

05.4;12

Спектральный аспект возникновения субгармонических ступеней Шапиро в цепочке параллельно включенных джозефсоновских переходов

© А.В. Арзуманов, В.К. Корнев, К.И. Константианян,
Г.А. Овсянников

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

Поступило в Редакцию 27 февраля 1998 г.

Цепочка параллельно включенных джозефсоновских элементов, описываемых резистивной моделью, рассматривается в качестве модели высокотемпературных джозефсоновских переходов. Рассчитанные спектры джозефсоновской генерации позволяют объяснить экспериментально наблюдаемые на вольт-амперной характеристике субгармонические ступени Шапиро, а также их неперIODическую зависимость от внешнего магнитного поля.

Введение

Джозефсоновские переходы на основе высокотемпературных сверхпроводников, для формирования которых используется межзеренная граница двух монокристаллических сверхпроводящих пленок, отличающихся направлением кристаллографических осей, имеют, как правило, вольт-амперную характеристику безгистерезисного типа, близкую к той, которая свойственна джозефсоновским переходам в виде микромостиков. Поэтому для описания таких слабых связей обычно используют так называемую резистивную модель джозефсоновского перехода [1]. Воздействие на джозефсоновский переход внешнего высокочастотного монохроматического сигнала приводит в рамках данной модели к возникновению на вольт-амперной характеристике лишь гармонических ступеней Шапиро в силу специфического характера спектра джозефсоновской

генерации в автономной режиме:

$$V_k \equiv V_k/V_c = 2v/(i+v)^{|k|}, \quad (1)$$

где v_k — нормированное значение амплитуды V_k k -й гармоники напряжения $V(t)$ на джозефсоновском переходе, $V_k \equiv I_c R_n$ — характерное напряжение, I_c — критический ток, R_n — сопротивление в нормальном состоянии, $v = V/V_c$, $i = I/I_c$, I и V — соответственно постоянный ток смещения и постоянная составляющая напряжения. При таком спектре джозефсоновской генерации $V(t)$ спектр обратной ей величины $[V(t)]^{-1}$ содержит только постоянную составляющую и основную гармонику ($k = 1$). Именно это является причиной существования только гармонических ступеней Шапиро, для которых частота джозефсоновской генерации ω в целое число раз n , где $n = 1, 2, 3, \dots$, больше частоты внешнего сигнала [1].

В то же время на экспериментально полученных вольт-амперных характеристиках джозефсоновских переходов на основе высокотемпературных сверхпроводников наблюдаются также большие субгармонические ступени ($n = 1/2, 1/3, \dots$). Существует два подхода к объяснению этих результатов. В одном из них наличие субгармонических ступеней связывается с несинусоидальным характером зависимости сверхпроводящей компоненты тока от джозефсоновской фазы ω [2], при котором нарушается выражение (1) для спектральных компонент джозефсоновской генерации. В другом подходе предлагается использовать в качестве модели такого джозефсоновского перехода цепочку параллельно включенных джозефсоновских элементов, каждый из которых подчиняется резистивной модели [3–7].

Цель настоящей работы заключается в исследовании спектра джозефсоновской генерации для цепочки параллельно включенных джозефсоновских элементов, подчиняющихся резистивной модели, объяснении причин появления субгармонических ступеней Шапиро и зависимости их амплитуды от величины внешнего магнитного поля и амплитуды внешнего высокочастотного сигнала.

Двухконтактная цепочка

Простейшая модель в виде двухконтактной цепочки индуктивно связанных джозефсоновских переходов уже предсказывает появление субгармонических ступеней Шапиро при задании внешнего магнитного

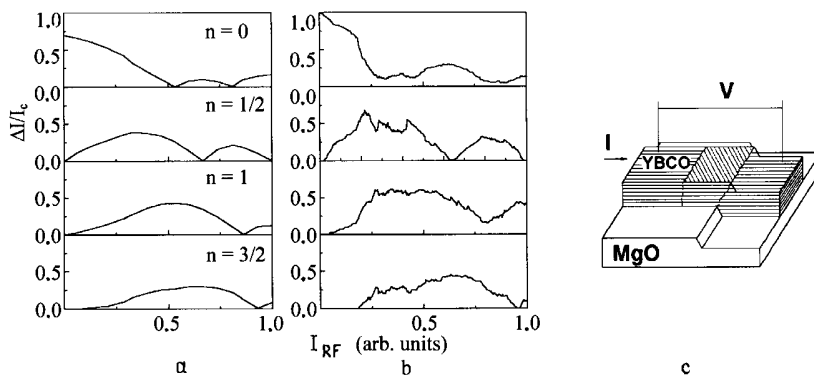


Рис. 1. Зависимости высоты ступенек Шапиро от амплитуды СВЧ воздействия на частоте $\Omega = 1.5\Omega_c$, где характерная джозефсоновская частота $\Omega_c \equiv (2\pi/\Phi_0)I_c R_n$. *a* — численное моделирование для двухконтактной цепочки при $l \equiv 6$ и $\Phi_e = \Phi_0/2$; *b* — экспериментальные результаты для YBCO би-эпитаксиального джозефсоновского перехода; *c* — би-эпитаксиальный джозефсоновский переход. Выделенная область пленки слева от ступеньки развернута по отношению к соседним областям на 45° в кристаллографической плоскости $a-b$, что приводит к формированию джозефсоновского перехода.

поля. Рассчитанные в этом случае зависимости высот ступенек Шапиро от амплитуды СВЧ воздействия при значении безразмерного индуктивного параметра $l \equiv (2\pi/\Phi_0)I_c L = 6$, где Φ_0 — квант магнитного потока, L — индуктивность (рис. 1, *a*), достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным, приведенным на рис. 1, *b* для YBCO биэпитаксиального джозефсоновского перехода, сформированного на подложке из MgO со ступенькой (рис. 1, *c*).

В отсутствие магнитного поля рассматриваемая цепочка эквивалентна одиночному джозефсоновскому переходу с критическим током $2I_c$, так как оба джозефсоновских элемента осциллируют в фазе, а спектр этих осцилляций соответствует выражению (1). Задание внешнего магнитного потока Φ_e через контур ячейки обуславливает разность фаз между осцилляциями джозефсоновских переходов, которая при $\Phi_e = \Phi_0/2$ равна π , что означает, что первые гармоники этих осцилляций будут в противофазе, а вторые гармоники — в фазе. Поэтому из-за взаимодействия между джозефсоновскими элементами спектр

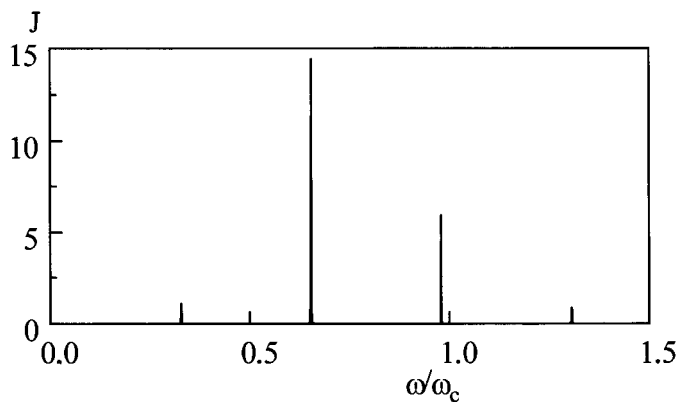


Рис. 2. Спектр джозефсоновской генерации в двухконтактной цепочке при $l \equiv 0.8$ и $\Phi_e = \Phi_0/2$.

джозефсоновских осцилляций в ячейке будет существенно отличаться от спектра (1), в котором амплитуды гармоник монотонно убывают с ростом их номера k , значительно большей амплитудой второй гармоники и малой амплитудой первой гармоники (рис. 2). В этом случае частотный спектр для величины $[V(t)]^{-1}$ кроме первой гармоники содержит также вторую гармоническую компоненту, что и приводит к появлению на вольт-амперной характеристике субгармонических ступеней Шапиро, соответствующих полуполому соотношению между частотами внешнего сигнала и джозефсоновской генерации ($n = 1/2, 3/2, \dots$).

Внешнее СВЧ воздействие в рассматриваемой модели может быть представлено или в виде СВЧ тока, добавленного к постоянному току смещения цепочки, или в виде высокочастотной компоненты магнитного потока, добавленной к постоянному внешнему потоку Φ_e . В последнем случае в цепочке возникает круговой СВЧ ток, соответствующий протеканию через параллельно включенные джозефсоновские элементы высокочастотных токов, осциллирующие в противофазе. Поэтому субгармоническая ступенька в таком случае имеет существенно меньшую высоту и уменьшенный вдвое период зависимости высоты ступеньки от величины внешнего магнитного потока (рис. 3). В нашем эксперименте, как и в большинстве опубликованных экспериментальных исследований, би-эпитаксиальный джозефсоновский переход можно рассматривать как

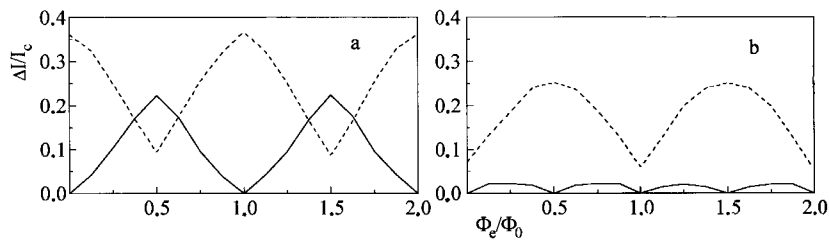


Рис. 3. Зависимости высоты ступенек Шапиро для двухконтактной цепочки при $l \equiv 0.8$ и фиксированной амплитуде СВЧ тока $I_0 = 0.5I_c$ на частоте $\Omega = 0.7\Omega_c$. a — СВЧ ток добавлен к постоянному току смещения цепочки; b — к внешнему магнитному потоку добавлена переменная компонента, обуславливающая круговой СВЧ ток. Сплошная линия соответствует $n = 1/2$, штриховая линия — $n = 1$.

сосредоточенный по сравнению с длиной волны СВЧ воздействия. Поэтому в дальнейших расчетах внешнее СВЧ воздействие задавалось всегда в виде СВЧ тока, добавленного в ток смещения.

В отличие от представленных на рис. 3 зависимостей высот ступенек Шапиро от внешнего магнитного потока, экспериментально получаемые кривые имеют сложную и непериодическую зависимость от магнитного поля [5–7]. Поэтому для объяснения экспериментальных данных была рассмотрена более сложная модель в виде цепочки из трех индуктивно связанных джозефсоновских элементов.

Трехконтактная цепочка

При рассмотрении трехконтактной цепочки в качестве модели высокотемпературного джозефсоновского перехода для приближения к реальной ситуации ток смещения задавался с помощью двух одинаковых источников тока, подключенных к боковым джозефсоновским элементам цепочки J_1 и J_2 . Численное моделирование выявило сильную зависимость динамики цепочки от внешнего магнитного поля. На рис. 4 и 5 показаны зависимости от магнитного потока через внешний контур цепочки соответственно отношения амплитуд двух первых гармоник A_1/A_2 джозефсоновских осцилляций для каждого джозефсоновского элемента и высот первой гармонической и субгармонической ступенек

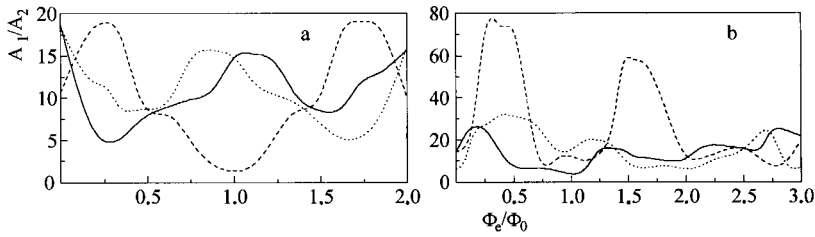


Рис. 4. Зависимости отношения амплитуд двух первых спектральных линий джозефсоновской генерации от магнитного потока Φ_e через внешний контур трехконтактной цепочки при $\Omega = 0.35\Omega_c$ для $l_1 = l_2 = 3$ (a), $l_1 = 2.5$ и $l_2 = 3.5$ (b). Сплошная линия относится к первому джозефсоновскому элементу J_1 , штриховая — к элементу J_2 , пунктирная — к элементу J_3 .

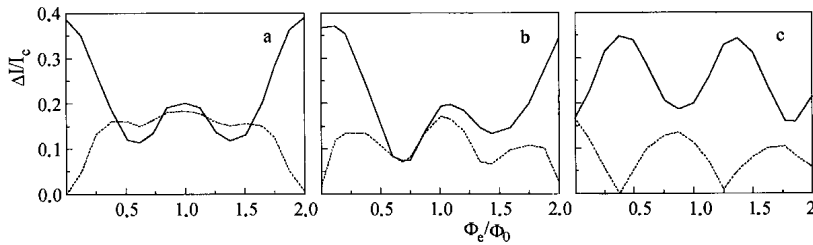


Рис. 5. Зависимости высоты ступенек Шапиро от магнитного потока через внешний контур трехконтактной цепочки при фиксированной амплитуде СВЧ воздействия $I_0 = 0.5I_c$ на частоте $\Omega = 0.7\Omega_c$ для $l_1 = l_2 = 3$ (a), $l_1 = 2.5$ и $l_2 = 3.5$ (b), $l_1 = 0.9$ и $l_2 = 5.1$ (c). Сплошная линия соответствует первой гармонической ступеньке Шапиро ($n = 1$), пунктирная линия — субгармонической ступеньке ($n = 1/2$).

Шапиро при фиксированных токе смещения и индуктивности внешнего контура $l \equiv l_1 + l_2 = 6$ для различных соотношений плеч l_1 и l_2 индуктивной связи элементов цепочки. В случае симметричной цепочки ($l_1 = l_2$) указанные зависимости периодичны с периодом $2\Phi_0$, который соответствует потоку Φ_0 через каждый из двух внутренних контуров

цепочки. В случае несимметричной цепочки ($l_1 \neq l_2$) эти зависимости не периодичны. При сильной асимметрии, когда, например, $l_1 \ll l_2$, появляется квазипериод $\Delta\Phi = \Phi_0$. В этом случае полный контур цепочки в основном совпадает с одним из внутренних контуров, и таким образом трехконтурная цепочка вырождается в двухконтурную.

Заключение

Таким образом, можно резюмировать, что цепочка параллельно включенных и индуктивно связанных джозефсоновских элементов, подчиняющихся простейшей резистивной модели, может служить достаточно адекватной моделью джозефсоновского перехода, сформированного на основе межзеренной границы двух монокристаллических пленок из высокотемпературных сверхпроводников. При этом показано, что появление субгармонических ступеней Шапиро в присутствии магнитного поля связано с принципиальным изменением спектра джозефсоновской генерации цепочки по сравнению со спектром генерации одиночного джозефсоновского элемента в рамках резистивной модели.

Полученные результаты позволяют сделать также вывод, что наблюдаемая в экспериментальных исследованиях сложная непериодическая зависимость высоты ступенек Шапиро от магнитного поля означает существование внутри высокотемпературного джозефсоновского перехода нескольких сверхпроводящих контуров со сравнимыми по величине индуктивностями. В тех же случаях, когда прослеживается квазипериодическая зависимость, джозефсоновский переход содержит внутри себя один основной контур, индуктивность которого много больше, чем индуктивности других существующих контуров.

Работа частично финансировалась по Государственной программе "Актуальные направления физики конденсированных сред" (проект № 98051) и Учебно-научному центру "Интеграция" (проект № 461).

Список литературы

- [1] Лихарев К.К. // Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [2] Lee K., Iguchi I. // Proceedings of 5th Int. Supercond. Electronics Conference (ISEC'95). Japan. 1995. P. 69–71.

- [3] *Kautz R.L., Benz S.P., Reintsema C.D.* // J. Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 1445–1447.
- [4] *Ku I.C., Cho H.M., Wang S.W.* // Physica C. 1995. V. 243. P. 187–190.
- [5] *Early E.A., Sheiner R.L., Klark A.F., Char K.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 9409–9418.
- [6] *Terpstra D., Ijssesteijn R.P.J., Rogalla H.* // J. Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 2286–2288.
- [7] *Constantinian K.Y., Ovsyannikov G.A.* et al. // Physica C. 1996. V. 273. P. 21–29.