ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2022, том 86, № 9, с. 1283–1287

УДК 621.396.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ СО ВЗАИМНОЙ СВЯЗЬЮ ПО РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ВОЛНЕ В ВОЛНОВОДЕ

© 2022 г. Л. В. Алексейчик*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

**E-mail: alexseychiklv@mpei.ru*

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.
После доработки 13.05.2022 г.
Принята к публикации 23.05.2022 г.

Выполнено моделирование частотных характеристик диэлектрических резонаторов, установленных в металлических прямоугольных волноводах X-диапазона длин волн с распространяющейся основной волной волновода H_{01}. Цилиндрические (дисковые) диэлектрические резонаторы изготовлены из высокодобротных керамических материалов с высокими значениями диэлектрической проницаемости.

DOI: 10.31857/S0367676522090058

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени разработки микроволновых фильтров на диэлектрических резонаторах (ДР) широко используются в средствах мобильной и космической связи. При этом основное внимание уделялось проектированию и разработкам полосно- пропускающих фильтров (ППФ), мультиплексеров и других устройств, а проектирование полосно-заграждающих (режекторных) фильтров (ПЗФ) не имело столь широкого распространения [1–3], в частности волноводные конструкции ПЗФ, обладающие уникальными значениями собственной добротности ДР, были весьма громоздки. Поэтому цель работы была связана с оценкой нежелательных эффектов работы ПЗФ и мер по их устранению. Рассмотрены случаи взаимной связи диэлектрических резонаторов при четверть-волновой связи ДР, возбужденных на рабочем низшем типе колебания $H_{01\delta}$. Показано, что при одно четверть-волновой связи ДР имеет место превышение уровня “критической” связи резонаторов, что проводит к нежелательному расщеплению резонансных кривых, а дополнительное влияние на несимметричность частотных характеристик системы двух ДР оказывает нерезонансное возмущение, вносимое диэлектрическими образцами ДР в волновод. Рассмотрены меры по уменьшению. влияния эффекта “пересвязи” диэлектрических резонаторов в линиях передачи СВЧ. Выявлены особенности применения ДР в различных конструкциях режекторных микроволновых фильтров, включая коаксиальные и микрополосковые конструкции. Моделирование проведено с помощью программы CST MS.

При проектировании режекторных (заграждающих) СВЧ-фильтров на диэлектрических резонаторах, установленных в металлических волноводах (в том числе в экранированных микрополосковых линиях) требуется обеспечение “критической” связи между резонаторами, что достигается установкой резонаторов в линии передачи на расстояния, кратные нечетному числу $\lambda_в/4$, где $\lambda_в$ – длина волны в линии передачи [1].

Однако для случая применения ДР в конструкциях таких фильтров имеются особенности, обусловленные формированием локального (местного) электромагнитного поля как резонансного, так и нерезонансного (квазистатического) возбуждения, зависящего от формы и ориентации образцов ДР в линиях передачи. Численное моделирование случая четвертьволновой связи двух ДР, установленных в прямоугольном металлическом волноводе, позволило получить достаточно точные частотные характеристики элементов матрицы рассеяния, учитывающие отмеченные особенности четвертьволновой связи.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе проведено моделирование прямоугольного металлического волновода X-диапа-

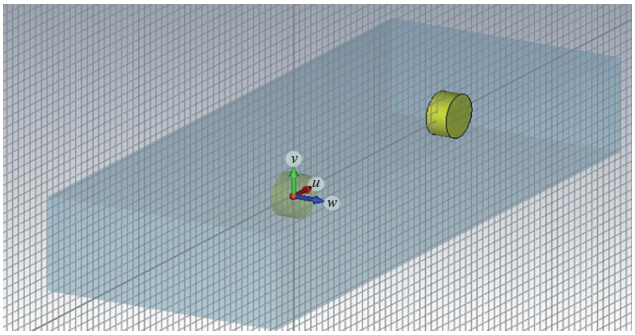

Рис. 1. Вид волновода с двумя ДР при $3\lambda_в/4$-связи между ДР.

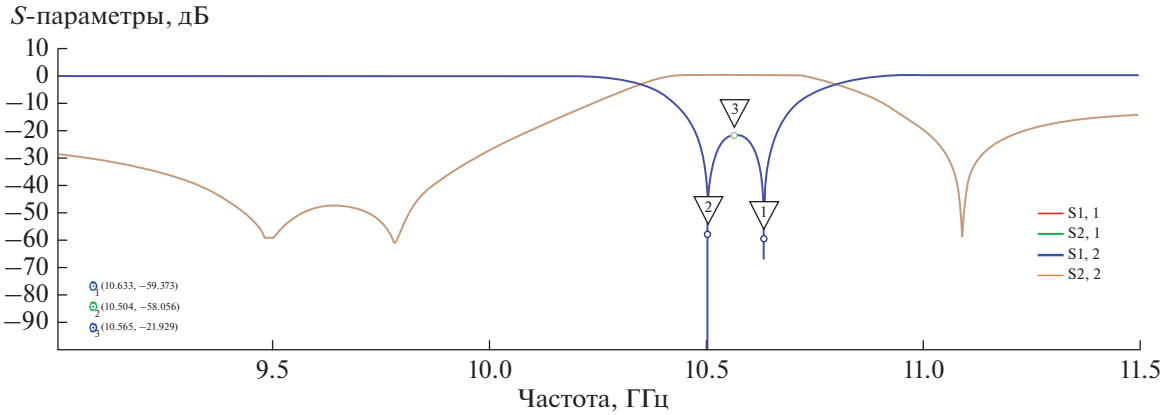

Рис. 2. *S*-параметры двух ДР с $\lambda_в/4$-связью.

зона сечением 23 · 10 мм^2, содержащего два ДР цилиндрической (дисковой) формы (диаметр – 4.5 мм, высота – 2 мм), материалом которых служит керамика БТ-45 с относительной диэлектрической проницаемостью ε' = 45 и собственной добротностью Q_0 порядка $2 \cdot 10^4$. ДР установлены в центре волновода с поперечной ориентацией диска ДР, как показано на рис. 1.

Для случая размещения одного ДР в волноводе резонансная частота ДР, возбужденного на низшем типе колебаний $H_{01\delta}$, равна f_0 = 10.564 ГГц, а полоса заграждения – $2\Delta f$ по уровню 10 дБ для коэффициента отражения S_{11} составила 0.894 ГГц, что соответствует значению нагруженной добротности ДР равной $Q_н = f_0/(2\Delta f/3) = 10.564/(0.894/3) = 39.4$. Отметим, что дополнительное деление полосы заграждения на “3” соответствует ее переводу на уровень измерения по “3 дБ”. Коэффициент отражения S_{11} имеет выраженную несимметрию частотной характеристики, обусловленную нерезонансным возмущением, вносимым образцом ДР в волновод, оказывающим внимание на дополнительные обратные потери на высокочастотном крыле частотной характеристики [2].

На рис. 2 приведены частотные характеристики при одно-четвертьволновой связи двух ДР в волноводе. Видно, что имеет место расщепление частотной характеристики коэффициента S_{21} (с полосой расщепления 129 МГц) за счет превышения взаимной связи между ДР уровня “критической” связи. Частотная характеристика коэффициента S_{11} имеет области частот с выраженными минимумами на склонах кривых, обусловленных влиянием поля нерезонансного возмущения ДР, противофазного полю распространяющуюся волны в волноводе.

На рис. 3 приведены частотные характеристики при трех-четвертьволновой связи двух ДР в волноводе. В этом случае достигается “критическая” связь между двумя ДР и частотные характеристики коэффициента S_{11} принимают более П-образную форму, типичную для совершенной четверть-волновой связи двух резонаторов, при этом полоса частот заграждения S_{21} (порядка 135 МГц по уровню 10 дБ) остается практически

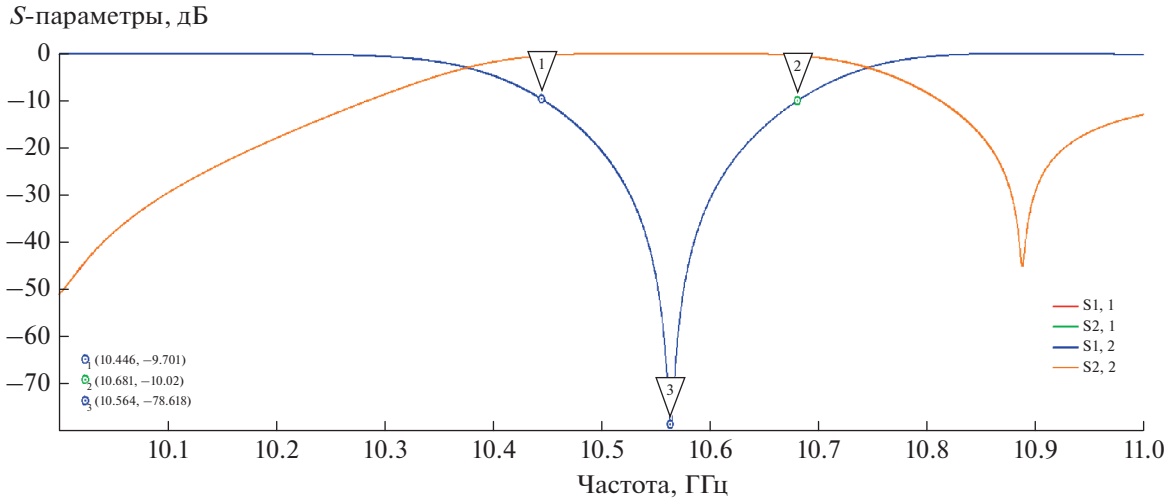

Рис. 3. Частотные зависимости *S*- параметров двух ДР с $3\lambda_в/4$-связью.

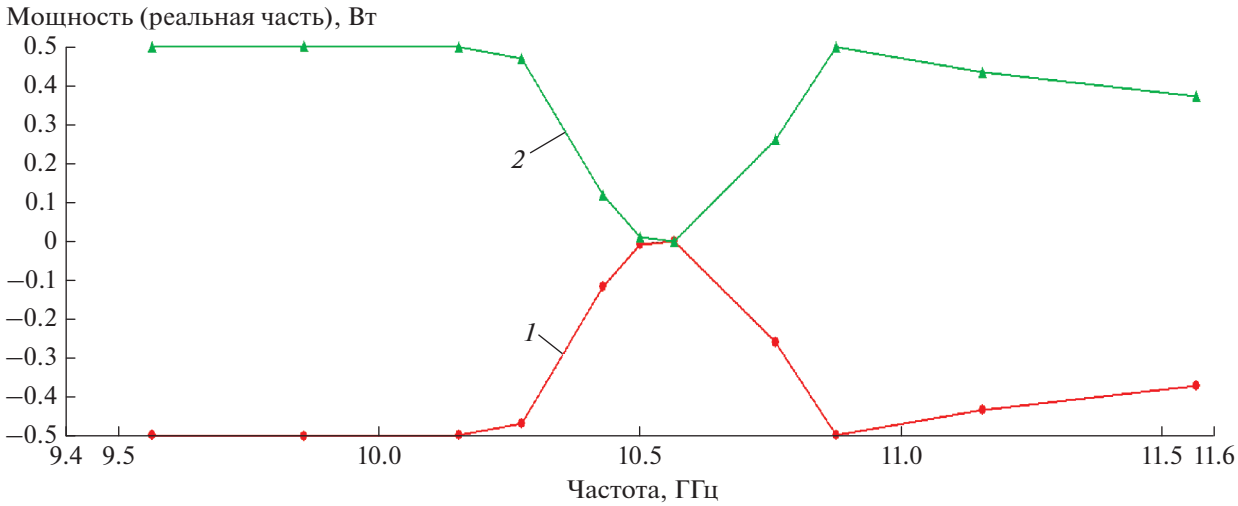

Рис. 4. Мощности на входном (*1*) и выходном (*2*) портах волновода

близкой к полосе заграждения одного ДР (порядка 130 МГц).

Исследуемый вариант конструкции двух ДР в волноводе с $3\lambda_в/4$-связью служит примером реализации двух контурного режекторного СВЧ-фильтра, частотное распределение мощностей которого на портах волновода представлено на рис. 4.

Разность выходной и входной мощностей, нормированных на 0.5, определяет уровень проходящей мощности, причем входная мощность на порте 1 имеет отрицательный знак, а мощность на выходе порта 2 положительный знак, соответственно. Видно, что в резонансной области частот мощности на входе порта 1 и выходе порта 2 стремятся к нулю, что соответствует высокому уровню режекции фильтра. При этом на низкочастотных склонах кривых имеется почти полное согласование волновода с нагрузкой, а на высокочастотных склонах частичное рассогласование за счет нежелательной режекции, обусловленной несимметрией резонансных частотных характеристик ДР в волноводе. Проведенное моделирование непосредственного включения двух ДР в полость волновода позволило дать численные оценки параметров связи между ДР и их нагруженной добротности, которые могут служить исходными данными для синтеза микроволновых режекторных фильтров волноводных конструкций, нашедших широкое применение в технике СВЧ.

МЕРЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ФИЛЬТРОВ

Полученные зависимости частотных характеристик *S*-параметров двух ДР с $3\lambda_в/4$-связью в волноводе подтверждают необходимость проектирования заграждающих (режекторных) фильтров СВЧ на относительно больших электрических расстояниях между ДР, что ведет к заметному увеличению их длины. Однако, предпринимается ряд мер, позволяющих частично (или полностью) реализовать одно четвертьволновую связь за счет частичного экранирования ДР, так что одна часть образца ДР установлена вне волновода, а другая часть адаптивно введена в волновод [3]. При использовании дисковых ДР с различным видом ориентации ДР (со взаимно перпендикулярными ориентациями дисков), установленных в одном и том же поперечном сечении волновода, имеется возможность реализации одно четверть-волновую связь за счет возбуждения их в квадратуре [2, 4], при этом следующая пара ДР может быть установлена через три четверти волны в волноводе. В конструкциях ПЗФ с ДР на коаксиальной линии передачи с ТЕМ распространяющейся волной эффект “пересвязи” резонаторов практически не наблюдается, однако, реализация способа непосредственного подключения ДР к внутреннему металлическому проводнику коаксиальной линии приводит к дополнительным тепловым потерям фильтра [1], а использование внешнего проводника в качестве экрана ДР приводит к излишней громоздкости конструкции. В варианте размещения ДР во внешнем цилиндрическом металлическом экране с локальным подключением проводника петли связи к центральному проводнику коаксиальной линии передачи реализован ПЗФ с минимальными потерями [5, 6]. В конструкциях ПЗФ с ДР на экранированных микрополосковых линиях эффект “пересвязи” резонаторов может наблюдаться за счет влияния экрана. С целью уменьшения этого влияния два одинаковых ДР устанавливают симметрично относительно полоскового проводника МПЛ, обеспечивая их противофазное возбуждение, что существенно снижает влияние экрана и приводит к росту эффективной собственной добротности пары ДР в сравнении с одиночным ДР [2]. Для более продвинутых конструкций фильтров характерно использование двухмодовых ДР с вырожденными типами колебаний, а также сочетание промежуточных звенев резонаторов с непосредственной связью ДР и крайних звеньев, включенных в линию передачи посредством четвертьволновых связей [7], но такие конструкции следует отнести к гибридным конструкциям фильтров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При включении ДР в полость металлического волновода последний служит одновременно линией передачи и экраном, препятствующим излучению ДР в окружающее свободное пространство. Для возбуждения электромагнитного поля ДР не требуется дополнительных сосредоточенных элементов связи при реализации внешней связи ДР с волноводом. В качестве рабочего типа колебаний преимущественно используется низшая магнитная мода $H_{01\delta}$ дискового ДР, собственное поле которой подобно полю магнитного диполя.

Получение “критической” связи между двумя ДР достигается при размещении их в прямоугольном (или круглом) волноводе с основной распространяющейся волной на электрическом расстоянии $3\lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны в волноводе на резонансной частоте ДР, если не предприняты дополнительные меры по уменьшению эффекта “пересвязи” взаимной связи ДР при их одно-четвертьволновой связи. Отмечены особенности реализации экранированных микрополосковых и коаксиальных конструкций ПЗФ на ДР.

Учет выявленных особенностей взаимной связи ДР по распространяющейся волне в линиях передачи и меры усовершенствования фильтров могут быть распространены при проектировании микроволновых режекторных фильтров других конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безбородов Ю.М., Нарытник Т.Н., Федоров В.Б.* Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах. К.: Тэхника, 1989. 184 с.
2. *Алексейчик Л.В., Бродуленко И.И., Гаврилюк Н.Г. и др.* Параметры и методы расчета диэлектрических резонаторов и генераторов, и фильтров на их основе. М.: ЦИИ “Электроника”, 1990. 64 с.
3. *Len C.* Waveguide filter on dielectric resonators. US Patent No. 4124830, cl. H01P 1/00. 1978.
4. *Chan R.K.* Dielectric resonator bandstop filters. PhD thesis. Leeds: University of Leeds, 2011. 151 p.
5. *Алексейчик Л.В., Павлов Н.В., Разин С.А. и др.* Полосно-заграждающий фильтр. Патент РФ № 2602695, кл. H01P 1/00. 2016.
6. *Алексейчик Л.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1012; *Alexeychik L.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 8. P. 913.
7. *Cameron R.J., Kudsia C.M., Mansour R.R.* Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. UK: John Wiley and Sons Ltd, 2018. 928 p.

Simulation of dielectric resonators with interconnection by a propagating wave in a waveguide

L. V. Alekseychik*

National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia

**e-mail: alexeychiklv@mpei.ru*

The frequency characteristics of dielectric resonators installed in rectangular metal X-band waveguides with a propagating main wave of the H_{01} waveguide have been simulated. Cylindrical (disk) dielectric resonators are made of high-quality ceramic materials with high values of dielectric constant.