

- [1] Бессолов В.Н., Кукушкин С.А., Лебедев М.В., Царенков Б.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 8. С. 1507.
- [2] Сакало Т.В., Кукушкин С.А. // ЖТФ. 1990. Т. 10. Вып. 7. С. 78.
- [3] Сакало Т.В., Кукушкин С.А. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 10. С. 95.
- [4] Чернов А.А. // УФН. 1961. Т. 73. № 2. С. 277.
- [5] Современная кристаллография. Т. 3. М: Наука, 1980. 407 с.
- [6] Лозовский В.Н. Зонная плавка с градиентом температуры. М.: Металлургия, 1972. 230 с.
- [7] Демин В.Н., Кузнецов Ф.А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 934.
- [8] Демин В.Н., Нарожняя О.В., Кузнецов Ф.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 5. С. 142.
- [9] Bryskiewicz T. // J. Cryst. Growth. 1978. Vol. 43. P. 101.
- [10] Hall R.N. // J. Electrochem. Soc. 1963. Vol. 110. P. 385.
- [11] Rode D.L. // J. Cryst. Growth. 1973. Vol. 20. P. 13.

09;12  
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 5, 1995

## БЫСТРЫЙ ВЫВОД СВЧ ЭНЕРГИИ ИЗ РЕЗОНАТОРА

*В.И.Иванников, Ю.Д.Черноусов, И.В.Шеболаев*

Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия  
(Поступило в Редакцию 12 октября 1994 г.)

В ряде приложений, например в технике импульсной ЭПР спектроскопии для реализации метода электронного спинового эха [1], в устройствах формирования мощных СВЧ импульсов [2], необходимо обеспечить быстрый вывод запасенной СВЧ энергии из высокодобротного резонатора. Возможным решением задачи быстрого вывода энергии является обеспечение управляемой связи с линией, что достигается быстрым изменением либо конфигурации связи [3,4], либо типа колебаний [5]. Прямая реализация таких методов затруднена при необходимости сохранения добротности резонатора и (или) структуры поля в нем. В [6] предложен метод быстрого вывода запасенной энергии из одного резонатора в другой изменением частоты одного из них. В [7] рассмотрено использование проходного резонатора для повышения эффективности ввода СВЧ энергии в ускоряющий резонатор.

В настоящей работе показано, что быстрый вывод запасенной СВЧ энергии из высокодобротного резонатора можно осуществить через дополнительный проходной резонатор с импульсно регулируемой связью с линией. Высокая скорость вывода обусловлена тем, что поток СВЧ энергии из основного резонатора в дополнительный через отверстие связи определяется полями как основного, так и дополнительного резонаторов.

Рассмотрим двухрезонаторную систему в виде закороченного на концах отрезка прямоугольного волновода (рис. 1), разделенного диафрагмой связи  $\lambda$  на два полуволновых резонатора: основной 1 и дополнительный 2 с собственными добротностями  $Q_1$ ,  $Q_2$  и одинаковой

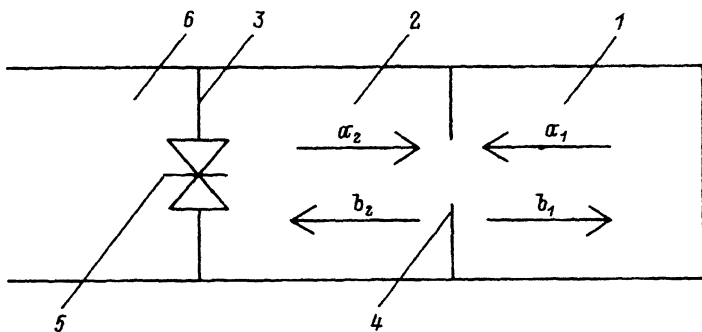


Рис. 1.

резонансной частотой  $\omega$ . Дополнительный резонатор 2 образован диафрагмой 4 и СВЧ коммутатором — плоским фланцем 3 с резонансной щелью, в центре которой расположены  $P-I-N$ -диоды 5 [8]. СВЧ коммутатор может находиться в двух состояниях: открытом — при подаче на диоды обратного напряжения и закрытом — при подаче прямого тока. При открытом коммутаторе основной резонатор 1 связан с линией 6, при этом в нем запасена энергия  $W_0$ , при закрытом образуется дополнительный резонатор 2.

Пусть при  $t = 0$  коммутатор закрывается. В результате образуется дополнительный резонатор 2 и в нем через диафрагму связи 4 будут возбуждаться электромагнитные колебания. В каждом резонаторе в соответствии с представлениями о падающих и отраженных волнах [9] распространяются две встречные волны: в основном —  $a_1, b_1$  и в дополнительном —  $a_2, b_2$  (рис. 1). Амплитуды волн  $a_1, a_2$  определяются величинами запасенной энергии в резонаторах  $W_1, W_2$ :  $a_1 = (\omega W_1/\pi)^{1/2}$ ,  $a_2 = (\omega W_2/\pi)^{1/2}$ . Волна  $b_1$  складывается из волны  $\Gamma a_1$ , отраженной от диафрагмы, и противофазной ей волны  $b_{R1}$ , излученной из дополнительного резонатора в основной; волна  $b_2$  складывается из волны  $\Gamma a_2$ , отраженной от диафрагмы, и находящейся с ней в фазе волны  $b_{R2}$ , излученной из основного резонатора в дополнительный,

$$b_1 = \Gamma a_1 + b_{R1}, \quad b_2 = \Gamma a_2 - b_{R2}, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  — коэффициент отражения для диафрагмы в регулярной линии.

Для величин запасенной энергии в резонаторах  $W_1, W_2$  можно записать уравнения

$$dW_1/dt = -P_1 - P_{12}, \quad dW_2/dt = -P_2 + P_{12}, \quad (2)$$

где  $P_1 = \omega W_1/Q_1$ ,  $P_2 = \omega W_2/Q_2$  — мощности потерь в резонаторах;  $P_{12} = a_1^2/2 - b_1^2/2$  — мощность, обусловленная излучением волны из основного резонатора в дополнительный.

Излученные волны:  $b_{R1} = (1 - \Gamma^2)^{1/2} a_2$ ;  $b_{R2} = (1 - \Gamma^2)^{1/2} a_1$ . Подставляя приведенные соотношения в (1), (2) и решая полученные уравнения, при  $k > k^* = \pi(\tau_1 - \tau_2)^2/8Q_1\tau_2^2$  (при  $k < k^*$  решение носит чисто экспоненциальный характер) получим

$$W_1 = W_0 \exp(-t/\tau^*) \cos^2(\Omega t); \quad W_2 = W_0 \exp(-t/\tau^*) \sin^2(\Omega t). \quad (3)$$

Здесь  $\Omega = \{kQ_1/2\pi\tau_1^2 - (\tau_1 - \tau_2)^2/16(\tau_1\tau_2)^2\}^{1/2}$ ;  $\tau_1 = Q_1/\omega$ ;  $\tau_2 = Q_2/\omega$ ;  $\tau^* = 2\tau_1\tau_2/(\tau_1 + \tau_2)$ ;  $k = (1 - \Gamma^2)Q_1/2\pi$  — коэффициент связи основного

резонатора с линией при полностью открытом дополнительном резонаторе. Практически важным является случай  $k \approx 1$  ( $\Gamma \approx -1$ ), поэтому при выводе принято  $a_1^2/2 - b_1^2/2 \approx a_1 a_2 (1 - \Gamma^2)^{1/2} = a_1 a_2 (2k\pi/Q_1)^{1/2}$ .

При  $t = (2n + 1)\tau$  ( $n = 0, 1, \dots$ ) запасенная энергия сосредоточена в дополнительном резонаторе,  $W_1 = 0$ . Если в этот момент времени "открыть" дополнительный резонатор, то вся запасенная энергия из системы уходит в подводящую линию. Здесь  $\tau = \pi/2\Omega$  — минимальное время полного вывода запасенной энергии из основного резонатора в дополнительный. КПД вывода  $\eta = W_2/W_0$  при  $t = \tau$  определяется соотношением

$$\eta = \exp(-\pi/2\Omega\tau^*). \quad (4)$$

В широком диапазоне изменения величины  $Q_1/Q_2$  КПД вывода меняется незначительно. Так, при  $k \approx 1$ ,  $Q_1 = 10^4$  и изменении  $Q_1/Q_2$  от 1 до 10 значение  $\eta$  изменяется от 0.98 до 0.82; при  $Q_1 = 10^5$  — соответственно от 0.99 до 0.94. Для достижения высокого КПД необходимо использовать возможно более высокие и близкие значения  $Q_1, Q_2$ .

Относительно просто достижимо выполнение условия  $k \gg k^*$ . В этом случае время вывода  $\tau$  может быть приблизительно выражено через параметры только одного из резонаторов, например основного. При этом  $\tau \ll \tau_1$

$$\tau = (\pi)^{3/2} \tau_1 / (2kQ_1)^{1/2}. \quad (5)$$

Экспериментально колебательный режим, определяемый уравнениями (3), проверялся на макете (рис. 1) в десятисантиметровом диапазоне длин волн. При  $t < 0$  на диоды СВЧ коммутатора 3 подавалось обратное напряжение, при  $t \geq 0$  — прямой ток. На рис. 2 приведена зависимость запасенной энергии от времени в основном (кривая 1) и в дополнительном (кривая 2) резонаторах в этом режиме. Длительность

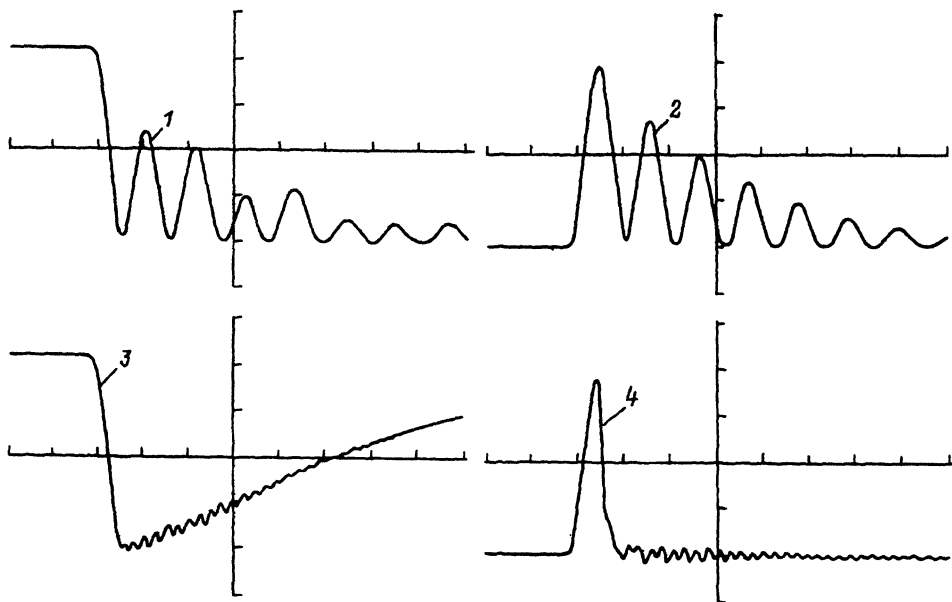


Рис. 2. Зависимость запасенной энергии от времени в основном (1, 3) и дополнительном (2, 4) резонаторах.

развертки осциллографа составляет 50 нс/дел. Колебательный режим обмена энергией между резонаторами продолжается до полного затухания. При подаче на диоды импульса обратного напряжения через время  $t = \tau$  после включения прямого тока дополнительный резонатор открывается и запасенная энергия в системе становится равной нулю. Зависимость запасенной энергии в основном и дополнительном резонаторах от времени в этом случае представлена соответственно кривыми 3, 4. Для измерений использовался СВЧ генератор, работающий в непрерывном режиме, поэтому на кривой 3 после быстрого вывода энергии из основного резонатора (крутой спад) прослеживается медленное запасение энергии в нем (пологий подъем). Измеренные параметры макета:  $Q_1 \approx 7500$ ,  $Q_2 \approx 1000$ ,  $k \approx 0.9$ ,  $\tau \approx 25$  нс. Использовались  $P-I-N$ -диоды КА-509. Добротность дополнительного резонатора меньше добротности основного из-за потерь в СВЧ коммутаторе.

Приведенные расчеты и экспериментальные результаты показывают, что в системе, состоящей из двух связанных резонаторов, при определенных условиях реализуется колебательный режим обмена энергией между резонаторами. Такой режим позволяет осуществить быстрый последовательный вывод запасенной энергии из высокодобротного резонатора без изменения его добротности, конфигурации связи и типа колебаний. Последовательная схема вывода может быть элементом устройств формирования мощных СВЧ импульсов. Предельный уровень запасенной энергии будет определяться пробойной прочностью СВЧ коммутатора в момент вывода энергии из дополнительного резонатора. При использовании быстродействующих серийных  $P-I-N$ -диодов этот уровень не превысит, по-видимому, величины  $10^{-3}$  Дж. За счет применения газоразрядных и электронных СВЧ коммутаторов возможно доведение величины запасенной энергии до уровня в десятки джоулей [2].

Схема также может быть использована для создания электрических полей высокой напряженности (и соответственно для ускорения заряженных частиц) в дополнительном резонаторе. Поскольку вся запасенная энергия основного более высокодобротного резонатора переходит в дополнительный, то напряженность поля в нем оказывается больше, чем при обычном оконечном включении ускоряющего резонатора. Коэффициент увеличения напряженности поля  $\beta$  определяется соотношением  $\beta = (\eta Q_1/Q_2)^{1/2}$ . Например, при  $k \approx 1$ ,  $Q_1 = 10^5$ ,  $Q_2 = 10^4$   $\beta \approx 3$ .

#### Список литературы

- [1] Салихов К.М., Семенов А.Г., Цветков Ю.Д. Электронное спиновое эхо и его применение. Новосибирск: Наука, 1976. 342 с.
- [2] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [3] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2465-2467.
- [4] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 8. С. 128-146.
- [5] Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 24. С. 1529-1533.
- [6] Yen H.C., Dick G.J., Mersereau J.E. // IEEE Trans. Magn. 1977. Vol. MAG-13. N 1. P. 504-507.
- [7] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 4. С. 723-725.
- [8] Дзедцер Г.Б., Орлов О.С.  $PI-N$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. М.: Сов. радио, 1970. 200 с.
- [9] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.