УДК 621.385.6

Исследование емкостно-нагруженного двухзазорного клистронного резонатора, разработанного с использованием ИПВ-технологий

В.А. Соляник, А.Ю. Мирошниченко, Н.А. Акафьева

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в работе представлено исследование объемного двухзазорного клистронного резонатора с добавленными по периметру металлическими стержнями и емкостной нагрузкой грибовидной формы. Приведены расчеты электродинамических параметров резонатора при изменении его габаритных параметров и параметров грибовидной формы. В результате полученные данные показывают нам возможность управления частотой основной моды без изменения собственной добротности резонатора путем изменения длины резонатора. Так же показано, что изменение толщины опорного стержня грибовидной формы позволяет управлять электродинамическими параметрами резонатора.

Ключевые слова: двухзазорный объемный резонатор клистронного типа, миниатюрный многолучевой клистрон (ММЛК), ИПВ-технология, PBG-структуры, емкостная нагрузка грибовидной формы.

1. Введение

Многолучевые клистроны (МЛК) – широко распространенный класс СВЧ-приборов на базе которых могут быть сконструированы генераторы и усилители мощности, применяемые для телекоммуникации, систем связи, ускорителей, радиолокации и т.д. [1]. Наряду с мощными МЛК ведется разработка миниатюрных МЛК (ММЛК), применяемых в основном в бортовой радиопередающей аппаратуре [2].

Одним из основных элементов ММЛК является его резонансная система, определяющая выходные параметры прибора в целом, которой необходимо уделять большое внимание при разработке конструкции прибора. При разработке современных МЛК к их резонансным системам предъявляются особые требования, и достижение необходимого функционала без введения современных конструктивных решений становится невозможным. Одно из таких решений это применение фотонно-кристаллических решеток (PBG-структур) в конструкции резонатора. PBG-структуры, в первую очередь, используются для селекции мод в резонансных системах мощных клистронов для ускорителей [3]. Применение подобных структур в ММЛК с целью управления спектральными параметрами резонатора практически не описано в литературе. Однако, нами были проведены предварительные исследования, которые показали возможность подавления нежелательных мод с помощью PBG-структур [4].

Одним из способов разделения основного колебания резонатора от колебаний высших типов является применение емкостной нагрузки грибовидной формы, где резонатор изготовлен по технологии интегрированных в подложку волноводов (ИПВ). Такие системы применяются для создания СВЧ фильтров [5]. Применение такого решения в клистронных резонаторах позволяет снизить массогабаритные параметры объёмных резонаторов без ухудшений выходных параметров прибора.

Цель работы заключается в исследовании с помощью трехмерного

электромагнитного анализа электродинамических и спектральных характеристик двухзазорного объёмного резонатора клистронного типа с емкостной нагрузкой грибовидной формы, с добавлением в электродинамическую структуру по периметру металлических стержней по типу ИПВ.

2. Конструкция резонатора

Конструкция резонатора представлена на рисунке 1. Он состоит из объемного корпуса прямоугольного сечения 1 со стороной A и высотой H, внутри которого расположены по периметру два ряда металлических стержней 2 с шагом Δ и диаметром 2δ. Такое расположение стержней подобно расположению металлизированных отверстий в ИПВ резонаторах или стержней в фотонно-кристаллических структурах. Для реализации емкостной нагрузки, внутри резонатора располагается тонкий диск 3 диаметром D, расположенный на опорном стержне 4 диаметром d1=1 мм, закрепленном на боковой стенке резонатора. Введение емкостной нагрузки в объемный резонатор приводит к изменению резонансной частоты не только первой моды, но и резонансных частот высших гармоник. На диске размещены восемь центральных электродов 5 длиной l, имеющих отверстия для пролета электронного потока 6 диаметром 2a, которые образуют многоканальную систему. На боковых крышках резонатора располагаются боковые пролетные электроды 7. Между центральными электродами и боковыми электродами образуются восемь высокочастотных зазоров резонатора 8 длиной d. При этом такая структура обладает свойствами объемного резонатора прямоугольного сечения и имеет габариты меньшие, чем аналогичный объемный резонатор волноводного типа.

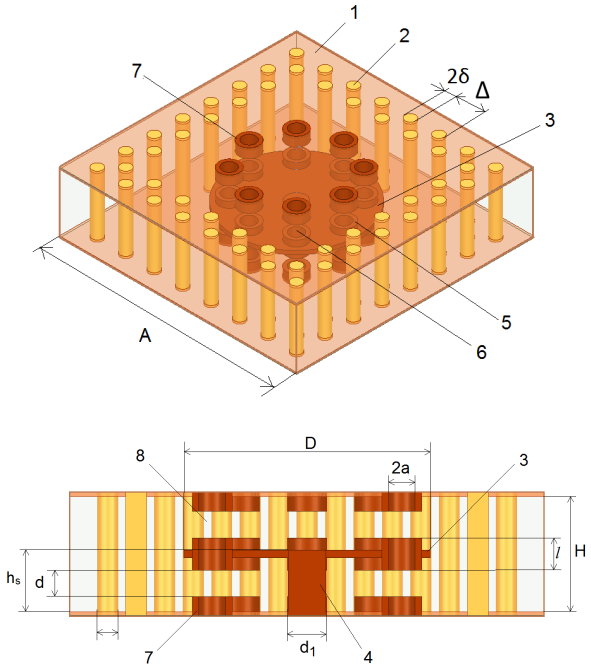


Рисунок 1. Конструкция двухзазорного резонатора с емкостной нагрузкой.

Параметры базовой конструкции исследуемого резонатора в мм приведены в таблице 1.

Таблица 1.

A	H	D	*d*	*l*	*a*	δ	Δ
25	6.5	13	1,4	1.7	0.7	0.3	3

3. Результаты моделирования

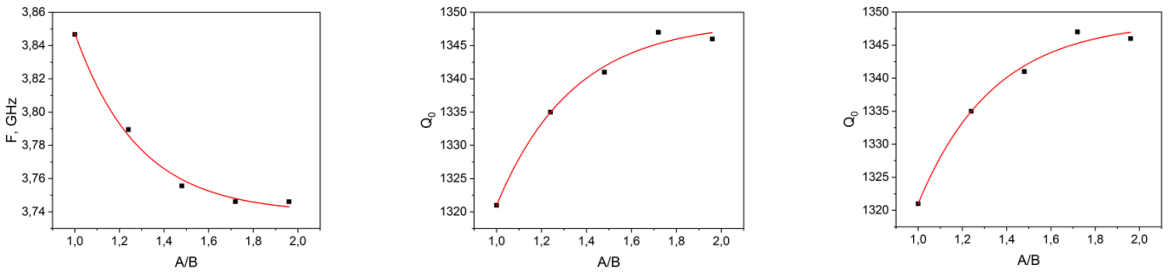
Расчет характеристик резонатора проводился с помощью трехмерного электромагнитного анализа методом конечных элементов. Результаты расчета базовой конструкции резонатора приведен в таблице 2.

Таблица 2.

№ моды	Тип моды	Частота, F, GHz	Собственная добротность, Q0	Характеристическое сопротивление, ρ, Ω
1	π	3.8467	1321	120
2	π	10.2386	2366	82
3	2π	12.8243	2918	72
4	π	16.5988	2795	40.5
5	π	17.0233	3570	2.2
6	π	22.1347	3733	8.9

Согласно представленным результатам видно, что резонатор имеет частоту основной моды, которая далеко отстоит от высших типов колебаний. Частота второй моды имеет более чем в 2,6 раза большее значение относительно первой, а третья мода имеет более чем в три раза большую частоту относительно основной моды.

В рамках данной работы мы исследовали влияние геометрических размеров резонатора на его электродинамические характеристики, для чего изменяли длину одной из сторон резонатора. При изменении отношения длин сторон A/B в промежутке от 1 до 2 исследовались зависимости частоты основной моды колебаний, добротности и характеристического сопротивления. На рис. 2 представлена зависимость электродинамических параметров резонатора от соотношения A/B.



а) б) в)

Рисунок 2. Зависимость электродинамических параметров резонатора от относительного размера резонатора A/B: а – частотная, б – зависимость собственной добротности, в – характеристического сопротивления.

Из полученной зависимости видно, что наиболее сильное изменение частоты происходит при соотношении сторон резонатора в промежутке 1-1,4. Дальнейшее изменение этого соотношения уже не дает возможности эффективно управлять частотой основной моды резонатора. Изменение частоты составило 100 Мгц. На

графике зависимости собственной добротности (рис. 2б) мы видим рост добротности с увеличением соотношения A/B. Аналогично частоте наибольшее изменение Q соответствует изменению A/B в промежутке 1-1,4, при этом Q увеличилась на 1,89% относительно базовой конструкции резонатора. Зависимость характеристического сопротивления от параметра A/B представлена на рисуноке 2в. Заметного изменения характеристического сопротивления при увеличении параметра A/B не обнаружено.

Далее в статье приведены результаты расчета электродинамических параметров при изменении высоты резонатора H при сохранении размеров высокочастотных зазоров.

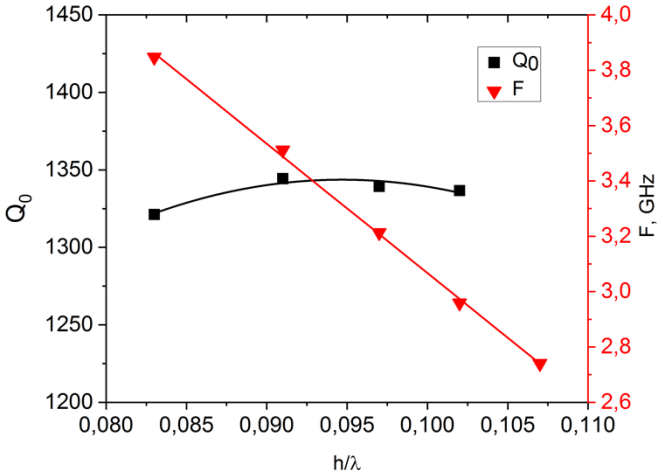
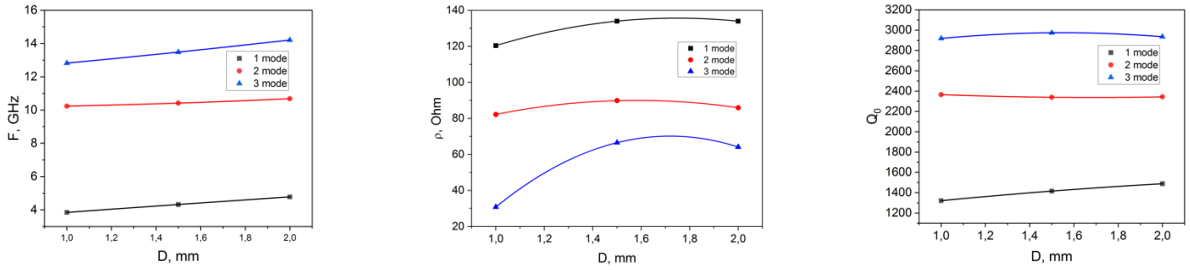


Рисунок 3. Зависимость электродинамических параметров резонатора от относительной высоты резонатора h/λ: частотная, зависимость собственной добротности.

С увеличением высоты резонатора H изменение частоты основной моды имеет линейный характер, при этом значение уменьшается в 1,4 раза. Однако, на собственную добротность то же изменение высоты резонатора не оказывает значительного влияния, максимальное отклонение параметра Q0 от добротности базовой конструкции составило 1,7 %. Таким образом, показана возможность частотной настройки резонатора путем изменения его высоты без потерь собственной добротности резонатора.

Далее представлены результаты исследования влияния изменения диаметра опорного стержня 4, поддерживающего диск 3 на электродинамические параметры резонатора. По результатам, представленным на рис. 4 можно сделать следующие выводы. Частота основной моды изменяется в 1,24 раза, причем изменение линейно. Частота второй противофазной и синфазной мод соответственно 1,04 и 1,1 раза. Изменение диаметра опорного стержня так же влияет и на характеристическое сопротивление. Максимальному значению параметра $\boldsymbol{\rho}$ соответствует основная мода резонатора при изменении величины в 1,1 раза. Минимальное значение параметра $\boldsymbol{\rho}$ соответствует третьей моде, однако здесь наиболее сильно отражается влияние толщины стержня (увеличение в 2 раза).



а) б) в)

Рисунок 4. Расчет электродинамических параметров резонатора в зависимости от диаметра опорного стержня d1: а – частотная зависимость, б – зависимость характеристического сопротивления, в – зависимость собственной добротности резонатора.

На рисунке 4в представлена зависимость собственной добротности резонатора от диаметра опорного стержня емкостной нагрузки. Максимальному значению Q0 соответствует 3-я синфазная мода и при этом изменяется на 12 %. Поля этой моды располагаются по всему объему резонатора и влияние емкостной нагрузки на эту моду минимально. Тоже самое можно отметить и для второй противофазной моды, у которой изменение Q0 также незначительно.

Минимальной величине Q0 соответствует основная противофазная мода, это можно объяснить тем, что поля данной моды сконцентрированы в основном в высокочастотных зазорах резонатора и емкостная нагрузка резонатора оказывает на эту моду существенное значение.

4. Заключение

Исследован двухзазорный объемный резонатор с емкостной нагрузкой грибовидной формы для приборов клистронного типа. В резонаторе применены идеи, на базе которых разработаны резонаторы типа ИПВ. С помощью трехмерного электромагнитного анализа проведен электродинамический расчет основных характеристик резонатора. Показано, что изменение габаритных размеров резонатора позволяет эффективно управлять его электродинамическими параметрами. Изменение соотношений сторон резонатора приводит к увеличению его собственной добротности. В тоже время изменение высоты резонатора позволяет управлять частотой основной моды без изменения его собственной добротности.

Рассмотренная в статье конструкция резонатора с элементами типа ИПВ и емкостной нагрузкой грибовидной формы является перспективной для приборов, имеющих высокие требования по массо-габаритным параметрам. Предложенный тип резонатора может быть применен в ММЛК в приборах телекоммуникации и связи.

Список литературы

1. Галдецкий А. В., Голованов Н. А. Многолучевые клистроны с радиальным расположением лучей //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф.–СПб. – 2023. – С. 4-9.
2. Мирошниченко А. Ю. и др. Трехзазорный резонатор для миниатюрного многолучевого клистрона //Журнал радиоэлектроники. – 2021. – №. 8.
3. Jain, P. K. (2009, December). Study of metallic photonic Band Gap cavity for high power mi-crowave devices. In 2009 Applied Electromagnetics Conference (AEMC) (pp. 1-3). IEEE.

4. Соляник В. А., Мирошниченко А. Ю., Акафьева Н. А. Исследование влияния ввода дополнительных стержней в многозазорном многоканальном клистронном резонаторе на его электродинамические характеристики //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф.–СПб. – 2024. С. 424-427.
5. Turgaliev, V., Kholodnyak, D., Mueller, J., & Hein, M. A. (2015). Small-size low-loss bandpass filters on substrate-integrated waveguide capacitively loaded cavities embedded in low temperature co-fired ceramics. J. Ceram. Sci. Technol, 6(4), 305-314.