

Двухззорный резонатор клистрона с элементами метаматериала в полосковой линии

Ю.С. Тихонов, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев, Н.А. Акафьева, А.Д. Исаев

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: представлены результаты исследования клистронного резонатора с элементами метаматериала в полосковой линии в виде кольцевого планарного резонатора электрического типа. Методом конечных элементов в частотной области были рассчитаны электродинамические параметры резонатора. Резонатор может найти применение в миниатюрных многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

Ключевые слова: метаматериал, двухззорный резонатор, метод конечных элементов, полосковая линия, электродинамические параметры

1. Введение

В последние годы многие исследователи и разработчики радиоэлектронной аппаратуры обратили внимание на метаматериал (МТМ), поскольку он характеризуется необычными электромагнитными свойствами, которые не встречаются в окружающем нас мире [1]. Согласно определению метаматериал это композиционный материал, свойства которого определяются не свойствами составляющих его элементов, а искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов. Такая искусственная периодическая структура изменяет как диэлектрическую, так и магнитную проницаемости исходного материала. Основоположником теории метаматериалов считают советского и российского физика Веселаго В.Г. [2]. Основное свойство метаматериалов это наличие отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостей. В метаматериале искусственно формируется среда, компоненты которой проявляют резонансные свойства, и в достаточно узкой полосе частот наблюдаются отрицательные значения μ и ϵ .

Первые исследования, направленные на изучение метаматериала в вакуумных микроволновых приборах, относятся к 2008 году [3]. В последнее десятилетие появилось много работ, посвященных применению метаматериала в технике СВЧ [4-6]. Например, использование элементов МТМ в замедляющих системах позволяют получить большее осевое электрическое поле, что обеспечивает более высокое сопротивление связи, чем у их традиционных аналогов [7]. Ряд работ также посвящены использованию метаматериала в пролетных клистронах [8-10]. Например, в [9] предлагается использовать в распределенном резонаторе клистрона S-диапазона в качестве МТМ дополнительный щелевой кольцевой резонатор электрического типа (complementary electric split-ring resonator (CeSRR)). Отмечается, что применение МТМ в резонаторном блоке позволяет существенно уменьшить размеры резонатора, так и клистрона в целом, при высоком коэффициенте усиления и высокой эффективности по сравнению с обычным клистроном.

Целью настоящей работы являлся анализ влияния включения в полосковые линии двухззорного выходного резонатора [11] дополнительного кольцевого планарного резонатора электрического типа в виде щелевой линии (КПР) [12].

2. Описание конструкции резонатора

Двухззорный резонатор (рисунок 1) состоит из объемного прямоугольного корпуса 1, с двумя боковыми пролетными трубами 2 и центральной полетной трубой 3, прикрепленной к торцевым стенкам резонатора с помощью держателей 4, 5, представляющих собой полосковую линию. На держателях 4 и 5 размещены дополнительные планарные кольцевые резонаторы в виде щелевой линии 6. Центральная и боковая пролетная труба содержит каналы для пролета электронного потока. С внешней стороны резонатора размещен вывод СВЧ-энергии в виде отрезка коаксиальной линии передачи 7. Внешний проводник 8 коаксиальной линии передачи соединен с боковой стенкой 9 резонатора, а центральный проводник 10 коаксиальной линии введен в резонатор через отверстие в его боковой стенке. Вывод СВЧ-энергии связан с выходным резонатором с помощью размещенных в выходном резонаторе первой 11 и второй 12 петель связи, концы которых соединены с центральным проводником коаксиальной линии вывода СВЧ-энергии, и с боковой стенкой выходного резонатора 9. При этом первая и вторая петли связи размещены в разных плоскостях, расположенных друг относительно друга под углом α , равным 90° . Основные конструктивные параметры резонатора приведены в таблице 1.

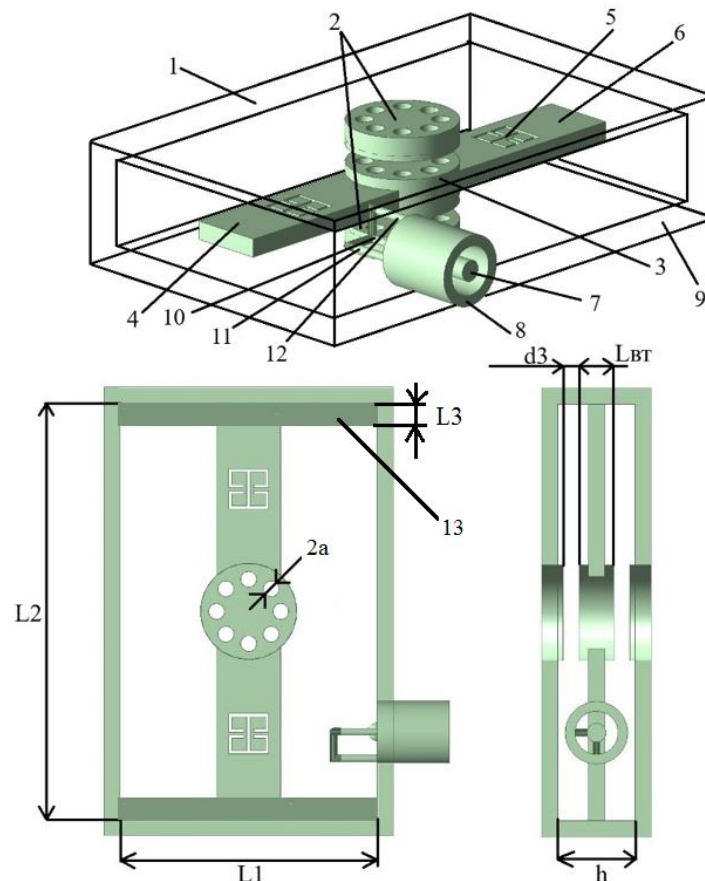


Рисунок 1. Конструкция выходного резонатора.

Таблица 1. Геометрические размеры

	L1, мм	L2, мм	h, мм	a, мм	d3, мм	Lвт, мм
Резонатор прямоугольного сечения	16	26	4,8	1	1	2,18

3. Результаты моделирования

В качестве численного метода исследования был использован метод конечных элементов, реализованный в трехмерной частотной области.

Исследовались три конструкции резонатора: а - резонатор без КПП в полосковой линии, б - резонатор с одним КПП и резонатор с тремя КПП (см. рисунок 2).

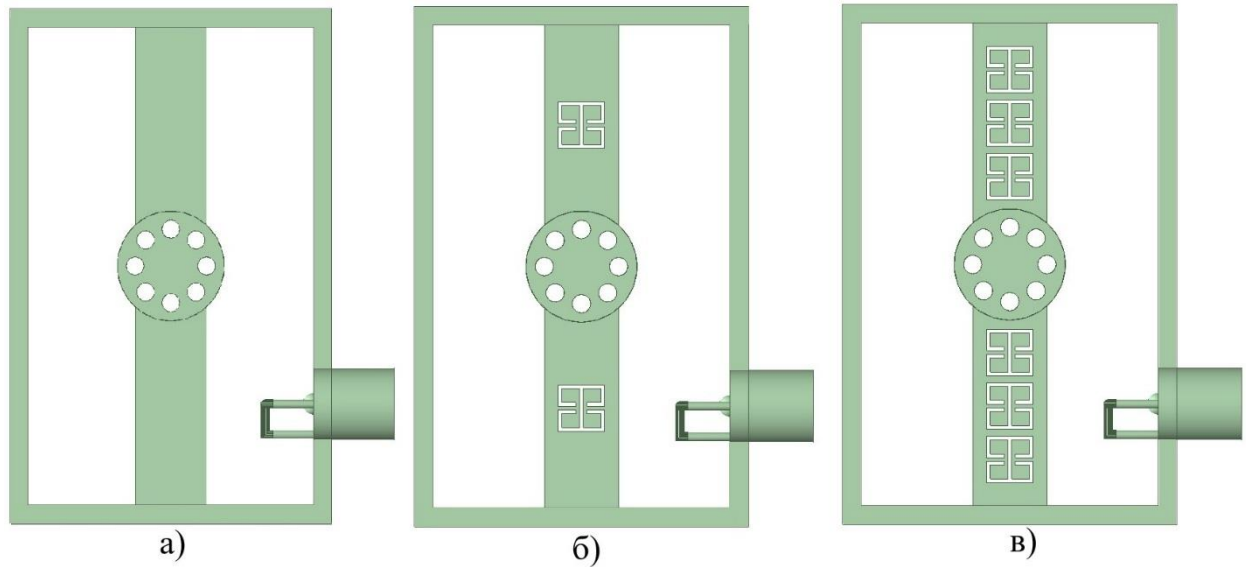


Рисунок 2. Исследуемые конструкции резонаторов.

Таблица 3. Результаты расчета электродинамических параметров резонатора

	Мода	Резонансная частота, f , ГГц	Тип колебаний	Собственная добротность, Q_0	Характеристическое сопротивление, ρ , Ом	Эквивалентное сопротивление, R , кОм
Резонатор без КПП	1	4.796	π	1472	131.24	195.41
	2	9.188	2π	3464	70.72	244.99
	3	15.993	π	2479	12.14	30.10
	4	18.263	2π	3679	15.15	55.74
	5	27.963	2π	4802	10.42	50.05
Резонатор с одним КПП	1	4.8	π	1526	129.41	197.49
	2	9.192	2π	3498	75.48	264.04
	3	16.002	π	2481	12.54	31.12
	4	18.281	2π	3730	16.55	61.72
	5	27.971	2π	4912	10.78	52.97
	6	28.462	π	2930	1.17	3.42
Резонатор с тремя КПП	1	4.797	π	1599	124.78	200.64
	2	9.195	2π	3570	73.24	261.47
	3	16.012	π	2593	14.06	36.45
	4	18.267	2π	3866	13.25	51.21
	5	27.963	2π	4840	10.09	48.84
	6	28.469	π	3071	1.65	5.08
	7	28.687	π	1893	0.94	1.77

Из полученных результатов видно, что в диапазоне до 30 ГГц спектр представлен колебаниями как противофазного типа, так и синфазного типа. Применение

добавочных КПП в полосковой линии дает уменьшение характеристического сопротивления (ρ) на низшей π -моды для конструкции с одним КПП на 1,41%, для конструкции с тремя КПП на 5,18% относительно конструкции без КПП. На первом синфазном виде колебаний ρ для резонатора с одним КПП увеличивается на 6,73% относительно резонатора без КПП, а для резонатора с тремя КПП, также увеличивается на 3,56%. При этом собственная добротность Q_0 для конструкции резонатора с одним КПП на низшей π -моды увеличивается на 3,67%, а на низшей 2π -моды незначительно увеличивается на 0,98% относительно конструкции без КПП. Для конструкции резонатора с тремя КПП на низшей π -моды собственная добротность увеличивается на 8,63%, а на низшей 2π -моды на 3,06%.

4. Исследование настройки резонатора на кратные резонансные частоты.

Режим кратности резонансных частот резонатора может быть полезен для увеличения КПД клистрона, а также для работы прибора в качестве умножителя частот. Для реализации настройки на кратные частоты был использован перестроочный элемент в виде двух тонких ребер 13 (рис.1), которые вводились в резонатор со стороны короткого замыкания полосковой линии на корпус резонатора. Толщина ребер перестройки была равна толщине полосковой линии. Длина ребер перестройки L_3 ступенчато изменялась, при этом происходило изменение длины полосковой линии, которая определяет частоту противофазного вида колебаний. Частота π -моды, как видно из рисунка 3 при этом существенно увеличивается, в отличие от 2π -моды, частота которой в тоже время незначительно уменьшается. Таким образом, при значении относительной длины ребра перестройки $L_3/L_2=0,042$ был получен режим, соответствующий кратности частот синфазной и противофазной модам в резонаторе.

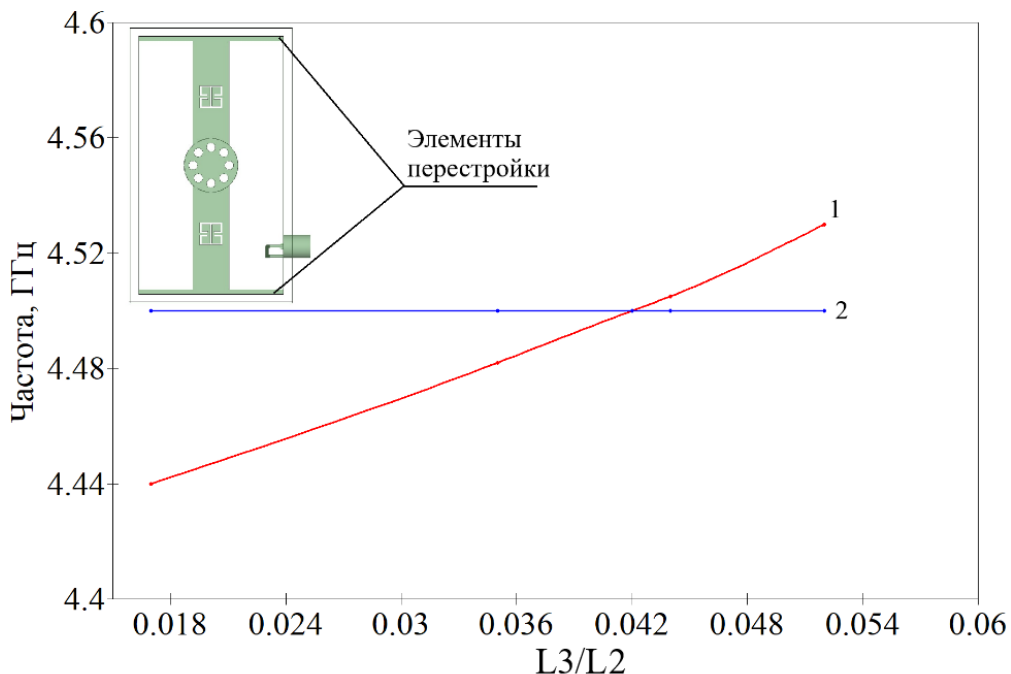


Рисунок 3. Перестройка частот резонатора с помощью перестроочного элемента: 1 - π -мода, 2 - 2π -мода.

Заключение

Исследована конструкция двухззорного многолучевого клистронного резонатора с добавочным планарным кольцевым резонатором электрического типа. С помощью

трехмерного моделирования проведено изучение основных электродинамических параметров в диапазоне до 30 ГГц. Резонатор имеет малогабаритную конструкцию и высокие электродинамические параметры на первых двух модах. Отмечено влияние дополнительной резонансной структуры, включенной в полосковые элементы резонатора на частоты. Это влияние заключалось в увеличении собственной добротности на основных и высших модах. Характеристическое сопротивление на первой моде при вводе КПП незначительно уменьшалось, на второй моде возрастало. Резонансное сопротивление на обеих модах: низшей π и второй 2π возрастает. В работе также был исследован режим настройки на кратные частоты π и 2π мод. Резонатор подобного типа может найти применение в миниатюрных многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

Список использованных источников

1. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 1. – С. 3-28.
2. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92. – №. 7. – С. 517-526.
3. Starinshak D. P., Wilson J. D. Investigating dielectric and metamaterial effects in a terahertz traveling-wave tube amplifier. – 2008. – №. E-16271.
4. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 1. – С. 3-28.
5. Duan Z. et al. Metamaterial-inspired vacuum electron devices and accelerators // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – Vol. 66. – №. 1. – P. 207-218.
6. Hummelt J. et al. Fabrication and test of a high power S-band metamaterial backward-wave oscillator // 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2015. – P. 1-2.
7. Wang Y. et al. All-metal metamaterial slow-wave structure for high-power sources with high efficiency // Applied Physics Letters. – 2015. – Vol. 107. – №. 15.
8. Galdetskiy A. V. On the use of metamaterials for increasing of output power of multibeam klystrons // 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2013. – P. 1-2.
9. Wang X. et al. A miniaturized high-gain, high-efficiency metamaterial assisted S-band extended interaction klystron // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2019. – P. 1-2.
10. Wang X. et al. Recent advances in metamaterial klystrons // EPJ Applied Metamaterials. – 2021. – Vol. 8. – P. 9.
11. Пат. 2390870 Российская Федерация, МПК⁷ H01J 25/02. СВЧ-прибор клистронного типа (варианты) / Королев А.Н., Лямзин В.М., Мамонтов А.В., Симонов К.Г.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Научно-производственное предприятие «Исток». - № 2009104517/09; заявл. 10.02.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15.
12. Duan Z. et al. Sub-wavelength waveguide loaded by a complementary electric metamaterial for vacuum electron devices // Physics of Plasmas. – 2014. – Vol. 21. – №. 10.
13. Zhang X. et al. Miniaturized P-band MW-level klystron with CeSRRs for CSNS linac application // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2023. – Vol. 70. – №. 9. – P. 4878-4884.