

## **МИКРОВОЛНОВЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО ТРОЙНИКА ДЛЯ КОМПРЕССИОННОГО РЕЗОНАТОРНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСОВ**

### **Введение**

Реализация формирователей импульсов на основе резонаторных накопителей предполагает решение ряда задач, связанных с обеспечением быстрого переключения СВЧ энергии из высокочастотного резонаторного накопителя в нагрузку, работой линий передачи при больших значениях амплитуд выходного сигнала, согласованием высокостабильного генератора накачки в процессе накопления и излучения СВЧ энергии и других [1 – 3].

Отмеченные вопросы рассмотрены в работах [1, 2], однако проблема обеспечения быстрого и с малыми вносимыми потерями переключения СВЧ энергии из резонаторного накопителя в нагрузку остается важнейшей. Для ее решения предлагаются различные способы:

быстрая перестройка частоты накопителя под частоту настройки внешнего выходного устройства, изменение вида колебаний в резонаторном накопителе, использование коммутирующих устройств интерференционного типа на основе волноводных тройников.

Последний способ наиболее проработан в экспериментальном плане. Энергия из резонатора выводится за счет быстрого изменения связи с выходной нагрузкой. Для этого используется волноводный тройник, к симметричным плечам которого подключаются резонатор и короткозамыкатель с плазменным или электронным разрядником перед ним на расстоянии  $n\lambda_B/4$ , где  $n = 1, 3, 5, \dots$ , а к третьему плечу – нагрузка. При выключенном разряднике энергия в третье плечо не ответвляется и резонатор совместно с частью тройника и разрядником функционирует как накопитель энергии. Включение разрядника (или эквивалентного ему короткозамыкателя) приводит к перемещению плоскости короткого замыкания к месту его расположения, за счет этого появляется сильная связь с нагрузкой через третье плечо. На резонансной рабочей частоте такой переключатель может обеспечивать развязку до 30 – 40 дБ.

В то же время характеристики переключателя на основе волноводного тройника будут в значительной степени зависеть от соответствия геометрии и места расположения управляемого элемента тройникового переключателя рабочей длине волны управляемого сигнала.

Цель работы – исследование изменения передаточной функции переключателя на основе волноводного тройника от формы и местоположения короткозамыкающего элемента.

### **Основная часть**

Анализ процессов в устройстве на основе волноводного ( $23 \times 10$  мм) тройника в плоскости Н проводился с помощью методов математического моделирования для трех режимов работы:

1 – накопление энергии в тройнике и подсоединенном к нему волноводе при размещении короткозамыкающей заглушки на расстоянии, кратном  $\lambda_B/2$ , от оси симметрии тройника;

2 – передача энергии в нагрузку при размещении короткозамыкающей заглушки на расстоянии, кратном  $n\lambda_B/4$  (где  $n = 3, 5$ );

3 – передача энергии в нагрузку при замыкании проводящим цилиндрическим проводником (эквивалентом разрядника) на расстоянии  $3\lambda_B/4$  при наличии короткозамыкающей заглушки на расстоянии  $\lambda_B$ .

Структура поля в накопительном режиме приведена на рис. 1. Графики изменения коэффициента передачи  $S_{21}$  от частоты при расположении замыкающих заглушек на расстояниях  $\lambda_B/2$ ,  $\lambda_B$  и  $3\lambda_B/2$  приведены на рис. 2.

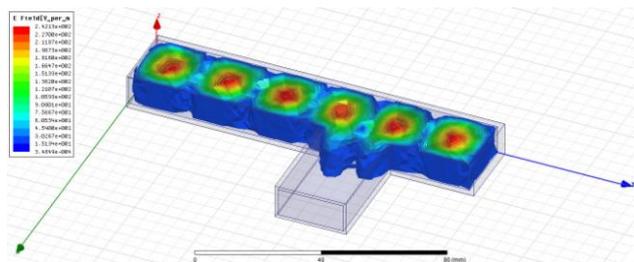


Рис. 1. Структура поля в накопительном режиме

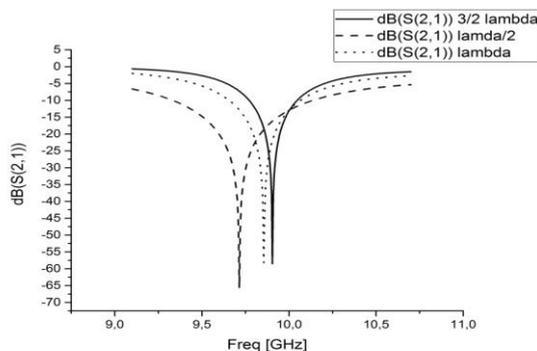


Рис. 2. Зависимости  $S_{21}$  от частоты при размещении замыкающих заглушек на расстояниях кратных  $\lambda_B/2$

Графики на рис. 2 показывают, что развязка с плечом тройника, подсоединенном к нагрузке, может достигать величины  $\sim 65$  дБ. Однако следует отметить, что условие достаточно высокого уровня развязки выполняется в узкой полосе частот. Оценки, проведенные с помощью графиков (рис. 2), показывают, что изменение частоты всего на 5 МГц может привести к ухудшению развязки на 20 дБ. Учет этого фактора приводит к следующим требованиям: точность установки замыкающей перемычки должна составлять порядка 10 – 20 мкм, нестабильность генератора накачки – не хуже  $10^{-4}$ , добротность накопительного резонатора, включающего также и элементы тройникового переключателя – не хуже  $10^4$ .

Смещение экстремумов на графиках (рис. 2) при изменении расстояния размещения замыкающих нагрузок, скорее всего, связано с тем, что длина входного плеча, являющегося частью резонансной структуры, не выбиралась кратной целому числу полуволн и условие резонанса (соответственно, пространственное расположение стоячих волн) меняется при изменении общей длины.

При размещении замыкающей нагрузки на расстоянии от оси симметрии тройника, равном  $n\lambda_B/4$  (где  $n = 3, 5$ ), происходит передача энергии из тройника и связанного с ним волновода в нагрузку (рис. 3, 4).

Из графиков (рис. 4) видно, что в режиме передачи энергии в нагрузку коэффициент передачи не меняется в широком диапазоне частот, практически равном рабочему диапазону частот используемого прямоугольного волновода. При размещении замыкающей нагрузки на минимальном расстоянии ( $3\lambda_B/4$ ) диапазон рабочих частот шире, чем в случае расстояния  $5\lambda_B/4$ .

Обеспечение широкой рабочей полосы частот при передаче энергии в нагрузку необходимо учитывать при реализации такого устройства, поскольку накачка энергии в резонатор-накопитель осуществляется узкополосным сигналом (непрерывным на фиксированной частоте или длинноимпульсным с высокочастотным заполнением), а

генерируемые импульсы могут иметь наносекундную длительность и, соответственно, широкий спектр, который может быть обрезан вследствие ограниченной полосы рабочих частот.

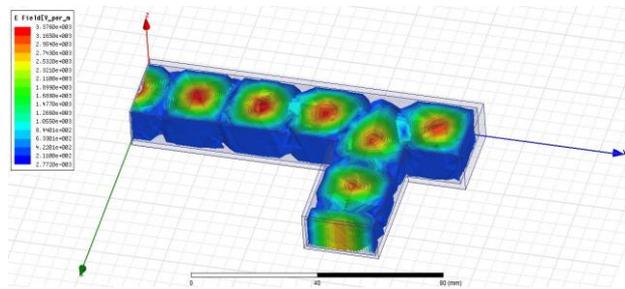


Рис. 3. Структура поля в режиме передачи энергии в нагрузку

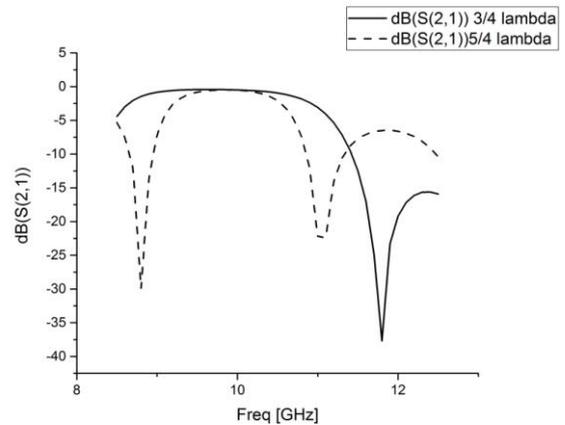


Рис. 4. Зависимости  $S_{21}$  от частоты при размещении замыкающих заглушек на расстояниях кратных  $\lambda_B/4$

Поскольку на практике осуществить быстрое полное перекрытие всего поперечного сечения волновода затруднительно, для этого используются полупроводниковые переключающие элементы или при большой мощности сигнала – газовые и электроннолучевые разрядники, размещаемые в центральной части волновода.

Одним из основных условий работоспособности такого устройства является равенство коэффициента отражения волны от управляемого короткозамыкателя величине, близкой к единице.

Зажженный разрядник можно рассматривать как проводящий штырь в волноводе. При этом коэффициент отражения будет описываться соотношением [4]

$$\Gamma = -Z_C(\lambda_B / a\lambda) \cdot I \cdot \sin(\pi D / a), \quad (1)$$

где

$$I = \frac{\sin[\pi(D+r)/a]}{\frac{(Z_C/4\pi\lambda\sigma)^{1/2}}{r} + \frac{\lambda_B}{a\lambda} \sin\left(\frac{\pi D}{a}\right) - \sin[\pi(D+r)/a]}, \quad (2)$$

$D$  – координата штыря в волноводе (если штырь в центре, то  $D = a/2$ );  $\sigma$  – проводимость материала штыря;  $r$  – радиус штыря;  $Z_C = 377$  Ом;  $\lambda_B$  – длина волны в волноводе;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве;  $a$  – размер широкой стенки волновода.

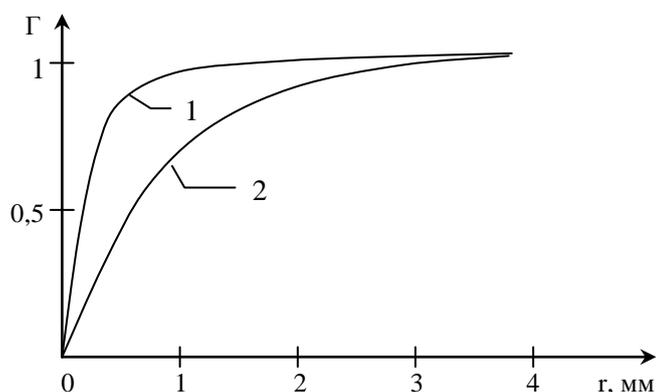


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от радиуса проводящего штыря:  
1 – расчет; 2 – эксперимент

На рис. 5 приведены графики зависимости коэффициента отражения от радиуса проводящего штыря, вычисленной по (1) и (2) при  $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$  м,  $a = 2,3 \cdot 10^{-2}$  м,  $D = a/2$ ,  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  См/м (кривая 1), а также измеренная экспериментально для стального ( $\sigma \sim 10^7$  См/м) штыря (кривая 2).

Видно, что уже при  $r \sim 1$  мм величина коэффициента отражения близка к единице для теоретической кривой, хотя ход экспериментальной кривой убеждает, что достижение  $\Gamma \sim 1$  при таких размерах штыря – непростая задача. Анализ соотношений (1) и (2) показывает, что в то же время зависимость  $\Gamma$  от  $\sigma$  должна быть достаточно сильной (при  $\sigma \approx 1 \cdot 10^{-1}$ ; 10 См/м при  $r = 1$  мм  $\Gamma \approx 0,188$ ; 0,699 соответственно) [3].

Из проведенных оценок следует, что для эффективной работы разрядника необходимо обеспечить при малом диаметре плазменного или электронного столба его высокую проводимость.

Для режима передачи энергии в нагрузку при замыкании цилиндрическим проводником ( $r = 1$  мм) на расстоянии от оси симметрии тройника, равном  $3\lambda_B/4$ , при наличии короткозамыкающей заглушки на расстоянии  $\lambda_B$  структура поля в тройнике (рис. 6) похожа на структуру поля при использовании замыкающей нагрузки на расстоянии  $3\lambda_B/4$  (рис. 3), однако поле волны присутствует и за цилиндрическим замыкающим проводником.

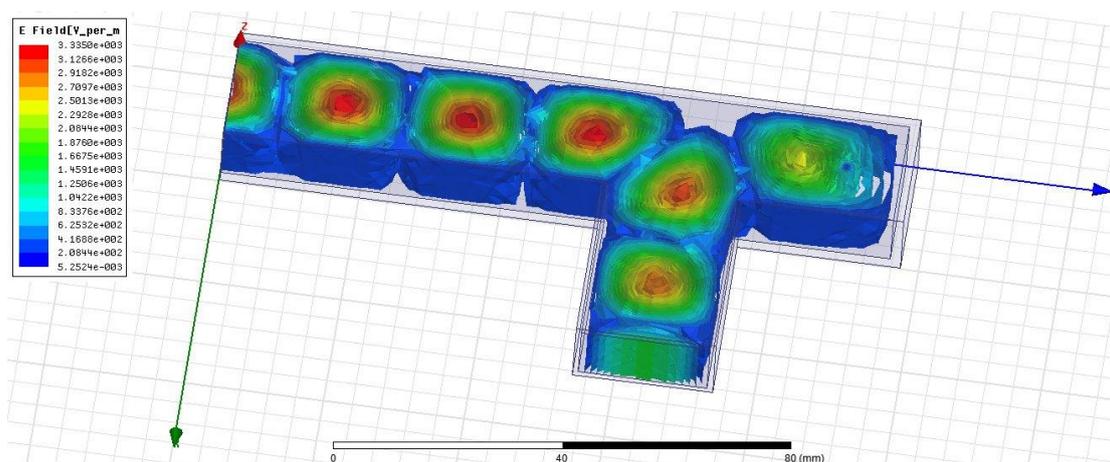


Рис. 6. Структура поля в режиме передачи энергии в нагрузку при использовании закорачивающего штыря

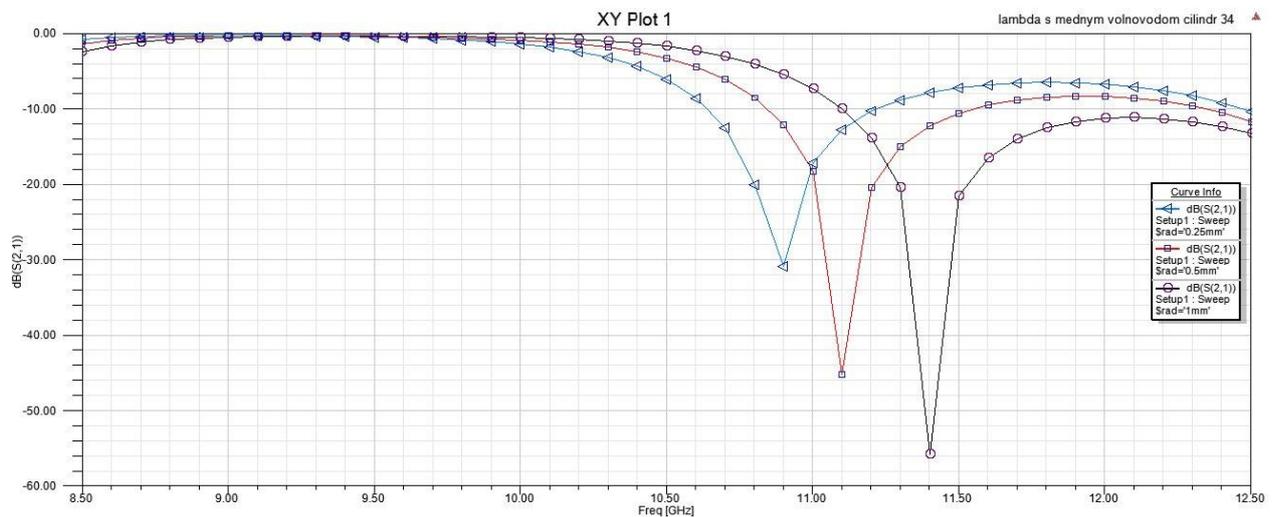


Рис. 7. Зависимости  $S_{21}$  от частоты при различных радиусах короткозамыкающего проводника

Графики частотных зависимостей коэффициента передачи от радиуса цилиндрического проводника (имитатора разрядника) приведены на рис. 7. Видно, что полоса пропускаемых частот расширяется с увеличением толщины замыкающего элемента.

Наличие экстремумов затухания в полосе рабочих частот волновода ( $23 \times 10$  мм) обусловлено появлением на некоторых частотах дополнительного фазового сдвига отраженной волны от системы закорачивающий проводник – замыкающая нагрузка, приводящего к нарушению условий передачи энергии колебаний в нагрузку.

## Выводы

Результаты, полученные при модельных и экспериментальных исследованиях, свидетельствуют о том, что для эффективного использования микроволнового переключателя на основе волноводного тройника необходимо обеспечить высокую точность позиционирования его элементов (до 10 – 20 мкм), нестабильность генератора накачки – не хуже  $10^{-4}$ , добротность резонатора в накопительном режиме – не хуже  $10^4$ , высокую проводимость управляемого регулирующего элемента и малые потери, вносимые им в режиме накопления. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие падающих и отраженных волн со структурой замыкающий проводник – замыкающая нагрузка и характер его изменения в зависимости от частоты, формы и размеров элементов переключателя.

**Список литературы:** 1. Диденко, А.Н. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности / А.Н. Диденко, Ю.Г. Юшков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 112 с. 2. Диденко А.Н. СВЧ энергетика: теория и практика / А.Н. Диденко ; отв. ред. Я.Б. Данилевич. – М. : Наука, 2003. – 446 с. 3. Бондаренко, И.Н. Генерация мощных СВЧ импульсов с помощью устройств на основе сверхпроводящих резонаторов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. – 2003. – Вып.135. – С. 32–37. 4. Tomar, R.S. Analysis and filtering applications of two newly proposed waveguide-coaxial line junctions / R.S. Tomar, Gupta. Chinmoy Dus // J. Appl. Phys. – 1983. – V.58, N 8. – P. 4623–4628.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 07.09.2016