

Исследование электродинамических параметров трехззорного клистронного резонатора с полосковыми проводниками на керамической подложке

М.А. Чернышев, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Аннотация: представлены результаты исследования миниатюрного трехззорного клистронного резонатора с резонансными полосковыми элементами на диэлектрической подложке. С использованием метода конечных разностей во временной области рассчитаны основные электродинамические параметры резонатора в диапазоне часто от 4 до 20 ГГц. Подобный тип резонатора может быть применен в низковольтных малогабаритных клистропах, работающих как сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: трехззорный резонатор, диэлектрическая подложка, низковольтный многолучевой клистрон, полосковый проводник, электродинамические параметры.

1. Введение

Активное освоение микроволнового диапазона длин волн требует разработки высокоэффективных генераторов и усилителей, причем для бортовой аппаратуры они должны удовлетворять строгим требованиям по массогабаритным характеристикам. Одним из кандидатов на эту роль является миниатюрный многолучевой клистрон (МЛК) [1, 2].

Ключевым элементом многолучевого клистропа, от которого зависят выходные параметры прибора в целом, является его резонансная система. Известно, что для получения высокого КПД выходной резонатор клистропа должен иметь высокое эквивалентное сопротивление $R_e = \rho Q_n$, где ρ – волновое сопротивление резонатора, Q_n – его нагруженная добротность [3]. Это требование сложно выполнимо для одноззорных резонаторов. Решение проблемы заключается в использовании резонаторов с повышенным волновым сопротивлением, в частности, многоззорных.

Наряду с этим, значительный интерес представляет создание миниатюрных многолучевых клистропов, резонансные элементы которых выполнены на печатных платах, расположенных перпендикулярно направлению движения электронного пучка. Такое решение ранее использовалось в низковольтной ЛБВ с замедляющей системой (ЗС) типа меандра [4]. Также вызывает интерес применение в подобных резонансных системах многослойных подложек, которые находят применение при создании микрополосковых устройств СВЧ [5]. Такие подложки могут обеспечить улучшенные электрические параметры и характеристики резонансной системы и миниатюризацию прибора в целом. Резонансные системы для низковольтных клистропов с диэлектрическими подложками в настоящее время исследованы мало.

Целью настоящей работы является исследование основных электродинамических параметров и характеристик трехззорного многоканального резонатора с полосковыми резонансными проводниками, размещенными на диэлектрической подложке.

2. Конструкция резонатора

Исследуемый резонатор представлен на рисунке 1. Основу резонансной системы составляет прямоугольный объемный резонатор 1, внутри которого размещена диэлектрическая подложка 2, выполненная из алмаза ($\epsilon=5.7$) толщиной 1 мм.

На диэлектрической подложке размещены полосковые линии 3, состоящие из двух либо трех проводников. Два центральных электрода (втулки) 4 и два боковых электрода 5 образуют три высокочастотных зазора резонатора 7. Центральные и боковые электроды резонатора имеют по 18 каналов для пролета электронного потока 6. Полосковые линии 3 электрически соединены с одной стороны с центральными электродами 4, с другой стороны с корпусом прямоугольного резонатора 1. Полосковые линии образуют двухпроводную резонансную систему, нагруженную на емкость зазоров, в которой колебания могут возбуждаться противофазно или синфазно.

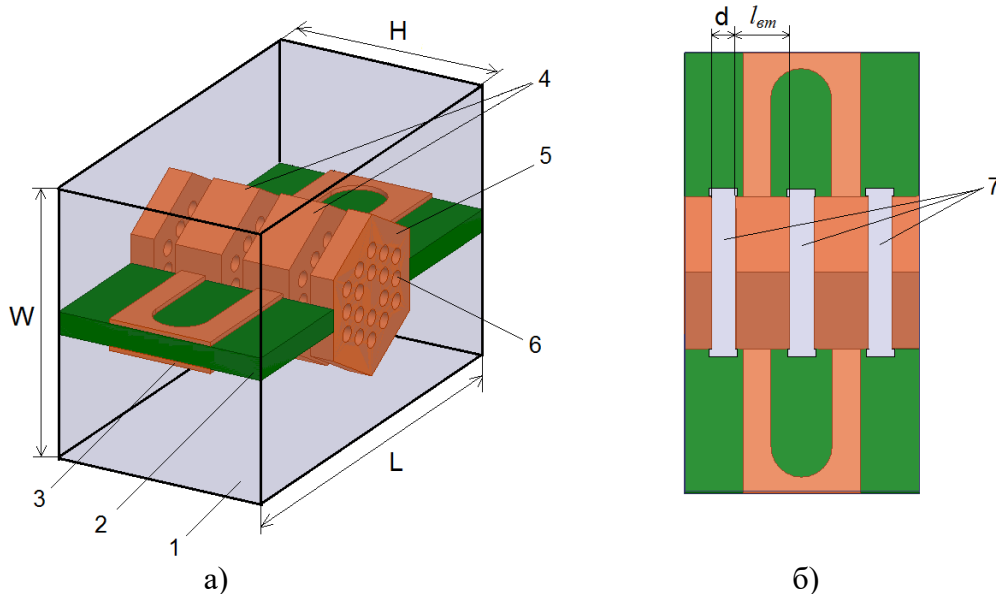


Рисунок 1. Конструкция резонатора.

Исследования проводились в диапазоне от 4 до 20 ГГц. Основные размеры резонатора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные геометрические параметры резонатора

Высота резонатора, H , мм	Длина резонатора, l , мм	Ширина резонатора, W , мм	Радиус пролетного канала, a , мм	Длина зазора d , мм	Длина центральных электродов, l_{em} , мм
9.6	18	12	0.35	1	2.2

3. Результаты моделирования

Расчет резонатора проводился в программе трехмерного моделирования REZON [7], в которой для исследования электродинамических параметров использован метод конечных разностей во временной области.

Были исследованы две модели резонатора, отличающиеся конструкцией полосковых линий. В первом случае использованы два полосковых проводника, расположенных симметрично с обеих сторон диэлектрической подложки (таблица 2). Во втором случае использовались три полосковых проводника и двухслойная диэлектрическая подложка. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 2. Результаты моделирования резонатора с двумя полосковыми линиями

Номер моды/ n	Тип моды	F_{0n} , ГГц	Q_{0n}	ρ_n , Ω
1	π	4.439	1130	272
2	$3\pi/2$	5.0216	2092	107
3	2π	9.547	6291	116
4	π	18.193	2395	22
5	$3\pi/2$	19.077	5176	31

Таблица 3. Результаты моделирования резонатора с тремя полосковыми линиями

Номер моды/ n	Тип моды	F_{0n} , ГГц	Q_{0n}	ρ_n , Ω
1	π	4.492	1256	226
2	$3\pi/2$	5.048	2307	242
3	2π	9.521	6426	109
4	π	18.146	2467	22
5	$3\pi/2$	19.029	5397	32

Из таблиц видно, что в диапазоне до 20 ГГц в резонаторе возбуждаются пять мод с высокочастотными электрическими полями в зазорах резонатора. Наибольшая собственная добротность наблюдается на синфазном виде колебаний (2π). Увеличение числа полосковых проводников с двух до трех приводит к росту собственной добротности Q_0 резонатора на всех частотах. В то же время характеристическое сопротивление уменьшается для 1-й и 3-й мод. Для 2-й моды характеристическое сопротивление при трех полосках существенно выше, в этом случае оно увеличивается более чем в два раза, что можно объяснить «уменьшением» емкости зазоров за счет отсутствия поля в центральном зазоре. Для высших частот характеристическое сопротивление при увеличении числа полосковых проводников остается постоянным. Таким образом, переход к полосковому проводнику, состоящему из трех проводников, позволяет получить увеличенные значения добротности резонатора, а на некоторых модах увеличение характеристического сопротивления.

На рисунке 2 приведены результаты исследования импеданса $R_{0n} = \rho_n Q_{0n}$ для резонансных частот, лежащих в диапазоне от 4 до 20 ГГц для конструкции резонатора содержащей полосковые линии, состоящие из трех проводников.

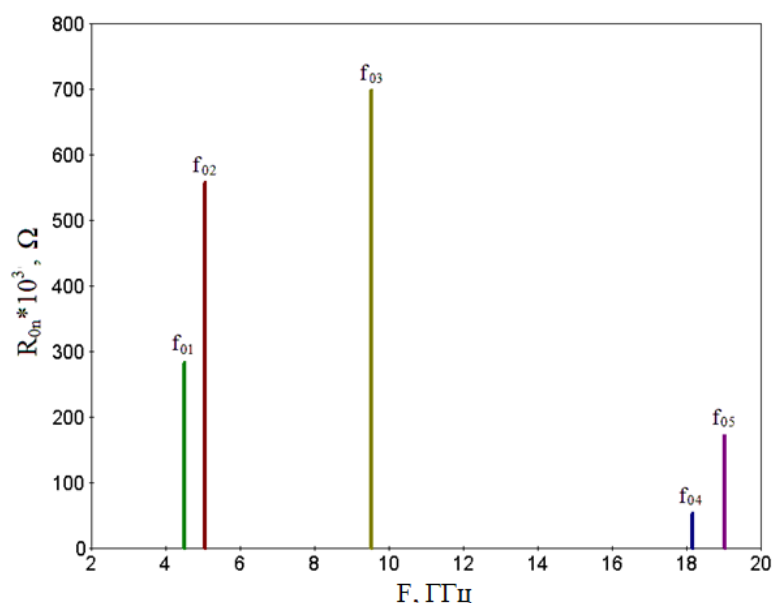


Рисунок 2. Спектральные характеристики резонатора. Зависимость параметра R_{0n} от частоты.

Из графиков видно, что 1-й и 2-й типы колебаний (π и $3\pi/2$) расположены в С-диапазоне, 3-я мода расположена в Х-диапазоне, высшие типы колебаний сосредоточены в К-диапазоне. Максимальное значение ρQ_0 наблюдается для 3-й моды.

Для исследованных видов колебаний получены графики распределения в пролетном канале амплитуды продольной компоненты электрического поля вдоль пространства взаимодействия. Результаты приведены на рисунке 3, исследование электрического поля проводилось в пролетном канале первого слоя.

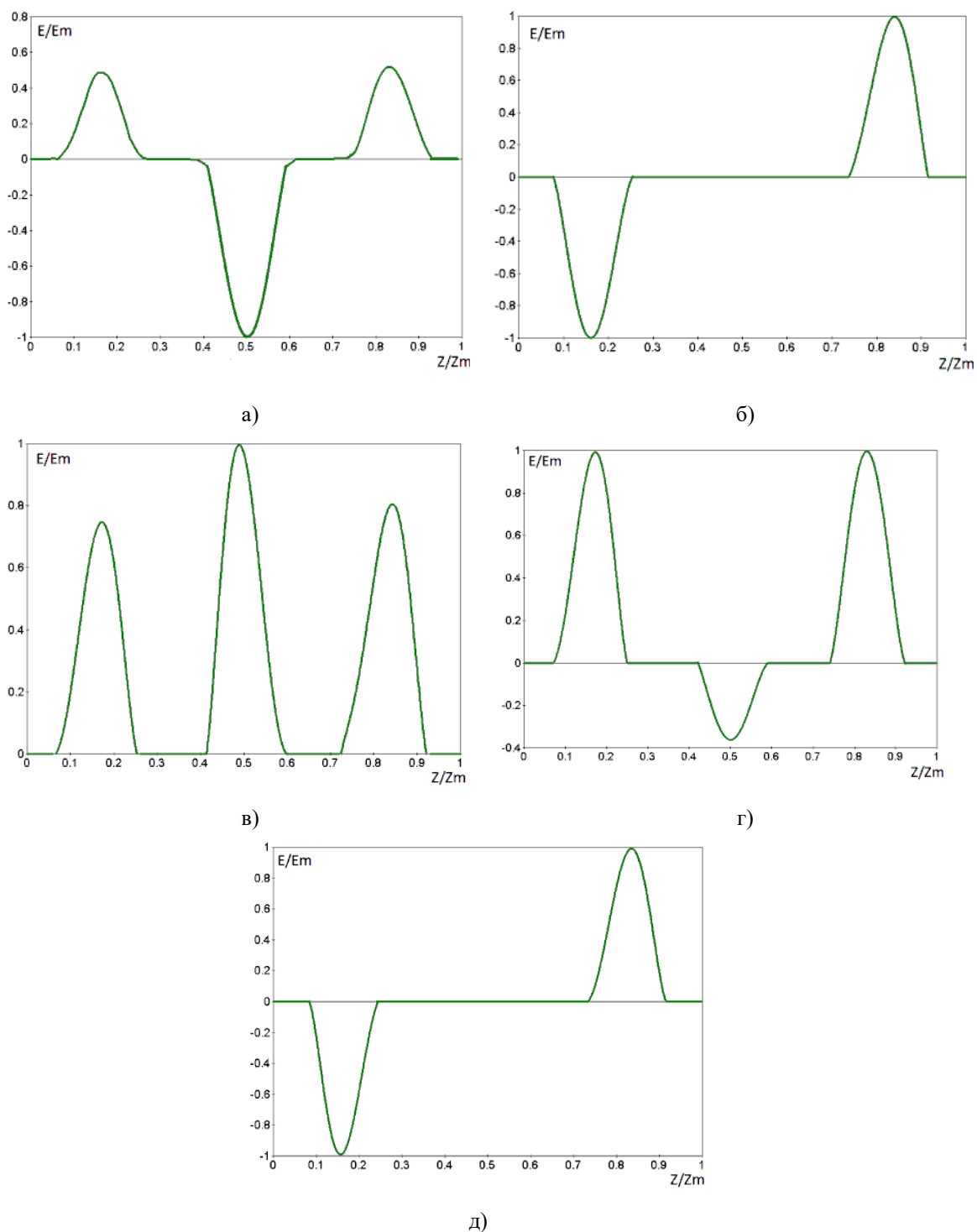


Рисунок 3. Результаты исследования электрического поля вдоль пространства взаимодействия: а – 1-я мода; б -2-я мода; в -3-я мода; г -4-я мода; д - 5-я мода.

Следует отметить, что для 1-й моды максимальная напряженность поля

наблюдается во втором зазоре, в первом и третьем напряженность примерно в два раза ниже. Для моды 2-й во втором зазоре поле отсутствует, при этом в первом и третьем зазорах поле практически одной амплитуды. Для моды 3-й максимальное поле во втором зазоре. Для моды 4-й при одинаковых полях в первом и третьем зазорах, во втором зазоре амплитуда поле 60% меньше. Для 5-й моды наблюдается картина поля, сходная с модой 2-й при отсутствии поля во втором зазоре.

4. Заключение

Исследован трехзазорный многоканальный резонатор с диэлектрической подложкой и полосковыми проводниками, размещенными на ней. Определены основные электродинамические параметры в диапазоне от 4 до 20 ГГц. Исследовано влияние на параметры резонатора использования двух и трех полосковых проводников. Проанализировано высокочастотное электрическое поле вдоль пространства взаимодействия. Подобный тип резонатора может быть применен в низковольтных малогабаритных клистродах, работающих как сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90191.

Список литературы

1. Востров М. С. Широкополосный миниатюрный многолучевой клистрон 2-см диапазона длин волн с полосой рабочих частот не менее 300 МГц и неравномерностью выходной мощности не более 1, 5 дБ // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов. – 2018. – С. 232-236.
2. Kotov A.S., Gelvich E.A., Zakurdayev A.D. Small-size complex microwave devices (CMD) for onboard applications // IEEE transactions on electron devices. – 2007. – Vol. 54. – №. 5. – P. 1049-1053.
3. Григорьев А.Д. Многозазорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб.– 2014. – С. 131-135.
4. Ракова Е.А. и др. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – СПб.– 2016. – Т. 1. – №. 1. – С. 148-152.
5. Елизаров А.А., Закирова Э.А. Инновационные технологии проектирования многослойных печатных плат диапазона СВЧ // Инновационные информационные технологии: материалы Междунар. науч.-практич. конф. – 2012. – С. 408-411.
6. Мучкаев В.Ю., Царев В.А. REZON // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. – 2011. – №. 2011611748. – С. 1.