламазов, А. И. Ларкин // *Письма в Журнал теоретической и экспериментальной физики.* – 1969. – Т. 9. – С. 47.
3. **Лихарев, К. К.** Электродинамические свойства сверхпроводящих точечных контактов / К. К. Лихарев, В. К. Семенов // *Радиотехника и электроника.* – 1971. – Вып. 11. – С. 2167.
4. Об особенностях параметрической регенерации в точечных сверхпроводящих контактах / А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков, Л. С. Кузьмин и др. // *Радиотехника и электроника.* – 1971. – Вып. 15. – С. 896.
5. **Auracher, F.** RF impedance of superconducting weak links / F. Auracher and T. Van Duzer // *J. Appl. Phys.* – 1973. – Vol. 44, № 2. – P. 848.
6. О параметрическом преобразовании и усилении с использованием сверхпроводящих точечных контактов / А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков, Г. Ф. Лещенко и др. // *Радиотехника и электроника.* – 1970. – Вып. 15. – С. 2404.
7. **Kanter, H.** High-Frequency Response of Josephson Point Contacts / H. Kanter and F. L. Vernon // *J. Appl. Phys.* – 1972. – Vol. 43. – P. 3174.

8. **Kanter, H.** Self-Pumped Josephson Parametric Amplification / H. Kanter and A. H. Silver // *Appl. Phys. Lett.* – 1971. – Vol. 19. – P. 515.
9. **Kanter, H.** A novel parametric negativoresistance effect in Josephson junctions / H. Kanter // *Appl. Phys. Lett.* – 1973. – Vol. 23. – P. 350.
10. Compact tunable sub-terahertz oscillators based on Josephson junctions / Fengbin Song, Franz Muller, Thomas Scheller, Alexei Semenov, Ming He et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 98. – P. 142506.
11. **Tachiki, M.** Emission of terahertz electromagnetic waves from intrinsic Josephson junction arrays embedded in resonance LCR circuits / Masashi Tachiki, Krsto Ivanovic, Kazuo Kadowaki and Tomio Koyama // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83. – P. 014508.
12. **Shapiro, S.** Josephson currents in superconducting tunneling: the effect of microwaves and other observations / S. Shapiro // *Phys. Rev. Lett.* – 1963. – Vol. 11. – P. 80.
13. **Gaafar, Ma. A.** Shapiro and parametric resonances in coupled Josephson junctions / Ma. A. Gaafar, Yu. M. Shukrinov and A. Foda // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2012. – Vol. 393. – P. 012021.
14. **Shukrinov, Yu. M.** Effects of LC shunting on the Shapiro steps features of Josephson junction / Yu. M. Shukrinov, I. R. Rahmonov, K. V. Kulikov and P. Seidel // *EPL.* – 2015. – Vol. 110. – P. 47001.
15. **Darula, M.** Millimetre and sub-mm wavelength radiation sources based on discrete Josephson junction arrays / M. Darula, T. Doderer and S. Beuven // *Supercond. Sci. Technol.* – 1999. – Vol. 12. – P. R1–R25.
16. **Filatrella, G.** High- Q cavity-induced synchronization in oscillator arrays / G. Filatrella, N. F. Pedersen and K. Wiesenfeld // *Phys. Rev. E.* – 2000. – Vol. 61. – P. 2513.
17. The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena / Juan A. Acebron, L. L. Bonilla, Conrad J. Perez Vicente, Felix Ritort, and Renato Spigler // *Rev. Mod. Phys.* – 2005. – Vol. 77. – P. 138.
18. **Jain, A. K.** Mutual phase-locking in Josephson junction arrays / A. K. Jain, K. K. Likharev, J. E. Lukens and J. E. Sauvageau // *Phys. Rep.* – 1984. – Vol. 109. – P. 309.

References

1. Josephson B. D. *Phys. Lett.* 1962, vol. 1, p. 251.
2. Aslamazov L. G., Larkin A. I. *Pis'ma v Zhurnal teoreticheskoy i eksperimental'noy fiziki* [Letters to Journal of theoretical and experimental physics]. 1969, vol. 9, p. 47.
3. Likharev K. K., Semenov V. K. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 1971, iss. 11, p. 2167.
4. Vystavkin A. N., Gubankov V. N., Kuz'min L. S. et al. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 1971, iss. 15, p. 896.
5. Auracher F. and Van Duzer T. *J. Appl. Phys.* 1973, vol. 44, no. 2, p. 848.
6. Vystavkin A. N., Gubankov V. N., Leshchenko G. F. et al. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 1970, iss. 15, p. 2404.
7. Kanter H. and Vernon F. L. *J. Appl. Phys.* 1972, vol. 43, p. 3174.
8. Kanter H. and Silver A. H. *Appl. Phys. Lett.* 1971, vol. 19, p. 515.
9. Kanter H. *Appl. Phys. Lett.* 1973, vol. 23, p. 350.
10. Song Fengbin, Muller Franz, Scheller Thomas, Semenov Alexei, He Ming et al. *Appl. Phys. Lett.* 2011, vol. 98, p. 142506.
11. Tachiki M., Ivanovic Krsto, Kadowaki Kazuo and Koyama Tomio *Phys. Rev. B.* 2011, vol. 83, p. 014508.
12. Shapiro S. *Phys. Rev. Lett.* 1963, vol. 11, p. 80.
13. Gaafar Ma. A., Shukrinov Yu. M. and Foda A. *Journal of Physics: Conference Series.* 2012, vol. 393, p. 012021.

14. Shukrinov Yu. M., Rahmonov I. R., Kulikov K. V. and Seidel P. *EPL*. 2015, vol. 110, p. 47001.
15. Darula M., Doderer T. and Beuven S. *Supercond. Sci. Technol.* 1999, vol. 12, pp. R1–R25.
16. Filatrella G., Pedersen N. F. and Wiesenfeld K. *Phys. Rev. E*. 2000, vol. 61, p. 2513.
17. Acebron Juan A., Bonilla L. L., Perez Vicente Conrad J., Ritort Felix and Spigler Renato *Rev. Mod. Phys.* 2005, vol. 77, p. 138.
18. Jain A. K., Likharev K. K., Lukens J. E. and Sauvageau J. E. *Phys. Rep.* 1984, vol. 109, p. 309.

Позднякова Олеся Дмитриевна

аспирант, Институт физики и химии,
Национальный исследовательский
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: pozdn-olesya@yandex.ru

Pozdnyakova Olesya Dmitrievna

Postgraduate student, Institute of Physics
and Chemistry, National Research Ogarev
Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Шорохов Алексей Владимирович

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра теоретической
физики, Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
имени Н. П. Огарева (Россия,
г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

E-mail: alex.shorokhov@mail.ru

Shorokhov Aleksey Vladimirovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of theoretical physics, National Research
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

УДК 538.945

Позднякова, О. Д.

Параметрическое усиление высокочастотного электромагнитного излучения контактами Джозефсона в резонаторе с собственной джозефсоновской и внешней накачками / О. Д. Позднякова, А. В. Шорохов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 113–125.