

05.4:09

Ширина линии синхронной генерации в цепочках и решетках джозефсоновских переходов с конечным радиусом взаимодействия

© В.К. Корнев, А.В. Арзуманов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию 27 июля 1999 г.

Показано, что сужение линии генерации в синхронных одно- и двумерных многоэлементных джозефсоновских структурах с увеличением числа джозефсоновских элементов имеет место лишь до тех пор, пока размеры системы остаются меньше эффективного радиуса электродинамической связи джозефсоновских элементов.

Введение

Использование синхронных многоэлементных джозефсоновских структур вместо одиночных джозефсоновских элементов представляется весьма перспективным для создания на их основе фазированных генераторов узополосного электромагнитного излучения субмиллиметрового и ближнего инфракрасного диапазонов длин волн [1]. Так, в одномерных цепочках ширина линии синхронной генерации может уменьшаться пропорционально числу джозефсоновских элементов N , а в двумерных структурах — даже по более быстрому закону [2,3]. Недавно были предложены такие типы многоэлементных структур, в которых режим когерентной джозефсоновской генерации устойчив к технологическому разбросу параметров джозефсоновских переходов в достаточно широких пределах (до 40–50%) за счет сильного взаимодействия между всеми джозефсоновскими элементами системы [4–6]. Однако практически все реальные цепи электродинамической связи, призванные обеспечить нелокальный характер взаимодействия между джозефсоновскими элементами, характеризуются конечным радиусом

эффективного взаимодействия джозефсоновских элементов. Поэтому целью данной работы являлось изучение влияния конечного радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов одно- и двумерных системах на зависимость ширины линии синхронной генерации от числа джозефсоновских элементов в таких структурах.

Одномерные цепочки джозефсоновских переходов

Наиболее удобной для изучения влияния конечного радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов на ширину линии когерентной генерации представляется параллельная цепочка, в которой джозефсоновские элементы связаны посредством сверхпроводящих индуктивностей L (рис. 1, *a*). В такой структуре все джозефсоновские переходы имеют всегда одинаковую частоту генерации $\omega = (2e/\hbar)V$, где V — постоянная составляющая напряжения на цепочке. Более того, в отсутствие магнитного поля имеет место синфазная осцилляция напряжения на всех джозефсоновских переходах цепочки. Радиус эффективного взаимодействия джозефсоновских элементов в такой структуре зависит от величины нормированной индуктивности связи $l = (2e/\hbar)I_C L$, где

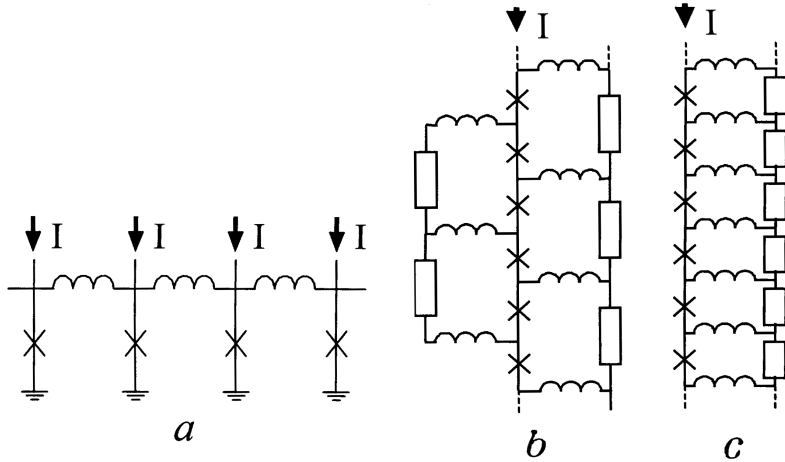


Рис. 1. Цепочки джозефсоновских переходов с различными цепями электродинамической связи.

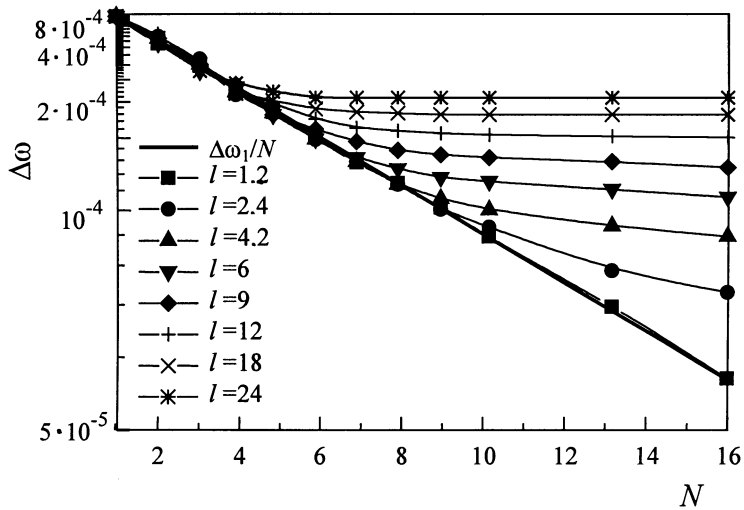


Рис. 2. Зависимость ширины линии джозефсоновской генерации в параллельной цепочке (рис. 1, а) при различных значениях нормированной индуктивности связи l (N — число джозефсоновских элементов).

I_C — критический ток джозефсоновского перехода. Для простоты полагаем, что все джозефсоновские переходы одинаковые и описываются резистивной моделью с емкостью (RCSJ — модель) [7].

На рис. 2 показано семейство графиков, выражающих зависимость ширины линии генерации $\Delta\omega$ от числа джозефсоновских элементов N в цепочке при различных значениях индуктивности l . Для облегчения анализа использован логарифмический масштаб по оси частот и линейный — по оси абсцисс, так что зависимость $\Delta\omega \propto 1/N$ изображается здесь прямой линией. Видно, что при малом числе джозефсоновских элементов N ширина линии генерации уменьшается пропорционально N . В то же время при дальнейшем увеличении числа N имеет место эффект "насыщения" в сужении линии генерации. Это насыщение связано с достижением размерами цепочки величины радиуса эффективного взаимодействия джозефсоновских элементов в такой структуре. При дальнейшем увеличении числа джозефсоновских элементов ширина линии остается практически без изменения. Известно, что в практиче-

ских устройствах трудно обеспечить значение параметра l существенно меньше 1, поэтому вряд ли реально получить сужение линии генерации в таких структурах более чем в 100 раз.

На рис. 1 показаны также две цепочки последовательно включенных джозефсоновских элементов (b и c) с различными цепями электродинамической связи, динамика которых недавно анализировалась в работах [3,4,6]. В первой из этих цепочек (b) джозефсоновские элементы связаны строго попарно, что означает локальный характер электродинамической связи. Именно поэтому сужение линии синхронной генерации здесь наблюдается только в пределах элементарной ячейки ($N = 2$), а при $N > 2$ сужения линии с ростом N не происходит. Этот результат был обнаружен ранее в работе [1] и отмечен в то время как "неожиданный". Во второй цепочке (d) радиус взаимодействия джозефсоновских переходов формально бесконечен, что означает непрерывное уменьшение ширины линии синхронной генерации, пропорциональное числу джозефсоновских элементов N в этой структуре. Однако можно предположить, что в экспериментальной ситуации распределенный характер такой структуры при большом N также приведет к аналогичному эффекту насыщения в сужении линии синхронной генерации.

Двумерная джозефсоновская структура

На рис. 3, *a* показана двумерная структура с элементарной ячейкой в виде четырехконтактного интерферометра. В такой структуре сильное взаимодействие между джозефсоновскими элементами осуществляется за счет движения по ней пространственно-периодического массива одиночных квантов магнитного потока [1,5]. Ранее было установлено также, что в пределах одной элементарной ячейки ширина синхронной генерации уменьшается пропорционально N^2 , т.е. становится в $N_1^2 = 16$ раз уже, чем у одиночного джозефсоновского перехода [3]. В результате проведенных исследований было установлено, что пока размеры структуры не превышают эффективного радиуса электродинамической связи джозефсоновских элементов, спектральная линия синхронной генерации сужается пропорционально числу элементарных ячеек K . При оптимальных значениях параметра Маккамбера $\beta = (2e/\hbar)I_C R_N^2 C \sim 1$ (R_N и C — нормальное сопротивление и емкость джозефсоновского перехода) и индуктивного параметра $l \sim 10$

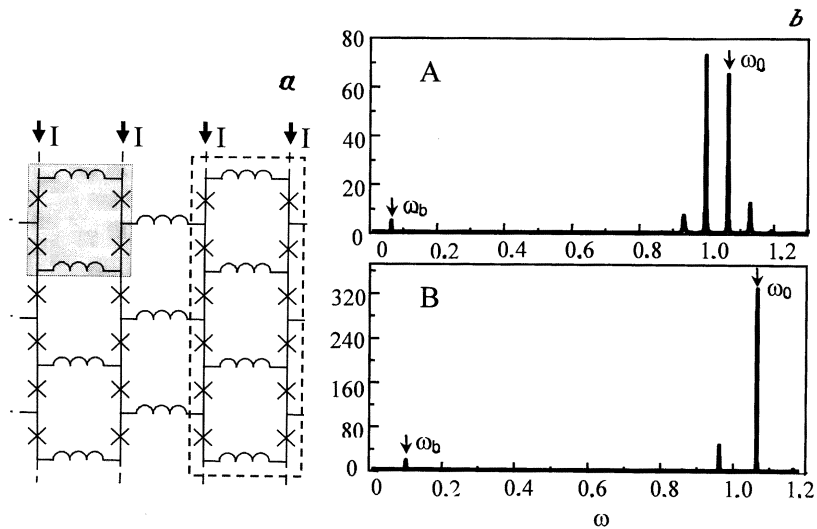


Рис. 3. Решетка джозефсоновских переходов с элементарной ячейкой, представляющей собой четырехконтактный сверхпроводящий интерферометр, и спектры джозефсоновской генерации в такой структуре, когда ее размер превышает эффективный радиус взаимодействия джозефсоновских элементов: *A* — для столбца (выделен штриховой линией) из 5 элементарных ячеек, *B* — для решетки из 3×5 элементарных ячеек; ω_0 — средняя частота джозефсоновской генерации, ω_b — частота биений.

эффективный радиус составляет около 3 элементарных ячеек в каждом измерении. Таким образом, максимально возможное сужение линии генерации в такой структуре составляет примерно $8N_1^2 \sim 100$ раз. В случае, когда размеры двумерной структуры больше, чем радиус эффективного взаимодействия, происходит расщепление спектральной компоненты на несколько близко расположенных компонент (см. спектры на рис. 3, *b*), ширина которых становится даже больше, чем ширина исходной линии до расщепления (см. табл. 1 и 2). При этом динамика системы такова, что мгновенная частота осцилляций периодически переключается с одной спектральной компоненты на другие с некоторой частотой биений ω_b , о чем свидетельствует наличие в

Таблица 1. Ширина линии джозефсоновской генерации в двумерной структуре (рис. 3, *a*) на частоте $\omega/\omega_c = 1$ при $l = 1$, $\beta = 10$, $\gamma \equiv \pi s_i(0) = 2 \cdot 10^{-4}$, где $s_i(0)$ — нормированная спектральная плотность низкочастотных флуктуаций тока $i \equiv I/I_c$

| | Одиночный элемент (J) | 4J-ячейка | 3×2 ячеек | 3×3 ячеек | 3×4 ячеек |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\Delta\omega/\omega_c$ | $1.3 \cdot 10^{-3}$ | $7.5 \cdot 10^{-5}$ | $1.7 \cdot 10^{-5}$ | $2.6 \cdot 10^{-5}$ | $3.4 \cdot 10^{-5}$ |

Таблица 2. Ширина линии джозефсоновской генерации в двумерной структуре из одного вертикального ряда элементарных ячеек (выделен штриховым контуром на рис. 3, *b*) на частоте $\omega/\omega_c = 1$ при $l = 1$, $\beta = 10$, $\gamma \equiv \pi s_i(0) = 2 \cdot 10^{-4}$

| | 2 ячейки | 3 ячейки | 4 ячейки | 5 ячеек |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| $\Delta\omega/\omega_c$ | $3/7 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ (3 линии) | $7.5 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ (5 линий) |

спектре генерации соответствующей частотной компоненты (на частоте ω_b). Возможно, это связано с образованием и движением гипервихрей в таких структурах.

Заключение

Основной вывод данной работы состоит в том, что сужение линии генерации в одно- и двумерных многоэлементных джозефсоновских структурах с увеличением числа джозефсоновских элементов имеет место лишь до тех пор, пока размеры системы остаются меньше радиуса электродинамической связи джозефсоновских элементов. Оценки показывают, что в реальных структурах максимальное сужение линии генерации не может быть более чем в 100 раз. Поэтому для разработки узкополосных генераторов субмиллиметрового диапазона длин волн, на наш взгляд, представляется целесообразным использовать синхронные многоэлементные джозефсоновские структуры с распределенными цепями электродинамической связи для дополнительного уменьшения ширины линии генерации за счет резонансных свойств таких цепей связи [8].

Работа частично финансировалась по Государственной программе "Актуальные направления физики конденсированных сред" (проект № 98051), Федеральной программе "Интеграция" (проект № АО111) и программе Минобразования РФ (проект № 97-8.3-58).

Список литературы

- [1] *Kornev V.K., Arzumanov A.V., Mashtakov A.D., Ovsyannikov G.A.* // IEEE Transaction. on Applied. Superconductivity. 1997. V. 7. N 2. P. 3111-3114.
- [2] *Jain A.K., Likharev K.K., Lukens J.E., Sauvageau J.E.* // Phys. Reports. 1984. V. 109. P. 309-426.
- [3] *Корнев В.К., Арзуманов А.В.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 15. С. 52-59.
- [4] *Маштаков А.Д., Корнев В.К., Овсянников Г.А.* // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 11. С. 1735-1741.
- [5] *Корнев В.К., Маштаков А.Д., Овсянников Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 22. С. 44-48.
- [6] *Арзуманов А.В., Корнев В.К., Овсянников Г.А., Маштаков А.Д.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 15. С. 1-7.
- [7] *Лихарев К.К.* Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [8] *Kornev V.K., Arzumanov A.V.* // Axtended Abstracts, 7th International Superconductive Electronics Conference (ISEC'99). Berkeley, CA USA. June 21-25, 1999. P. 437-439.