

Изучение электродинамических свойств двухззорных фотонно- кристаллических клистронных резонаторов с фрактальными элементами «Греческий крест»

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

СГТУ им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в статье приведены результаты исследований двухззорного фотонно-кристаллического резонатора (Д-ФКР) с квазифрактальным элементом (КФЭ) типа «Греческий крест», выполненного на подвешенной диэлектрической подложке. С помощью 3D моделирования изучено поведение основных электродинамических параметров для основного противофазного и первого высшего (синфазного) типов колебаний в зависимости от номера итерации КФЭ и формы и размеров дефекта фотонно-кристаллической решетки, состоящей из металлических стержней. Показано, что при работе на противофазном виде колебаний наибольшее влияние на резонансную частоту, собственную добротность и характеристическое сопротивление оказывает КФЭ первой итерации. Результаты исследований могут быть использованы при разработке миниатюрных низковольтных многолучевых приборов клистронного типа, работающих в качестве усилителей, генераторов или умножителей частоты в X- и Ku-диапазонах частотного спектра.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, двухззорный фотонно-кристаллический резонатор, керамическая подложка, фрактальный резонансный элемент, Греческий крест

1. Введение

Создание мощных вакуумных малогабаритных СВЧ устройств нового поколения с улучшенными массогабаритными и спектральными характеристиками для перспективных радиоэлектронных систем является одним из актуальных направлений развития современной вакуумной СВЧ электроники [1].

Полоса усиливаемых частот, коэффициент усиления, выходная мощность и массогабаритные параметры СВЧ приборов (гиротронов и клистронов) в значительной мере зависят от конструкции и параметров применяемых резонаторов. Одними из распространенных улучшений выходных параметров и характеристик клистрона является применение в его конструкции двухззорных резонаторов, а также многолучевой электронно-оптической системы. Однако при создании миниатюрных многолучевых клистронов (ММЛК) коротковолновой части СВЧ диапазона разработчики этих приборов сталкиваются с серьезными проблемами. Эти проблемы связаны не только с трудностями изготовления малоразмерных элементов объемных резонаторов, но и с необходимостью подавления высших (паразитных) видов колебаний. Кроме того, с ростом частоты происходит резкое падение собственной добротности резонаторов Q_0 и характеристического сопротивления ρ . Помимо этого, при разработке приборов возникают также проблемы согласования входного и выходного резонаторов с волноведущими структурами. Все это затрудняет продвижение ММЛК в область более высоких частот.

В связи с этим большой интерес создателей СВЧ электровакуумных приборов и ускорителей заряженных частиц вызывают, так называемые, фотонно- кристаллические резонаторы (ФКР), выполненные на основе периодических структур из металлических

стержней (ФКР-М), имеющих дефектные зоны с электромагнитным полем, предназначенные для пропускания через них электронных лучей [2-4].

Новые, полезные для СВЧ приборов свойства ФКР (например, повышение характеристического сопротивления, увеличение добротности, уменьшение массы и габаритов) можно было бы получить в двухззорном ФКР (Д-ФКР) за счет введения в полосковый резонансный элемент, расположенной в центральной зоне дефекта, дополнительных фрактальных элементов типа «греческий крест» (см. рисунок 1). Перспективность применения таких резонансных структур для улучшения электродинамических параметров пассивных радиотехнических устройств СВЧ ранее была показана в ряде работ, например, на примере фильтровых систем [5].

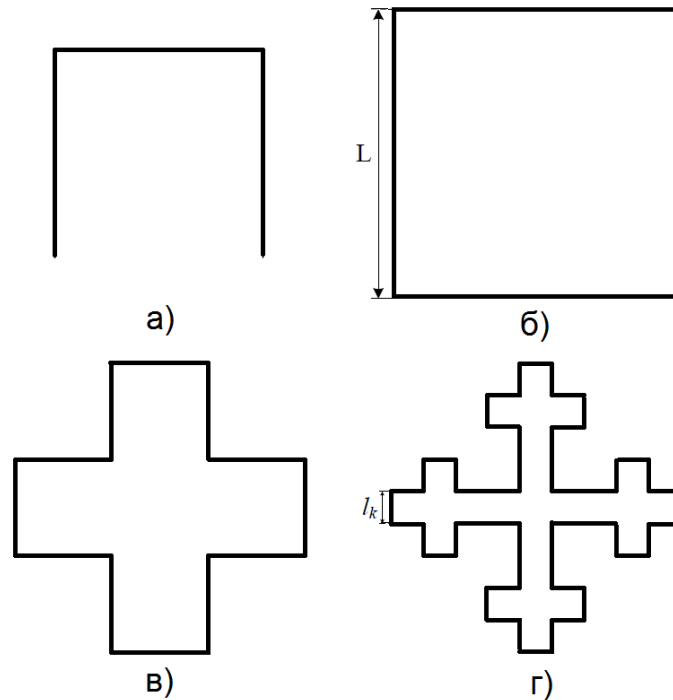


Рисунок 1. Начальные процедуры генерации фрактала типа «греческий крест»: а- генератор; б- инициатор-нулевая итерация; в -первая итерация; г - вторая итерация

В настоящее время электродинамические и электронные параметры новых резонансных систем (Д-ФКР) применительно к использованию их в ММЛК практически не исследованы.

Целью настоящей работы является изучение электродинамических параметров новых резонансных систем (Д-ФКР) применительно к использованию их в ММЛК, работающих в X- и Ku-диапазонах частотного спектра диапазона СВЧ.

2. Конструкция резонансной системы

Конструкция резонатора приведена на рисунке 2.

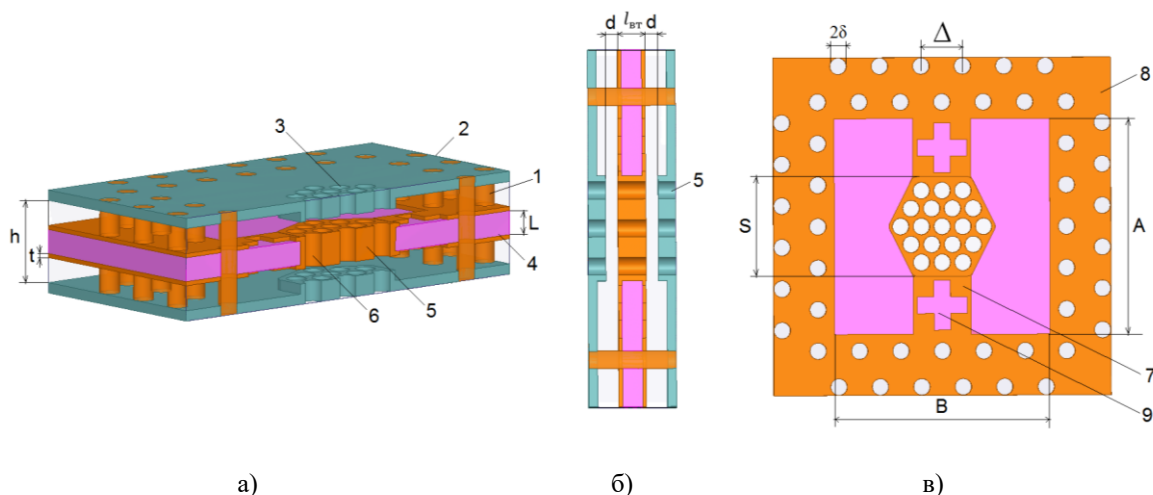


Рисунок 2. а - общий вид резонатора; б - поперечное сечение резонатора; в - вид сверху на керамическую подложку. Резонансная система имеет следующие размеры: $A=13$ мм, $h=4$ мм, $l_{вт}=1,6$ мм, $s=6$ мм, $d=0,7$ мм, $a=0,5$ мм, $\delta=0,5$ мм, $\Delta=2,5$ мм

Пространство взаимодействия Д-ФКР расположено внутри трехмерного дефекта, образованного металлическими стержнями 1 круглой формы с радиусом δ и шагом металлической решетки Δ . Они установлены по периметру прямоугольника со сторонами A , B . В продольном направлении пространство взаимодействия ограничено боковыми крышками 2, установленными друг относительно друга на расстоянии h . В крышках выполнены отверстия 3 для пропускания многолучевого электронного потока. В центральной части трехмерного дефекта на подвешенной диэлектрической подложке 4 толщиной L , (выполненной из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=5.7$), размещен центральный электрод (втулка) 5 с отверстиями 6 для пропускания 19 электронных лучей. Этот электрод имеет форму шестигранной призмы с высотой $l_{вт}$. Торцевые части призмы вместе с боковыми крышками, симметрично удаленными на расстояние d , образуют емкость двойного ВЧ зазора. Втулка соединена с четвертьволновыми резонансными проводниками 7, которые оканчиваются плоскими экранными проводниками 8, также имеющими в центральной части вырез квадратной формы ($A=B$) или прямоугольной формы ($A/B=1.62$). Все эти проводники расположены с разных сторон диэлектрической подложки, причем экранные проводники имеют непосредственную связь с землей. В средней части каждого из резонансных проводников 7 может быть выполнен фрактальный элемент 9. Форму этого элемента определяет номер итерации ($K=0,1,2$) фрактала «Греческий крест».

3. Результаты моделирования

В качестве инструмента для трехмерного моделирования использовалась программа REZON [6]. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Изучались электродинамические свойства только низшего противофазного (π) и первого высшего синфазного (2π) видов колебаний, так как они представляют наибольший интерес для практического использования в ММЛК.

Рисунок 3 иллюстрирует влияние фрактальных элементов (0,1,2 итерации) на резонансные частоты противофазного F_1 и синфазного видов колебаний F_2 , а также на величины собственной добротности Q_0 и характеристического сопротивления ρ .

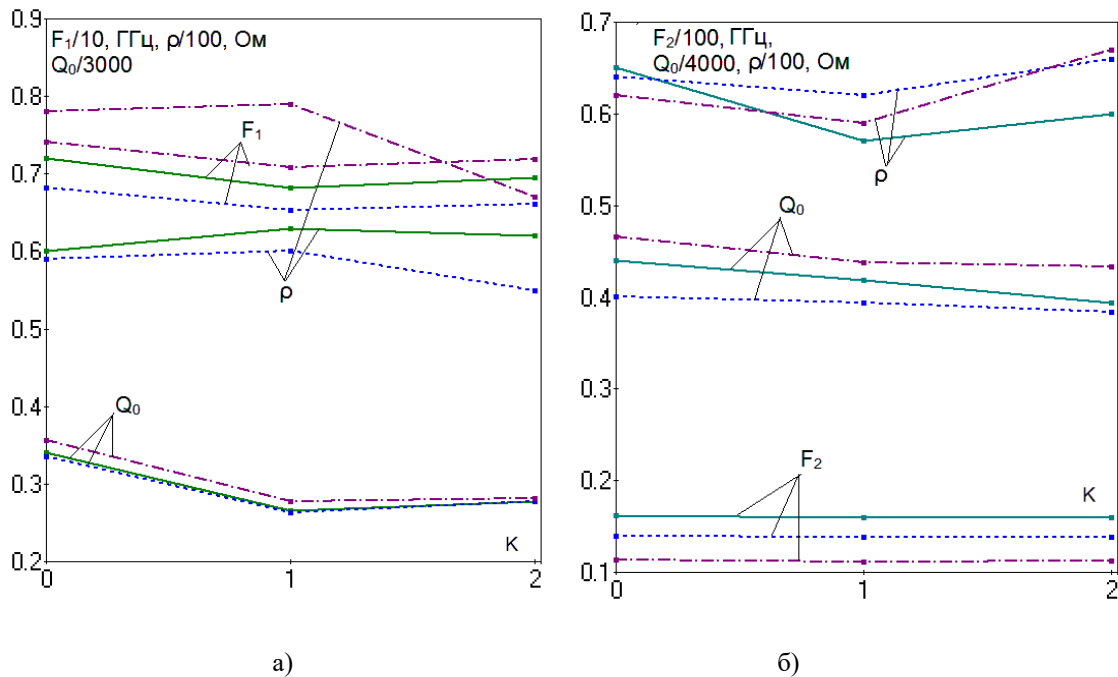


Рисунок 3. Изменение электродинамических параметров резонатора для трех итераций квазифрактального резонансного элемента для различных конфигураций резонаторов: а- противофазный вид колебаний; б- синфазный вид колебаний. — двухззорный резонатор с металлическим экраном прямоугольного сечения ($A/B=1.62$); - - - Д-ФКР с дефектом прямоугольного сечения с размерами ($A/B=1.62$); · - · - Д-ФКР с дефектом квадратного сечения

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- При переходе от обычного двухззорного резонатора с металлическим экраном прямоугольного сечения ($A/B=1.62$) к двухззорному ФКР с дефектом прямоугольного сечения ($A/B=1.62$) уменьшается (примерно на 2-3 %) частота, как основного вида колебаний (π), так и частота первого высшего вида колебаний. На π -виде колебаний при переходе от нулевой итерации фрактального элемента к первой частота уменьшается, затем при второй итерации увеличивается. Рабочая частота синфазного 2π - вида колебаний практически не зависит от номера итерации;
- Заметное изменение собственной добротности при переходе к Д-ФКР наблюдается только при работе на 2π - виде колебаний, причем изменения максимальны при $K=0$. При Д-ФКР с дефектом квадратного сечения добротность выше для трех итераций;
- Характеристическое сопротивление ρ на противофазном виде колебаний заметно увеличивается при переходе к Д-ФКР с дефектом квадратного сечения на первой итерации фрактального элемента. На синфазном виде колебаний изменение характеристического сопротивления проявляется меньше и наибольшее значение ρ наблюдается при $K=2$ для Д-ФКР с дефектом прямоугольного ($A/B=1.62$) и квадратного сечения.

4. Заключение

Результаты исследований могут быть использованы при разработке миниатюрных низковольтных многолучевых приборов клистронного типа, работающих в качестве усилителей, генераторов или умножителей частоты, в коротковолновой части СВЧ диапазона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00611.

Список литературы

1. Щербаков, С.В. Развитие СВЧ электроники в рамках реализации государственных программ / С.В. Щербаков // Электроника и микроэлектроника СВЧ: VI Всерос. науч.-техн. конф. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – С. 15-23.
2. Smirnov, A. V. PBG Cavities for Single-Beam and Multi-Beam Electron Devices / A. V. Smirnov, [et. al.] // Proceedings of Particle Accelerator Conference. - Portland, Oregon, USA. – 2003 - P. 1153-1155.
3. Xu, Y. Design of Photonic Crystal Klystrons / Y. Xu, R. Seviour // Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC 2010). - JACoW, Kyoto, Japan. – 2010. - P. 4002-4004.
4. Царев, В.А. Новые фрактальные и фотонно- кристаллические резонаторы для многолучевых вакуумных микроволновых приборов / В.А. Царев //Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. - Саратов, 2018. - Т. 1. - С. 449-458.
5. Lu, H.S. Compact Dual-mode Microstrip Bandpass Filter Based on Greek-cross Fractal Resonator / H.S. Lu, [et al.] // Radioengineering. - 2017. - Vol. 26. - № 1. - P. 275-284.
6. Мучкаев, В.Ю. REZON / В.Ю. Мучкаев, В.А. Царев/ Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011611748 от 24.02.2011 г.