

Исследование электродинамических характеристик двухззорного квазифрактального резонатора

А.Ю. Мирошниченко¹, М.А. Чернышев¹, Н.А. Акафьева¹, И.А. Емелин¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация: в данной работе исследовалась конструкция двухззорного квазифрактального резонатора. Получены результаты электродинамического моделирования. Исследован режим перестройки частот, а так же распределение ВЧ поля в пространстве взаимодействия резонатора. Резонатор может быть использован при создании малогабаритных и простых по конструкции СВЧ-генераторов, и усилителей.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, двухззорный квазифрактальный резонатор, Н-фрактал

1. Введение

Современные электровакуумные микроволновые приборы развиваются достаточно высокими темпами, при этом их развитие сопровождается повышением их мощности и эффективности, расширением частотных диапазонов. Для улучшения эксплуатационных характеристик приходится использовать специальные режимы работы, а также новые типы электродинамических систем [1].

Среди множества типов электровакуумных микроволновых приборов достаточно широко распространены многолучевые клистроны (МЛК), в которых несколько индивидуальных лучей, имеющих каждый сравнительно небольшой микропереванс, эффективно взаимодействуют с СВЧ-полями в зазорах резонаторов. При этом они имеют меньшее ускоряющее напряжение и улучшенные массогабаритные характеристики по сравнению с их однолучевыми аналогами [2]. Выходные параметры многолучевых клистронов существенным образом зависят от параметров резонансных систем.

В последние годы в радиоэлектронике особое внимание уделяется разработке и исследованию нетрадиционных конструкций резонансных систем – двухззорным фрактальным резонаторам (ДКФР). Такие резонаторы, также как и фрактальные антенны, могут быть эффективны при разработке многолучевых двухчастотных или многочастотных электронных приборов клистронного типа, работающих в качестве мощных усилителей, генераторов или умножителей частоты [3, 4].

Достоинством ДКФР является то, что за счет квазифрактальной формы индуктивной части резонатора существенно увеличивается путь ВЧ-тока в резонансных проводниках на π -виде колебаний, что позволяет увеличить его характеристическое сопротивление $\rho=R/Q_0$ и уменьшить габаритные размеры.

Целью работы является определение, с помощью численного 3-D моделирования, основных электродинамических параметров ДКФР, изучение процесса многомодового взаимодействия ДКФР с многолучевым электронным потоком, изучение возможности настройки резонатора на кратные резонансные частоты.

2. Конструкция резонатора

В работе исследован четырехлучевой ДКФР. В качестве основы электродинамической системы выбрана структура Н-фрактала, в котором начальный элемент напоминает заглавную букву Н (рис. 1а).

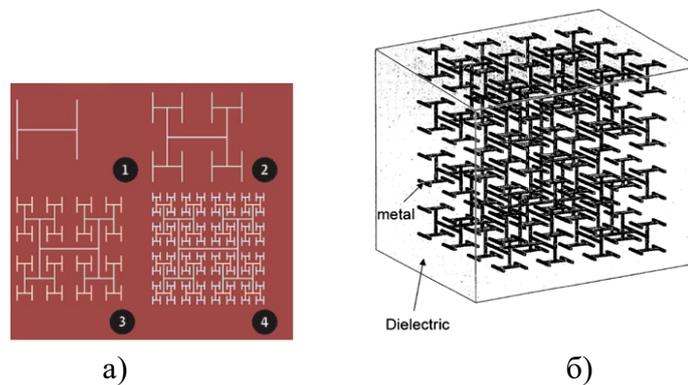


Рис. 1. Принцип создания H- фрактала (а); трехмерная (3D) фрактальная структура с H в качестве исходного элемента [5] (б).

H-фрактал или H-дерево — это самоподобный фрактал с все меньшими линейными сегментами, в котором отрезок линии разбивается на более мелкие линии в конце. Принцип H-фрактала имеет практическое применение в электронике, например, при создании микроволновых фильтров и антенн [5] и может быть сформирован из трехмерных H-фрактальных конфигураций (рис.1б).

Конструкция четырехлучевого ДКФР с обозначением основных характерных размеров показана на рис. 2. В ходе исследования были исследованы два конструктивных варианта резонатора, с четвертьволновым опорным стержнем, рис. 2а (конструкция №1), с полуволновым опорным стержнем, рис.2б (конструкция №2). На примере первого варианта рассмотрим конструкцию резонатора, которая представлена на рисунке 1. Он состоит из прямоугольного объемного резонатора 1, внутри которого располагается опорный стержень 2,

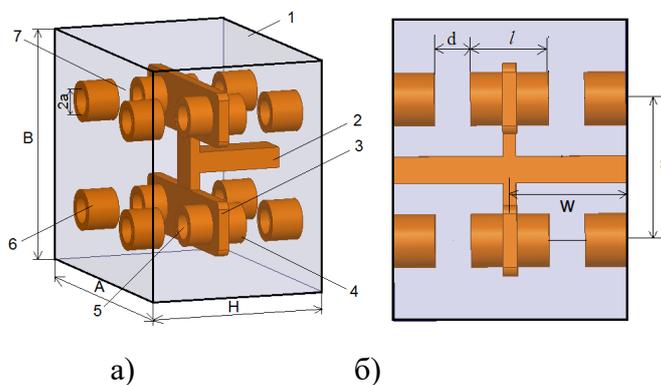


Рис. 2. 3D конструкция резонатора с четвертьволновым опорным стержнем (а), с полуволновым опорным стержнем (б).

закрепленный на боковой стенке объемного резонатора. С помощью вспомогательной соединительной перемычки опорный стержень соединен с двумя «ветвями» 3, на которых закреплены центральные пролетные втулки 4, имеющие отверстия 5 для пролета электронного потока. Боковые втулки 6, расположенные соосно с центральными втулками, также имеют отверстия для пролета электронного потока. Между центральными и боковыми втулками образованы восемь высокочастотных зазоров взаимодействия. Опорный стержень, совместно с двумя «ветвями» образуют четвертьволновую линию, которая нагружена на емкость высокочастотных зазоров.

Многолучевой электронный поток, попадая в резонатор через пролетные отверстия в боковых втулках, будет взаимодействовать с полями высокочастотных зазоров.

Результаты моделирования

Для трехмерного моделирования резонатора использован метод конечных элементов в частотной области. Были исследованы основные электродинамические параметры - резонансная частота, собственная добротность, характеристическое сопротивление, а также изучено распределение высокочастотного поля в зазорах резонатора. Результаты моделирования резонатора (конструкция №1) в диапазоне до 15 ГГц приведены в таблице 1.

Таблица 1. Электродинамические параметры резонатора (конструкция №1)

№ моды	1	2	3	4	5	6
Тип моды	π	π	π	π	2π	2π
Резонансная частота, f	2.559	4.848	6.938	7.873	10.491	12.787
Собственная добротность, Q	1370	1626	2687	2371	3612	4210
Характеристическое сопротивление,	243	123	116	95	117	168

В диапазоне до 15 ГГц спектр состоит из четырех частот противофазного типа (π), и трех синфазных мод (2π), которые расположены последовательно. Среди множества резонансных частот резонатора интерес в первую очередь вызывают те моды, которые имеют наибольшее характеристическое сопротивление, высокочастотное поле которых сконцентрировано в зазорах взаимодействия. Следует отметить, что наибольшее характеристическое сопротивление наблюдается среди противофазных мод на низшей моде, среди синфазных мод на моде № 6.

Также проведено исследование резонатора с полуволновым опорным стержнем конструкция №2, в диапазоне до 15 ГГц (таблица 3). В этой конструкции опорный стержень соединен с двумя противоположными боковыми стенками резонатора. Результаты расчета представлены в таблице 4. При этом спектр частот существенно отличается от конструкции с четвертьволновым опорным стержнем. Частота низшего противофазного вида в этом случае оказывается выше больше чем на 1.2 ГГц. Выше оказываются и другие частоты, наиболее существенное увеличение для первого синфазного вида колебаний (более 2.3 ГГц). Состав спектра также отличается, наблюдается четыре подряд синфазные моды, вместо трех в предыдущем случае. При этом характеристическое сопротивление ниже для всех противофазных мод, а для первой синфазной моды превышает значение для конструкций №1.

Таблица 2. Электродинамические параметры резонатора (конструкция №2)

№ моды	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип моды	π	π	π	π	2π	2π	2π	2π	π
Резонансная частота, f	3.835	4.954	6.989	7.917	11.714	12.879	13.462	14.583	14.945
Собственная добротность, Q	1525	1689	2550	2371	3474	3959	4119	4285	3797
Характеристическое сопротивление,	169	47	44	77	137	86	39	7	53

Исследование распределения ВЧ поля в пространстве взаимодействия резонатора

Исследовано распределение продольного высокочастотного электрического поля вдоль пространства взаимодействия резонатора для конструкции №1 резонатора. Проведенные исследования, результаты которых приведены на рис. 3, подтверждают тот факт, что исследуемый резонатор характеризуется неоднородным трехмерным распределением ВЧ электрического поля для разных частот вдоль пространства взаимодействия. На рисунке 3 приведено распределение продольного электрического поля в пространстве взаимодействия резонатора для 7 исследованных мод.

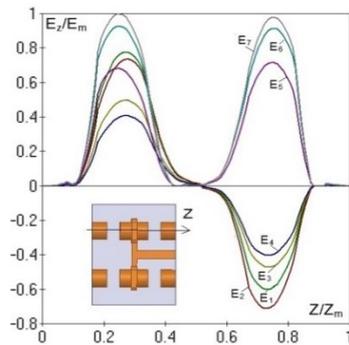


Рис. 3 Распределение продольного электрического поля в пространстве взаимодействия резонатора для исследованных мод.

Из рисунка 3 видно, что среди противофазных мод наибольшая неравномерность поля вдоль пространства взаимодействия в зазорах наблюдается на моде № 1 -15%, на моде № 2 3%, на моде №3 -6%, на моде №4- 2.5%. Среди синфазных мод наибольшая неравномерность на моде №5- 4.3%, на моде №6- 2.2%, на моде №7- 3%.

Исследование режима перестройки частот

Для конструкции резонатора №1 проведено исследование перестройки резонансных частот резонатора. В качестве перестроочных элементов при этом использовались две симметрично расположенные внутри корпуса резонатора тонкие металлические пластины, размещенные в поперечном направлении резонатора (рис.4, табл.4), На рисунке 4а также показано расположение перестроочных элементов.

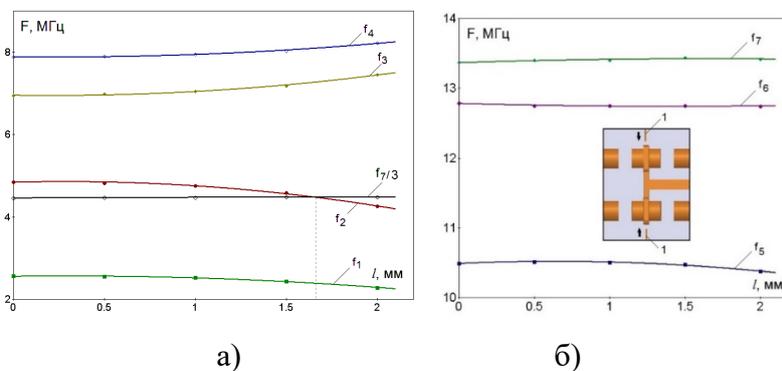


Рис. 4. Зависимости резонансных частот резонатора от ширины перестроочных элементов для случая перестройки пластинами, расположенными в поперечном направлении резонатора. а- π моды, б- 2 λ моды.

Таблица 3. Изменение частот резонатора при перестройке пластинами, расположенными в поперечном направлении резонатора.

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Смещение частоты, %	11	12.3	6.9	6.9	1.3	0.3	0.5

Максимальное смещение частот наблюдается на π модах, особенно на f_1 , f_2 , на синфазных модах смещение частот проявляется слабее. Перемещением подстроечных элементов можно добиться кратности частот резонатора. В этом случае можно наблюдать кратность частот, равную 3 на модах f_7 и f_2 при ширине перестроечных пластин 1.66 мм.

Заключение

Исследована новая конструкция четырехлучевого двухзачорного квазифрактального призматического резонатора для приборов клистронного типа. В качестве основного метода исследований резонатора выбран метод численного математического моделирования. Проведено исследование основных электродинамических параметров резонатора при различных вариантах конструктивного исполнения, четвертьволновый и полуволновый вариант. Найдены и исследованы ряд резонансных частот с синфазным и противофазным распределением высокочастотного электрического поля. Показано, что ряд противофазных и синфазных частот обладают повышенным характеристическим сопротивлением и перспективны для использования в резонаторе.

На основе предложенного ДКФР могут быть созданы высокоэффективные, малогабаритные и простые по конструкции СВЧ-генераторы и усилители сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, работающих в одно- и многочастотном режимах. Такие источники микроволновой энергии могут найти применение в радиолокации, в системах связи, дистанционного зондирования, навигации, медицине.

Список литературы

1. Acosta M. et al. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives //Applied Physics Reviews. – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 041305..
2. Вендик О. Г. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. – 1979
3. Semenov A. A. et al. Artificial multiferroic structures based on barium-strontium titanate //Journal of Materials Science. – 2016. – Т. 51. – С. 7803-7813.
4. Ненашева Е. А. и др. Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg //Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – №. 8. – С. 1468-1471.
5. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы: Пер. с англ. – Мир, 1965
6. Ржанов А. В. Титанат бария—новый сегнетоэлектрик //Успехи физических наук. – 1949. – Т. 38. – №. 8. – С. 461-489..
7. Струков Б. А. и др. Сегнетоэлектрический фазовый переход в кристаллах LaBSiO₅ по данным тепловых и диэлектрических измерений //Физика твердого тела. – 1998. – Т. 40. – №. 7..
8. Струков Б. А., Леванюк А. П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах: Учебное пособие. – 1983.
9. Старков А. С. и др. Оценка термодинамической эффективности твердотельного охладителя на основе мультикалорического эффекта //Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – №. 6. – С. 42-49.