

Настраиваемый емкостно-нагруженный многоканальный клистронный резонатор с использованием фотонно-кристаллической решетки

В. А. Соляник^{1,2}, А.Ю Мирошниченко¹, Н.А. Акафьева¹

¹Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

²АО «НПП «Алмаз»

Аннотация. Исследован объёмный емкостнонагруженный резонатор, разработанный с фотонно-кристаллической решеткой, расположенной по внешнему периметру резонатора. Представлены результаты расчета электродинамических параметров такого резонатора. Рассмотрено влияние емкостной нагрузки на электродинамические параметры резонатора. Так же представлена конструкция настраиваемого резонатора с помощью настроечного штыря.

Ключевые слова: объёмный резонатор, емкостнонагруженный резонатор, фотонно-кристаллическая решетка, электродинамические параметры, настроечный штырь.

1. Введение

Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) в настоящее время имеют широкое применение в средствах телкоммуникации и связи [1]. Очевидно, что наиболее актуальной задачей при создании такого клистроны является получение высоких выходных параметров при сниженных массо-габаритных характеристиках.

В статье представлены результаты исследования возможностей миниатюризации такого важного элемента ММЛК, как его резонансная система при сохранении высоких электродинамических характеристик. Известно, что для управления спектром колебаний резонансных систем в мощных пролетных клистроны применяются фотонно-кристаллические решетки (ФКР) [2]. ФКР представляет собой один или несколько рядов металлических либо диэлектрических стержней, которые позволяют эффективно подавлять внеполосные колебания резонатора. Наряду с этим в последнее время появился ряд публикаций о применении резонаторов, с развитой емкостной частью, которые находят применение при создании СВЧ-фильтров с помощью технологии интегрированных в подложку волноводов ИПВ [3, 4]. В этих элементах емкостная нагрузка зачастую имеет грибовидную форму в виде тонкого диска, расположенного в центральной части объёмного резонатора, который закреплен на одном или нескольких стержнях к одной из боковых стенок резонатора. Емкостно-нагруженные объёмные резонаторы показывают высокие характеристики, обладая при этом значительно меньшими габаритами по отношению к аналогичным резонаторам не нагруженным на емкость. Для обеспечения возможности настройки резонатора на требуемые резонансные частоты можно использовать настроечный штырь по аналогии с [5].

Целью настоящей статьи является исследование электродинамических параметров двухззорного многоканального резонатора путем трехмерного электромагнитного анализа с помощью численных методов, в котором используются фотонно-кристаллические решетки и емкостная нагрузка «грибовидной» формы.

2. Конструкция резонатора

Модель резонатора изображена на рисунке 1. Конструктивно резонатор состоит из

следующих основных элементов: корпус – 1, стержни по периметру – 2, емкостная нагрузка – 3, 4, 7. Корпус в виде прямоугольного параллелепипеда имеет высоту $H=6.5$ мм, и сторону $A=25$ мм. Стержни, расположенные по периметру корпуса, имеют диаметр $2\delta=0.7$ и шаг $\Delta=3$ мм. Таким образом, в конструкции реализована структура, подобная ФКР, а в центре резонатора образуется дефект ФКР. В центральной части размещена емкостная нагрузка, закрепленная к боковой стенке с помощью опорного стержня 4 диаметром $d_1=2$ мм, который является индуктивной нагрузкой. Напротив опорного стержня с диаметром равным диаметру опорного стержня расположен настроечный штырь 8, который герметично закреплен к боковой стенке резонатора так, что есть возможность его перемещения, уменьшая или увеличивая при этом расстояние до тонкого диска 3. Настроечный штырь позволяет эффективно перестраивать частоты резонатора. Емкостная часть нагрузки образована тонким диском 3, который имеет диаметр $D=13$ мм. Спектр емкостнонагруженного резонатора относительно резонатора без емкостной нагрузки имеет большие соотношения частот высших типов колебаний относительно низшего. Для сравнения был смоделирован аналогичный резонатор, но с минимизированной емкостной нагрузкой путем уменьшения площади тонкого диска 3 (рисунок 2). Кроме того, в данной конструкции емкостная нагрузка позволяет сформировать двухзазорную систему для более эффективного взаимодействия электронного потока с СВЧ полем. Двухзазорная система образована центральными пролетными электродами 5 и боковыми электродами 7. Центральные электроды имеют длину $l=1.7$ мм и закреплены на тонком диске 3, а боковые электроды закреплены на боковых стенках резонатора. Центральные и боковые электроды имеют отверстия 6 с диаметром $2a=0.7$ мм, через которые идет поток электронов. Так мы получаем многоканальную систему с двумя ВЧ зазорами 9 длиной $d=1.4$ мм. Предложенная конструкция является аналогом объемного резонатора волноводного типа, но имеет значительно улучшенные массогабаритные параметры.

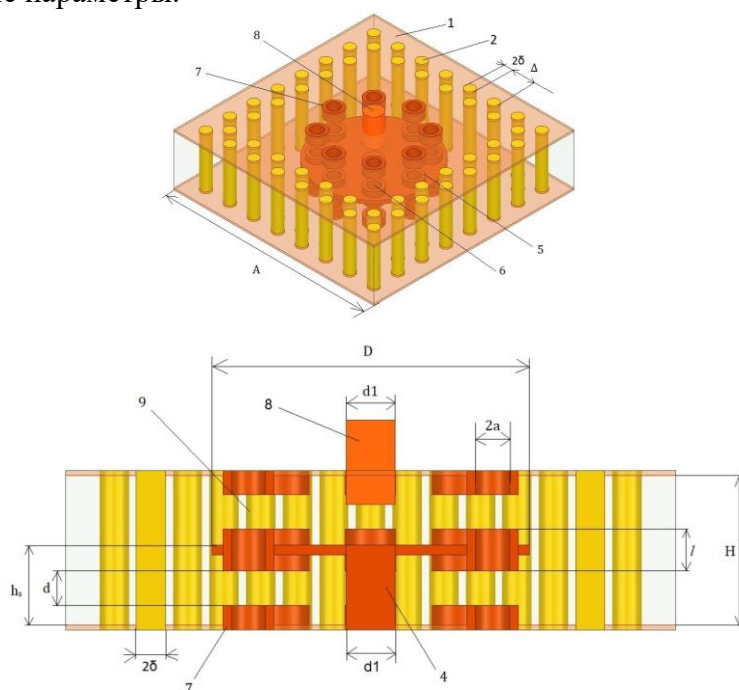


Рисунок 1. Конструкция многоканального двухзазорного емкостнонагруженного резонатора с настроечным штырем.

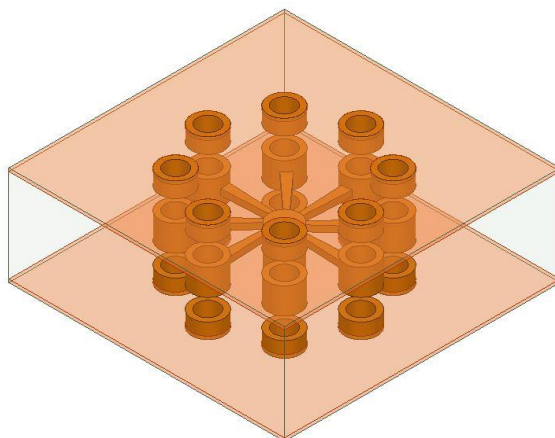


Рисунок 2. Конструкция многоканального двухпортового резонатора с минимизированной емкостной нагрузкой без ФКР.

3. Результаты моделирования

Анализ конструкции проведен в ANSYS HFSS методом конечных элементов. Поиск резонансных частот осуществлялся в диапазоне от 1 до 25 ГГц. В результате анализа были рассчитаны электродинамические параметры, представленные в таблице 1.

Таблица 1 Ёмкостно-нагруженный резонатор с ФКР.

№ моды	Тип моды	Частота, F, MHz	Собственная добротность, Q_0	Характеристическое сопротивление, ρ , Ω	Резонансное сопротивление, $R_0 \cdot 1000$, Ω
1	π	3.842	1293	120	155
2	π	10.257	2384	80	191
3	2π	12.647	2905	50	145
4	2π	16.832	3562	77	275
5	2π	23.569	3611	79	284

Частота основной π моды достаточно далеко отстоит от высших типов колебаний. В частности, отношение $F_{02}/F_{01}=2.67$, а отношение $F_{03}/F_{01}=3.29$. Первая противофазная мода имеет высокое характеристическое сопротивление ρ , в 1.5 раза превышающее такое значение для второй моды. На высших типах колебаний (моды №4, 5) добротность резонатора хоть и имеет большие значения, но характеристическое сопротивление снижается.

ФКР в данной конструкции резонатора применена для корректировки спектра резонатора. В качестве критерия оценки было выбрано резонансное сопротивление R_{0n} для первых 5 мод резонатора. Спектр для исследуемого резонатора представлен на рисунке 3 а.

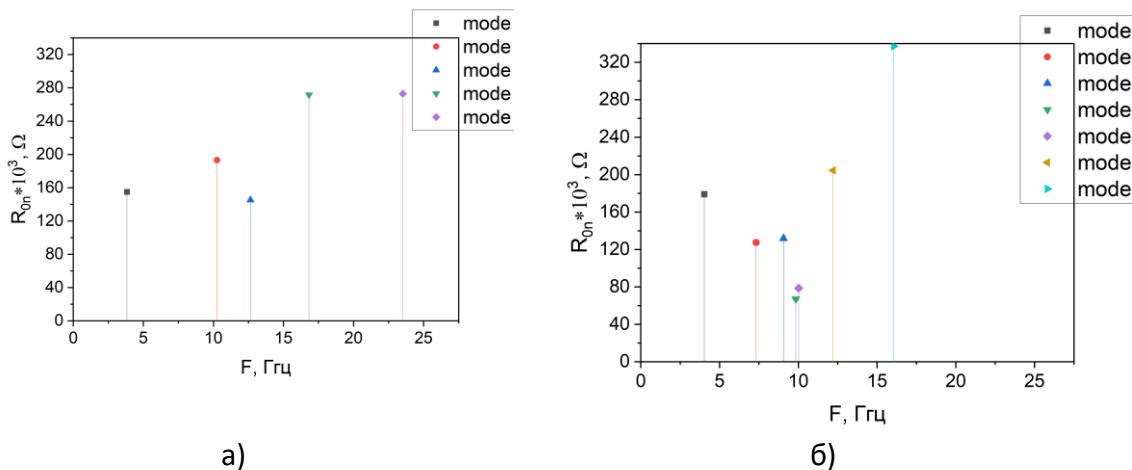


Рисунок 3. Спектр объёмного ёмкостно-нагруженного резонатора: а – с ФКР, б – без ФКР с минимизированной ёмкостной нагрузкой.

Далее в статье был проведен расчет резонатора с минимизированной ёмкостной нагрузкой и в результате был получен следующий спектр (рисунок 3 б). В этом случае наблюдаются дополнительные 4 и 5-я моды, которых нет в случае конструкции с ёмкостной нагрузкой, что показывает нам фильтрующие свойства ёмкостной нагрузки. Так же мы видим значительно сниженное соотношение частоты высших гармоник к частоте основной моды: $F_{02}/F_{01}=1.81$, $F_{03}/F_{01}=2.24$, $F_{04}/F_{01}=3.02$, $F_{05}/F_{01}=3.9$. Так мы показали две основные функции ёмкостной нагрузки: увеличение соотношения частот резонатора и фильтрация паразитных частот.

Для подстройки резонатора в объем резонатора вводился настроечный штырь, с помощью которого изменялись резонансные частоты. Штырь вдвигался внутрь резонатора, длина штыря внутри резонатора h была нормирована на длину ёмкостного зазора резонатора h_0 . Расчет был проведен для первых 3-х резонансных частот. Результаты представлены на рисунке 4.

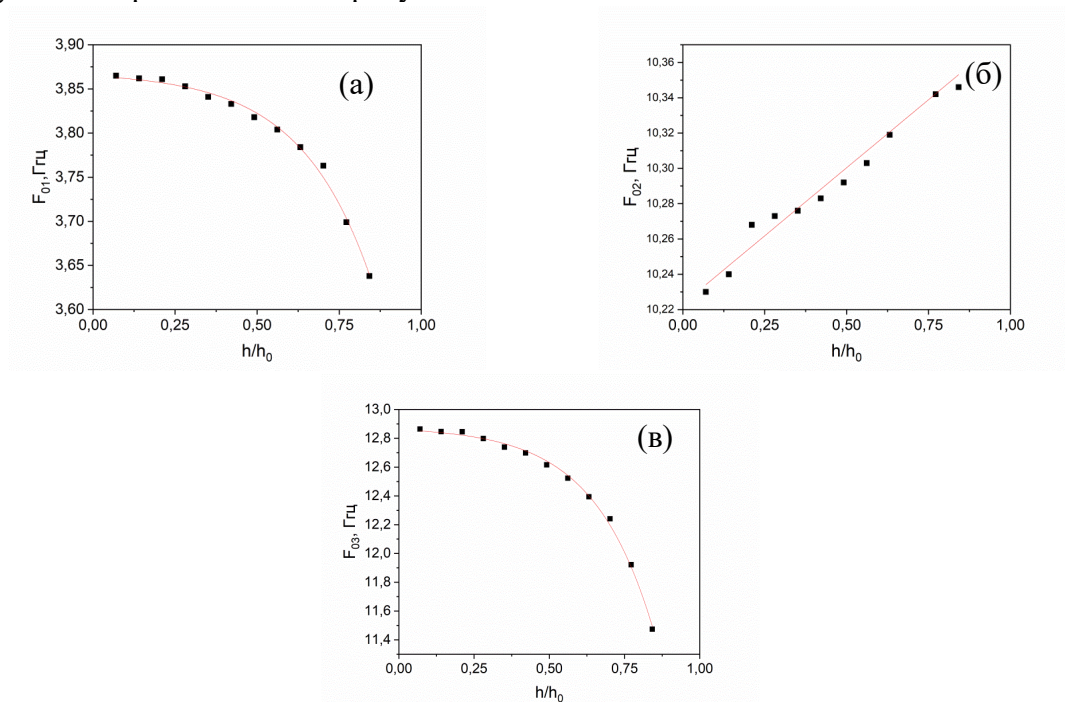


Рисунок 4. Зависимость резонансных частот от позиции настроечного штыря: а – частота первой противофазной моды, б – частота второй противофазной моды, в – частота третьей синфазной моды.

Зависимости частот 1-й и 3-й мод резонатора от положения настроечного штыря аналогичны и имеют экспоненциальный характер при уменьшении абсолютного значения в 1.06 раза и 1.12 раза соответственно. Частота второй противофазной моды увеличивается незначительно в 1.01 раза при чем изменение имеет линейный характер.

4. Заключение

В статье представлены результаты расчетов двух конструкций резонатора для наглядной демонстрации свойств емкостной нагрузки «грибовидной» формы на электродинамические параметры резонатора. Минимизация ёмкостной нагрузки наглядно показала уменьшение соотношения частот высших гармоник к частоте основной моды, а так же в спектре появились паразитные колебания, которые нам необходимо фильтровать. Настроечный штырь показал возможность настройки резонатора путем изменения его положения относительно тонкого диска емкостной нагрузки «грибовидной» формы. Разработанный тип резонатора может найти применения в средствах телекоммуникации и связи в составе ММЛК.

Список литературы

1. Анисимова Т. Ю. Миниатюрный усилительный клистрон Ку-диапазона длин волн. //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб: ЛЭТИ, 2014. – С. 402-406.
2. Jain, P. K. (2009, December). Study of metallic photonic Band Gap cavity for high power microwave devices. In 2009 Applied Electromagnetics Conference (AEMC) (pp. 1-3). IEEE.
3. Sirci S., Martínez J. D., Boria V. E. A novel magnetic coupling for miniaturized bandpass filters in embedded coaxial SIW //Applied sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 394.
4. Turgaliev V. et al. Small-size low-loss bandpass filters on substrate-integrated waveguide capacitively loaded cavities embedded in low temperature co-fired ceramics //J. Ceram. Sci. Technol. – 2015. – Т. 6. – №. 4. – С. 305-314.
5. Шалаев П. Д., Царев В. А. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ КЛИСТРОН С МНОГОЗВЕННОЙ ФИЛЬТРОВОЙ СИСТЕМОЙ. – 2018.