## УДК 621.385

# Исследование влияния КПРР на диэлектрической подложке на электродинамические характеристики двухзазорного многоканального клистронного резонатора

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

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: представлены результаты исследования двухзазорного многоканального клистронного резонатора с дополнительным элементом в виде кольцевого планарного разрезного резонатора (КПРР). Проведен расчет основных электродинамических и электронных параметров. Показана возможность подавления мод в спектре резонатора с помощью изменения угла поворота КПРР на диэлектрической подложке. Резонатор может найти применение в многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

**Ключевые слова:** клистрон, резонатор, характеристические сопротивление, подавление частот, КПРР, метаматериал, спектральная характеристика

#### 1. Введение

В последнее время многолучевые клистроны (МЛК) находят широкое применение в технике сверхвысоких частот и их разработкой занимаются научные группы в России и за рубежом. Ведутся исследования и разработки мощных усилителей электромагнитных колебаний на основе МЛК различных диапазонов [1-4].

Известно, что во многом выходные параметры клистронного усилителя зависят от его электродинамической системы - резонаторов. У большинства клистронов резонаторы - однозазорные. Увеличения характеристического сопротивления, расширения полосы частот можно добиться применением двухзазорных резонаторов.

Наряду с этим в последнее время получают распространение различные электродинамические структуры с использованием метаматериалов (МТМ) [5-7]. Метаматериал, описанный впервые [8] как композитная среда с одновременно отрицательными магнитной восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью, основанный на периодическом массиве разнесенных проводящих немагнитных разрезных кольцевых резонаторов и прямолинейных проводников, которые образуют «левостороннюю» среду с экзотическими электромагнитными свойствами.

В основном метаматериалы находят применение в технике пассивных CBЧ-устройств. Это уникальные искусственные структуры, не имеющие аналогов в природе, которые модифицируют диэлектрическую и магнитную проницаемости объектов, вплоть до отрицательных значений. Обычно с помощью подобных структур можно создавать полосы запирания в фильтровых системах или формировать требуемые полосы частот антенн [9]. Исследованиям по применению МТМ в различных приборах вакуумной электоники и ускорителях был посвящен ряд работ [10-11]. Однако, вопросы применения метаматериала, и как частный случай КПРР в двухзазорных клистронных резонаторах, а также влияние этих элементов на электродинамические параметры резонаторов не исследованы.

Целью данной работы являлось изучить влияние КПРР, а также его положения относительно диэлектрической подложки, на частотный спектр и электродинамические параметры двухзазорного многоканального резонатора. Для

расчета электродинамических параметров резонатора использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в частотной области.

#### 2. Конструкция двухзазорного многканального резонатора

Конструкция исследуемого двухзазорного многоканального клистроного резонатора приведена на рисунке 1. Он состоит из цилиндрического корпуса 1, диэлектрической подложки 2 с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_r$ =2.1 и толщиной h=1,5 мм, КПРР элемента 3, полосковой четвертьволновой линии 4, центрального электрода 5 с пролётными каналами и двух боковых электродов 6 также с пролётными каналами. Центральный электрод 5 резонатора соединён с полосковой линией 4, которая располагается на одной стороне подложки. В свою очередь полосковая линия 4 электрически соединена с корпусом объёмного резонатора 1. На другой стороне подложки 2, которая выполнена, например из алмаза, расположен КПРР элемент 3. Между боковыми электродами и центральным электродом образованы два высокочастотных зазора взаимодействия. Основные размеры резонатора приведены в таблице 1.



Рисунок 1. Конструкция двухзазорного многоканального резонатора.

Таблица 1. Основные размеры резонатора

| Н, мм  | <b>D</b> 1, мм | <b>D</b> 2, мм | d/a            | а, мм          | L1, мм | L2, мм |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|
| 50     | 60             | 13             | 1,33           | 3              | 15     | 12     |
| L3, мм | <b>R</b> 1, мм | <b>R</b> 2, мм | <b>R</b> 3, мм | <b>R</b> 4, мм | h, мм  | t, мкм |
| 4      | 12             | 14             | 18             | 20             | 1,5    | 250    |

#### 3. Результаты исследования резонатора

Исследовались четыре конструкции резонатора, представленные на рисунке 2: без КПРР; с КПРР, расположенным под углом α=0°; с КПРР, расположенным под углом α=90° и с КПРР, расположенным под углом α=180°. Обычно подобные резонаторы, применяемые в приборах клистронного типа, работают либо на низшем типе колебаний второй обеспечиваются ИЛИ на моде, при которых высокие Исследование электродинамические параметры. резонаторов проводилось диапазоне до 5 ГГц. Результаты расчета приведены в таблице 2.



**Рисунок 2.** Исследуемые модели резонатора: а - без КПРР; б - с КПРР, расположенным под углом  $\alpha=0^\circ$ ; в - с КПРР, расположенным под углом  $\alpha=90^\circ$ , г - с КПРР, расположенным под углом  $\alpha=180^\circ$ .

| Manager | Тип       | Резонатор без КПРР      |         |        | Тип                      | Резонатор с КПРР, α=0° |            |        |
|---------|-----------|-------------------------|---------|--------|--------------------------|------------------------|------------|--------|
| л⁰ моды | колебаний | F, ГГц                  | Q       | ρ, Ом  | колебаний                | F, ГГц                 | <b>Q</b> 0 | ρ, Ом  |
| 1       | π         | 1,32951                 | 2904,36 | 295,99 | π                        | 1,26373                | 1814,01    | 288,17 |
| 2       | 2π        | 2,21092                 | 8401,27 | 244,74 | 2 π                      | 2,21112                | 8081,72    | 221,51 |
| 3       | π         | 3,41824                 | 4980,90 | 24,425 | π                        | 3,45608                | 3195,14    | 13,531 |
| NC.     | Тип       | Резонатор с КПРР, α=90° |         | Тип    | Резонатор с КПРР, α=180° |                        |            |        |
| № моды  | колебаний | F, ГГц                  | Q       | ρ, Ом  | колебаний                | F, ГГц                 | Q          | ρ, Ом  |
| 1       | π         | 1,26999                 | 2204,27 | 259,66 | π                        | 1,26430                | 1816,25    | 291,86 |
| 2       | 2π        | 2,21143                 | 8012,72 | 245,84 | 2π                       | 2,21151                | 8085,57    | 222,34 |
| 3       | π         | 3,50276                 | 3080,51 | 27,028 | π                        | 3,45240                | 3185,35    | 10,44  |

Таблица 2. Результаты расчета электродинамических параметров резонаторов

Из результатов, представленных в таблице 2 видно, что в диапазоне до 5 ГГц спектр представлен колебаниями как противофазного ( $\pi$ ) а, так и синфазного ( $2\pi$ ) типов. При сравнении «чистого» резонатора и резонатора с КПРР можно отметить следующее. Введение КПРР снижает частоту первой противофазной моды примерно на 5%, в дальнейшем частота при повороте КПРР на 90 и 180 градусов практически не изменяется. На частоту синфазной моды ( $2\pi$ ) введение КПРР при разных углах поворота не оказывает воздействия. А вот второй противофазный вид колебаний при введении в конструкцию КПРР дает увеличение по частоте максимум около 2,3% при угле 90 градусов относительно исходного значения.

Добротность низшего  $\pi$  вида при введении КПРР снижается максимум на 37,5% при исходном положении КПРР, при его повороте на 90 градусов увеличивается на 21%. Добротность на 2  $\pi$  виде колебаний снижается при введении КПРР максимум на 4,6% при угле поворота 90%. Добротность высшего противофазного типа снижается максимум на 38,1% при угле поворота 90%.

Характеристическое сопротивление при введении КПРР на первой противофазной моде уменьшается максимум на 12,2% при угле поворота 90 градусов. Для синфазной 2  $\pi$  моды характеристическое сопротивление уменьшается максимум на 9,5% при  $\alpha$ =0°. На высшей противофазной моде характеристическое сопротивление существенно ниже, чем на первых двух модах, при этом максимальное уменьшение параметра при вводе КПРР достигает 57%.

Одним из этапов работы было исследование влияния КПРР на спектр колебаний резонатора. На рисунках 3-5 приведены спектральные зависимости для исследуемых конструкций резонатора, на которых оценивалось резонансное сопротивление резонаторов ( $R_0 = \rho \times Q_0$ , где  $\rho$ -характеристическое сопротивление резонатора,  $Q_0$  - собственная добротность) в зависимости от частоты.



Рисунок 3. Спектральная характеристика исследуемых резонаторов для первой моды.



Рисунок 4. Спектральная характеристика исследуемых резонаторов для второй моды.



Рисунок 5. Спектральная характеристика исследуемых резонаторов для третьей моды.

Из приведённых результатов видно, во-первых, что на первой моде при добавлении КПРР происходит смещение частоты вниз по диапазону с уменьшением

резонансного сопротивления для каждой конструкции с КПРР примерно в 1,58 раз. На вторую моду КПРР оказывает слабое влияние, что можно объяснить тем, что это «объемный вид колебаний», частота которого определяется в основном геометрией цилиндрического резонатора. При этом резонансное сопротивление уменьшается в 1,1 раз. На третьей моде при добавлении КПРР и изменении угла поворота происходит сдвиг частоты вверх по диапазону, при этом при угле поворота на 0° или 180° заметно явное подавление частоты и резонансное сопротивление уменьшается 3,18 раз, а при угле поворота 90° резонансное сопротивление уменьшается в 1,46 раз.

### 4. Заключение

Исследовано влияние КПРР с разным углом поворота на электродинамические параметры резонатора. С помощью трехмерного моделирования проведено изучение основных электродинамических параметров в диапазоне до 5 ГГц. Резонатор имеет малогабаритную конструкцию и высокие электродинамические параметры на первых двух модах. Изучено влияние угла поворота КПРР на спектр частот и электродинамические параметры. Отмечено различное снижение эквивалентного резонансного сопротивления при разных углах поворота КПРР. Это может найти применение при подавлении в резонаторе нежелательных мод. При этом для синфазного вида колебаний уменьшения резонансного сопротивления практически не наблюдается. В качестве дальнейших исследований намечено исследовать влияние изменения диаметра КПРР на электродинамические характеристики резонатора. Подобный двухзазорный многоканальный резонатор может найти применение в многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

#### Список литературы

- 1. Галдецкий А. В., Голованов Н. А. Многолучевые клистроны с радиальным расположением лучей // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф.-СПб. 2023. С. 4-9.
- 2. Kant D. et al. Design studies for a 2 kW (CW) power L/S band multi beam Klystron // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE, 2018. P. 111-112.
- Bansiwal A. et al. Equivalent circuit analysis of a rectangular double-reentrant cavity with circular cylindrical ferrule for klystrons // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. Iss. 66. №. 11. P. 4952-4956.
- 4. Shen B. et al. Research and development of S-band high power multibeam klystron //IEEE transactions on electron devices. 2014. Iss. 61. №. 6. P. 1848-1853.
- 5. 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.
- 6. Smith D. R. et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials //Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2005. Iss. 71. №. 3. P. 036617.
- Тихонов Ю. С. и др. Двухзазорный многолучевой резонатор с метаматериалом с возможностью подавления высших мод // Сб. докл. XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». –Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ. – 2024. – С. 395-399.
- 8. Smith D. R. et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity //Physical review letters. 2000. Iss. 84. №. 18. P. 4184.
- 9. da Silva I. B. T. et al. Design of microstrip patch antenna with complementary split ring resonator device for wideband systems application //Microwave and Optical Technology Letters. 2015. T. 57. №. 6. C. 1326-1330.
- Wang X. et al. Recent advances in metamaterial klystrons //EPJ Applied Metamaterials. 2021. Iss. 8. P. 9.
- 11. Zhang X. et al. Metamaterial-inspired interaction structure for MW-level klystron at 714 MHz //IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Iss. 69. №. 11. P. 6336-6341.