

13

Вывод СВЧ-энергии из резонатора через сверхразмерный интерференционный переключатель

© В.А. Августинович, С.Н. Артёменко, А.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Физико-технический институт, Томск
E-mail: snartemenko@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2012 г.

Представлены результаты исследования интерференционного переключателя на основе H -тройника из сверхразмерного прямоугольного волновода. Оценены условия эффективной работы переключателя в качестве устройства вывода энергии. На макете СВЧ-компрессора 3-см диапазона длин волн с резонатором из волновода сечением $72 \times 34 \text{ mm}^2$ и переключателем из волновода сечением $58 \times 25 \text{ mm}^2$ получены импульсы СВЧ мощностью 2.8 MW с усилением 17.5 dB и длительностью 3.5 ns. Обоснована возможность получения импульсов мощностью $\sim 0.1 \text{ GW}$ в 3-см диапазоне длин волн и $\sim 1 \text{ GW}$ в 10-см диапазоне.

Одним из способов повышения импульсной мощности СВЧ-излучения является резонансная компрессия СВЧ-импульсов, основанная на накоплении энергии импульса в резонансном объеме и быстром ее выводе в нагрузку [1]. Использование в способе сверхразмерных объемов может позволить формировать СВЧ-импульсы мощностью, в ряде случаев сопоставимой с мощностью импульсов релятивистских СВЧ-генераторов и усилителей. Однако создание таких систем сдерживается отсутствием подходящих устройств вывода. Сложность проблемы заключается в противоречивости предъявляемых к устройству требований. Устройство должно сохранять высокую добротность резонатора в режиме накопления, а в режиме вывода быстро открывать его, обеспечивая вывод за время, сравнимое с временем T двойного пробега рабочей волны вдоль резонатора. Достижение гармоничного сочетания этих требований в резонаторе с большим объемом представляет собой сложную техническую задачу.

Одним из возможных путей решения проблемы может быть развитие систем со сверхразмерными интерференционными переключателями. Такие системы впервые рассмотрены в [2], где в качестве устройства вывода из крупных осесимметричных резонаторов предложено использовать переключатель на основе сверхразмерной коаксиальной линии. В данной работе исследован интерференционный переключатель на основе H -тройника из сверхразмерного прямоугольного волновода с H_{01} рабочей волной, сохраняющий качества одномодового аналога, не требующий специального преобразования рабочей волны в основную волну прямоугольного волновода и позволяющийкратно повысить мощность формируемых импульсов.

В рассматриваемой проблеме кроме обычных требований к сверхразмерным СВЧ-устройствам [3,4] принципиальными являются требования, выполнение которых обеспечивает эффективную работу переключателя. Так, для переключения системы в режим вывода, фаза волны, отраженной от тройника, должна быстро, по сравнению с временем T , быть изменена на 180° . Это возможно в двух случаях — при изменении длины согласованного плеча на четверть длины волны λ_w в волноводе [1] либо при изменении резонансной частоты f плеча как сильно связанного резонатора за пределы полосы пропускания резонанса на величину $\delta f \approx n f / Q_{arm}$, где $n \geq 3$, Q_{arm} — добротность плеча [5].

Изменение длины плеча на $\lambda_w/4$ в сверхразмерном волноводе возможно, но за относительно продолжительное время. Это обусловлено большим разрядным промежутком и соответственно относительно медленным развитием разряда.

Более эффективным является второй случай. Если со стороны бокового плеча тройник не согласован, то плечо представляет собой сильно связанный резонатор. Для эффективного переключения в режим вывода объем этого резонатора должен быть меньше предельного, определяемого соотношением между временем изменения параметров объема при переключении и временем пробега T . Оценим этот объем.

В [4] показано, что изменение частоты резонатора объемом V при введении в объем проводника длиной l и радиусом r в электрическое поле E_{01} определяется формулой:

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{l^3 z_0 E_{01}^2}{360V \lg\left(\frac{2l}{r}\right)}, \quad (1)$$

где $z_0 = 377 \Omega$. Используя (1) и условие $\delta f \approx nf/Q_{arm}$, можно оценить допустимый объем плеча. Он ограничен требованием образования плазменного канала, достаточного для сдвига резонансной частоты плеча за требуемое время. Так как для эффективного вывода время переключения должно быть заметно меньше T , порядка $0.1T \sim 1 \text{ ns}$, то за такое время частота плеча должна сместиться за пределы полосы пропускания резонанса. Отсюда получаем оценочную величину предельного объема плеча или предельного размера сверхразмерной стенки при заданной длине плеча $L_{arm} \approx 2\lambda_w$ и второй стенки волновода $a \approx \lambda_w/2$:

$$b_{\max} < \frac{z_0 Q_{arm} l^3}{90na L_{arm} \lg\left(\frac{2l}{r}\right)} = \frac{z_0 Q_{arm} (0.2Lv_{pl}/v_g)^3}{90na L_{arm} \lg\left(\frac{0.4Lv_{pl}/v_g}{r}\right)}, \quad (2)$$

где v_g , v_{pl} — групповая скорость волны и скорость распространения плазмы, $L = Tv_g/2$. Как видно из (2), чем выше добротность и скорость плазмы, тем больше предельный размер стенки. Кроме того, из (3) следует, что размер пропорционален $f^{1.5}$. Это означает, что наиболее эффективными такие переключатели могут быть в коротковолновой части диапазона СВЧ, где при заданном T относительное увеличение стенки больше.

Экспериментальные исследования выполнены в 3-см диапазоне длин волн на тройнике из волновода сечением $58 \times 25 \text{ mm}^2$. В продольном сечении такой тройник идентичен одномодовому тройнику. Поэтому при правильной геометрии и „чистой“ H_{01} -волне переключатель на основе такого тройника должен работать идентично обычному переключателю, поскольку физические причины, препятствующие этому, отсутствуют. Это подтверждено экспериментально при измерении переходного ослабления переключателя в режиме „закрыто“. В полосе частот 8800–9500 МГц ослабление составило $41 \pm 2 \text{ dB}$, что практически равно ослаблению обычного тройника.

Подтверждено и свойство практически полного открывания тройника с H_{01} -волной при незначительном изменении параметров короткозамкнутого плеча. Такой результат получен при работе тройника в качестве устройства вывода энергии. Схема установки, на которой были проведены эксперименты по выводу энергии, представлена на рис. 1. Здесь 1 — СВЧ-генератор, 2 — циркулятор, 3 — направленные ответвители, 4 — согласованная нагрузка, 5 — резонатор, 6 — плавный

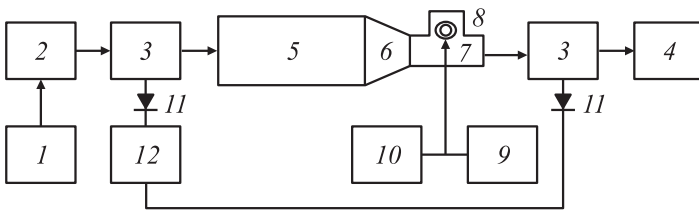


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

переход, 7 — сверхразмерный интерференционный переключатель, 8 — СВЧ-коммутатор, 9 — генератор высоковольтных импульсов, 10 — лазер, 11 — детекторы, 12 — осциллограф.

Энергия накапливалась в резонаторе из волновода сечением $72 \times 34 \text{ mm}^2$, длиной $\sim 36 \text{ cm}$. Резонатор работал на виде колебаний $H_{01(19)}$, на частоте $\sim 8950 \text{ MHz}$. Его возбуждение осуществлялось через окно, расположенное на середине торцевой стенки резонатора. Через плавный переход резонатор сопрягался с переключателем. Вся система, включая боковое плечо тройника, работала на виде колебаний $H_{01(29)}$.

Ослабление переключателя в режиме „закрыто“ чувствительно к локальному спектру колебаний и изменениям формы резонатора. Поэтому добротность резонатора зависела от настройки и геометрии входного окна. Процедура настройки сводилась к варьированию формы окна и длины резонатора и такому их выбору, при котором добротность максимальна. Достигнутая добротность составила $2.3 \cdot 10^4$, что на 30% ниже добротности резонатора с короткозамыкателем вместо тройника. Однако это отличие не связано с потерями на излучение, так как замыкание выхода переключателя на добротность не влияло. Вероятной причиной понижения добротности являются потери в тройнике.

Расчетное время двойного пробега волны вдоль системы составляло 4 ns. При отмеченных значениях добротности, времени пробега и рабочей частоты расчетный коэффициент усиления близок к 20 dB. В экспериментах получено усиление $\sim 17.5 \text{ dB}$ при длительности импульсов 3.5 ns по уровню -3 dB . В качестве источника входных импульсов использовался импульсный магнетрон мощностью 50 kW. Поэтому мощность выходных импульсов достигала $\sim 2.8 \text{ MW}$. Пере-

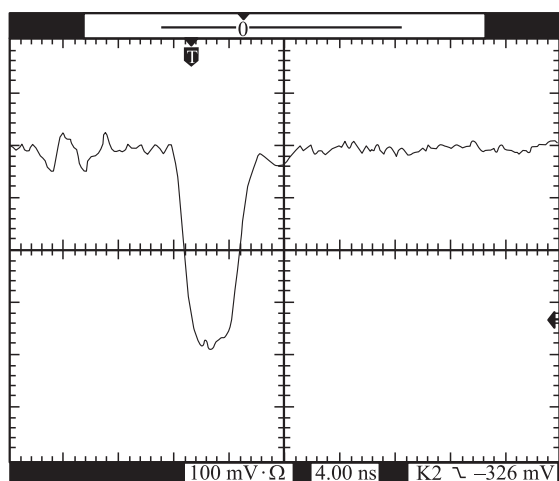


Рис. 2. Огибающая выходного СВЧ-импульса.

ключение инициировалось подсветкой разрядного промежутка искрой электрического разряда или лучом азотного лазера. Разряд зажигался в аргоне при атмосферном давлении в объеме волновода либо в кварцевой трубке, расположенной в максимуме электрического поля параллельно силовым линиям. Типичная осциллограмма выходного импульса приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, вывод идет за время двойного пробега волны вдоль резонатора, т. е. идентично выводу из одномодового резонатора через переключатель на основе обычного тройника.

Таким образом, в работе показана возможность использования интерференционного переключателя на основе H -тройника из сверхразмерного прямоугольного волновода в качестве эффективного устройства вывода энергии из сверхразмерного резонатора. По оценкам, при достижимой плотности потока мощности в волноводе $5\text{--}10\text{ MW/cm}^2$, в 3-см диапазоне длин волн переключатель может позволить формировать наносекундные СВЧ-импульсы мощностью $\sim 0.1\text{ GW}$. В 10-см диапазоне длин волн переключатель может обеспечить формирование таких же импульсов мощностью $\sim 1\text{ GW}$.

Достоинством переключателя является сохранение в качестве рабочей волны основной волны прямоугольного волновода. Наиболее эффективным использование переключателя может быть в коротковолновой части диапазона СВЧ.

Авторы благодарны Ю.Г. Юшкову за полезные дискуссии и В.Ф. Дьяченко, а также В.И. Запрягаевой за помощь при выполнении работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“ Минобрнауки РФ № 0.3.2012.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Артёменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. // ЖТФ. 1993. Т. 63. В. 7. С. 107–112.
- [3] Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 475 с.
- [4] Штейншлейгер В.Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 114 с.
- [5] Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 20. С. 6–11.