

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/49-199](http://mathmod.esrae.ru/49-199)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тихонов Ю.С., Мирошниченко А.Ю., Акафьева Н.А. Исследование двухзазорного клистронного резонатора с полосковыми проводниками на диэлектрической подложке и дополнительными элементами из метаматериала // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2025. №1

УДК 621.385

DOI:10.24412/2541-9269-2025-1-3-9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗАЗОРНОГО КЛИСТРОННОГО РЕЗОНАТОРА С ПОЛОСКОВЫМИ ПРОВОДНИКАМИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

Тихонов Ю.С., Мирошниченко А.Ю., Акафьева Н.А.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, drbonesssss@gmail.com

## RESEARCH OF A DOUBLE-GAP KLYSTRON RESONATOR WITH STRIP CONDUCTORS ON A DIELECTRIC SUBSTRATE AND ADDITIONAL ELEMENTS MADE OF METAMATERIAL

Tikhonov Yu.S, Miroshnichenko A.Yu., Akafyeva N.A.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,  
Saratov, drbonesssss@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования миниатюрного клистронного резонатора с полосковыми проводниками на диэлектрической подложке с включёнными в них элементами метаматериала в виде кольцевого планарного разрезного резонатора электрического типа. Проведён расчёт электродинамических и электронных параметров резонатора в широком частотном диапазоне. Преимуществами данной конструкции, являются малые габариты и масса резонатора, а также возможность подавления высших мод. Резонатор может найти применение в миниатюрных многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

Ключевые слова: миниатюрный клистрон, подавление высших мод, метаматериал, многоканальный резонатор.

**Abstract.** The report presents the results of research of a miniature klystron resonator with strip conductors on a dielectric substrate with included metamaterial elements in the form of a Complementary Split Ring Resonator (CeSRR) of electric type. The calculation of electrodynamic and electronic parameters of the resonator in a wide frequency range is carried out. The advantages of this design are the small dimensions and weight of the resonator, as well as the ability to suppress higher modes. The resonator can be used in miniature multibeam klystron-type devices for various telecommunication and communication systems.

Key words: miniature klystron, suppression of higher modes, metamaterial, multichannel resonator.

## 1. Введение

Многолучевые клистроны (МЛК) находят широкое применение в технике сверхвысоких частот (СВЧ) и их разработкой занимаются различные научные группы в России и за рубежом. Ведутся исследования по разработке мощных усилителей электромагнитных колебаний на основе МЛК различных диапазонов [1-4]. Кроме мощных и сверхмощных МЛК, разрабатываются также миниатюрные МЛК для применения в бортовой аппаратуре [5-6]. Они представляют большой интерес для различных приложений, таких как телекоммуникация, навигация, радиолокация.

Известно, что во многом выходные параметры клистронного усилителя зависят от его электродинамической системы - резонаторов. При этом большинство резонаторов клистронов - однозачорные. Увеличения характеристического сопротивления, расширения полосы частот можно добиться применением двухзачорных резонаторов.

Наряду с этим в последнее время получают распространение различные электродинамические структуры с использованием метаматериалов (МТМ) [7-8]. Метаматериал, был описан в [7-10] как композитная среда с одновременно отрицательной проницаемостью и диэлектрической проницаемостью, основанный на периодическом массиве разнесенных проводящих немагнитных разрезных кольцевых резонаторов и непрерывных проводов, которые образуют «левостороннюю» среду с экзотическими электромагнитными свойствами.

В основном они находят применение в резонаторах, фильтрах, фазовращателях, антеннах. Это уникальные искусственные структуры, не имеющие аналогов в природе, которые модифицируют диэлектрическую и магнитную проницаемости объектов, которые принимают отрицательные значения. Исследованиям возможности применения МТМ в различных приборах вакуумной электроники и ускорителях посвящено ряд работ [11-17]. Это лампа с бегущей волной, лампа с обратной волной и клистроны. При использовании МТМ удастся реализовать преимущества по сравнению с классическими приборами, такие как уменьшенные массогабаритные параметры, возможность управления спектром колебаний резонансной системы.

Целью данной работы являлось оценить влияние МТМ на частотный спектр и электродинамические параметры клистронного резонатора. В данной статье приведены результаты исследований двухзачорного многолучевого клистронного резонатора с полосковыми проводниками на диэлектрической подложке с включёнными в них элементами МТМ. Для расчета электродинамических параметров резонатора и МТМ использовался метод конечных элементов (МКЭ), который был реализован в частотной области.

## 2. Конструкция резонатора

В качестве метаматериала была использован кольцевой планарный разрезной резонатор электрического типа (КПРР) (рисунок 1), который в источнике [13] применен в лампе бегущей и обратной волны в качестве элемента лестничной структуры, на которую нагружен волновод. КПРР имеет следующие габаритные размеры, в миллиметрах:  $c=1,688$ ;  $h_1=0,644$ ;  $h_2=0,624$ ;  $j=0,12$ ;  $g=0,08$ ;  $d=0,08$ .

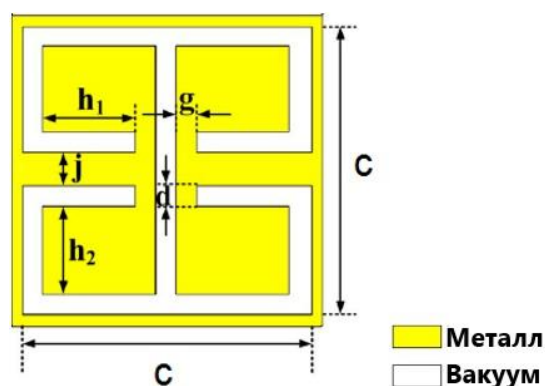


Рис.1.

На рисунке 2(а) показан исследуемый двухззорный резонатор. Он состоит из объемного корпуса 1, четырёх микрополосковых линий (МПЛ) 2 толщиной 0,25 мм, КПРР элемента 3, алмазной подложки 4, центрального электрода 5 с пролетными каналами для электронного потока 6, двух боковых электродов 7 также имеющих пролетные каналы. Центральный электрод 5 резонатора, имеющий квадратную форму соединен с четырьмя двухсторонними МПЛ 2 и расположены на алмазной подложке 4. В свою очередь МПЛ электрически соединены с объемным корпусом резонатора. В середине каждой из МПЛ расположены по одному КПРР, которые выполнены в виде целевой линии. Между боковыми электродами и центральным электродом образованы два высокочастотных зазора взаимодействия. Габаритные размеры резонатора представлены на рисунке 2(б) и в таблице 1.

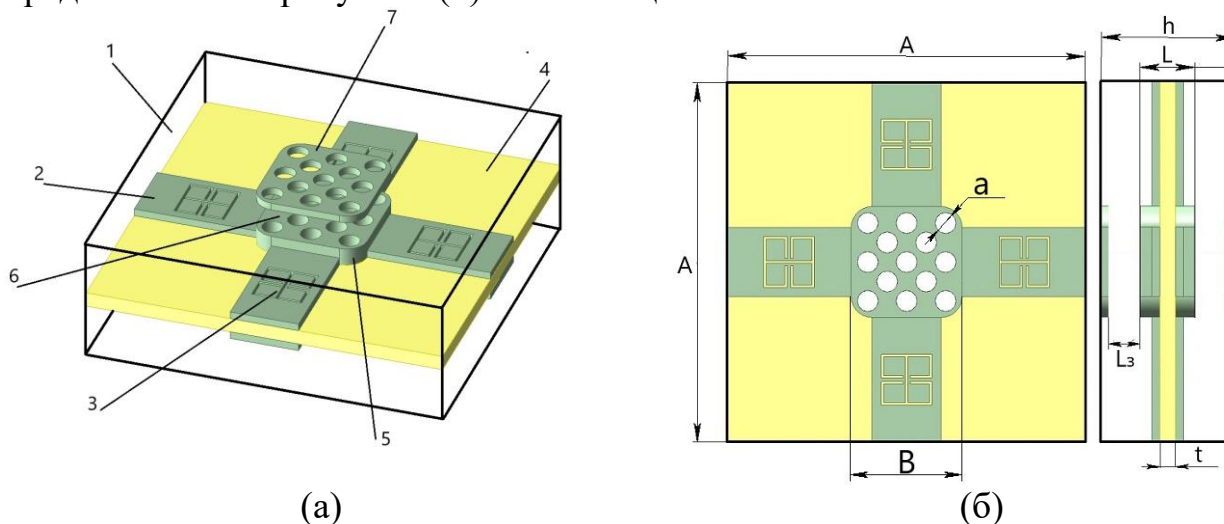


Рис.2.

Таблица 1. Габаритные размеры резонатора.

Параметр	Размер
A, мм	12
B, мм	3,7
a, мм	0,7
h, мм	4,22
L, мм	1,72
t, мм	0,5
L <sub>3</sub> , мм	1

### 3. Результаты расчёта электродинамических параметров

Ранее [18] было проведено исследование аналогичного резонатора, но без применения диэлектрической подложки. Применение диэлектрической подложки придает резонатору ряд новых свойств, в частности добавляет новые резонансные частоты и позволяет уменьшить габаритные размеры. Исследование резонатора проводилось в диапазоне от 10 до 40 ГГц. Результаты исследования резонатора приведены в таблице 2 для мод  $\pi$  и  $2\pi$ , также в данной таблице приведено сравнение с конструкцией [18].

Таблица 2. Результаты электродинамического расчёта.

	№ моды	Тип колебаний	F, ГГц	Q	$\rho$ , Ом
[18]	1	$\pi$	13,69	1451,42	79,29
	2	$2\pi$	15,35	2477,98	71,18
Исследуемая конструкция	1	$\pi$	13,12	1214,64	74,96
	2	$2\pi$	15,29	1597,03	66,65

По результатам расчёта резонатора можно оценить влияние подложки с расположенными на ней МПЛ с КППР. Видно, что частота низшего противофазного колебания, при добавлении подложки с расположенными на ней МПЛ с КППР уменьшается на 4,16%, собственная добротность уменьшается на 16,31%, характеристическое сопротивление падает на 5,46%. Частота низшего синфазного колебания при добавлении подложки с расположенными на ней МПЛ с КППР незначительно уменьшается на 0,39%, собственная добротность падает на 35,5%, при этом характеристическое сопротивление падает на 6,36%.

На рисунке 3 представлена зависимость параметра  $S_{21}$  от частоты для резонатора [18] и исследуемого резонатора. Из приведённых результатов видно, полное подавление мод с частотой 27,3 и 28,5 ГГц, при этом видно частоты исследуемой конструкции имеют сдвиг вниз по частотному диапазону. Следует заметить, что у моды с частотой 30,8 ГГц отсутствует ослабление в сравнении с модой [18] на частоте 32,6 ГГц.

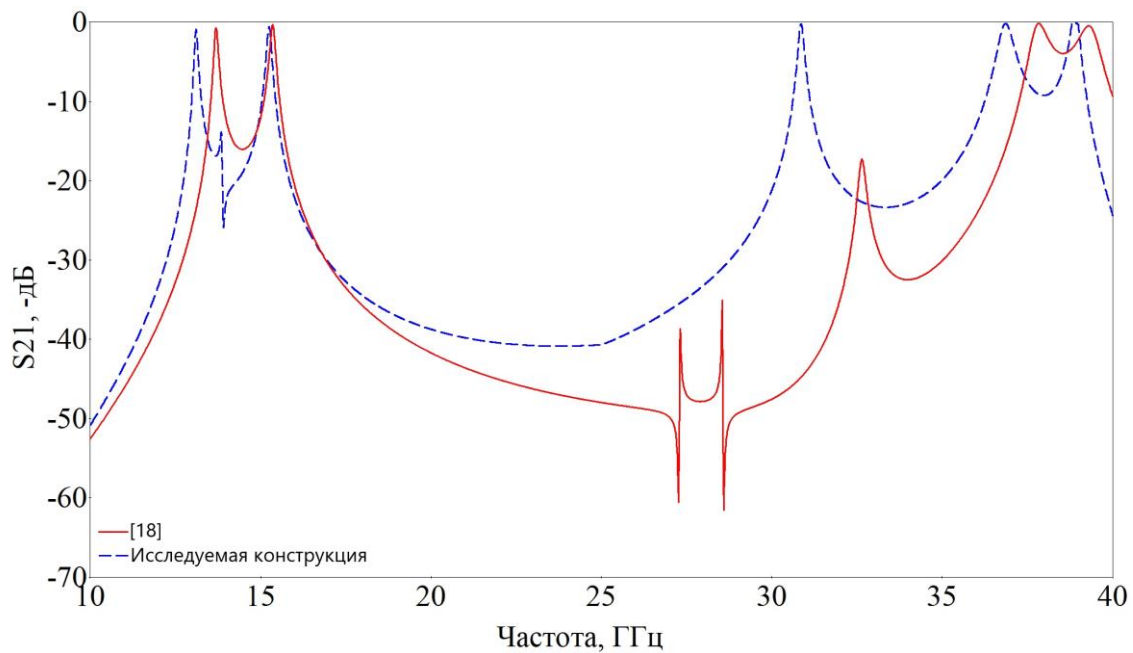


Рис. 3.

#### 4. Результаты расчёта электронных параметров

На рисунке 4 приведены результаты расчёта электронных параметров резонатора с подложкой с расположенными на ней МПЛ с КППР на противофазном ( $\pi$ ) и синфазном типах колебаний ( $2\pi$ ): зависимости коэффициента эффективности взаимодействия  $M$  (1, 3) и относительной электронной проводимости  $Ge/G_0$  (2, 4) от ускоряющего напряжения.

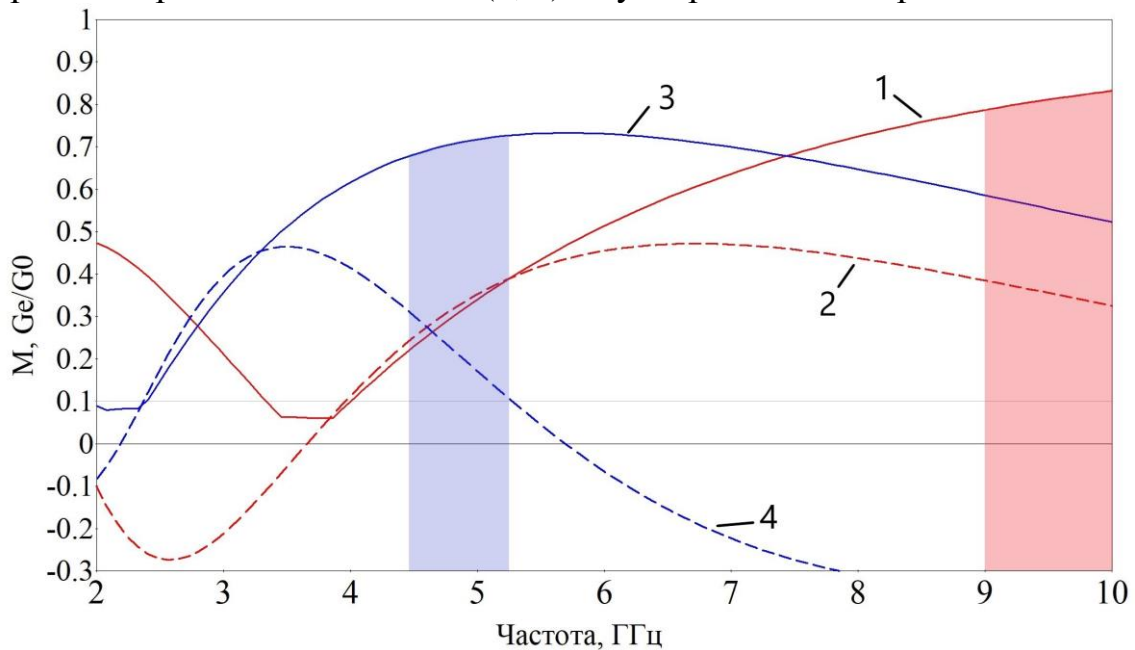


Рис. 4.

Из приведённого расчёта видно, что для противофазного вида колебаний оптимальный режим находится в диапазоне высоких напряжений (от 9 до 10 кВ), электронная проводимость  $Ge/G_0$  (2) положительна и самовозбуждение

отсутствует, коэффициент взаимодействия достигает значений  $M=(0,79-0,83)$  (1).

Для синфазного вида колебаний оптимальный режим находится в диапазоне от 4,5 до 5,2 кВ, электронная проводимость  $Ge/G0 > 0,1$  (4) – самовозбуждение отсутствует, коэффициент взаимодействия достигает значений  $M=(0,68-0,72)$  (3).

### Заключение

В статье приведены результаты численного моделирования миниатюрного двухззорного резонатора многолучевого клистрона с применением алмазной подложки с расположенными на ней МПЛ с КППР в диапазоне частот от 10 до 40 ГГц.

Подложка с расположенным на ней МПЛ с КППР оказывает влияние на все электродинамические параметры. При этом в сравнении с конструкцией [18] в диапазоне около 27 ГГц происходит явное подавление спектра частот при введении в структуру резонатора КППР. Такой метод может быть полезен, например, для отстройки от паразитных мод, на которых возможно взаимодействие с электронным потоком.

Исследованный резонатор может найти применение в миниатюрных многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

### Литература

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. Комаров Д.А., Якушкин Е.П., Парамонов Ю.Н. Многолучевые клистроны: численный анализ предельно достижимых значений электронного КПД // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб. – 2021. – С. 235-240.
3. 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. – С. 111-112.
4. Gu H. et al. Research and Development of S-Band High Power Multibeam Klystron // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Т. 61. - № 6. – С. 1848-1853.
5. Kumar M. et al. Design of a High Frequency Miniature Multi Beam Klystron (MBK) // 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2011. – С. 321-322.
6. Vancil B. et al. Miniature Klystron for CubeSats // 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC). – IEEE, 2020. – С. 47-48.
7. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. - 1967. - №92 (3). - С. 517-526.

8. Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Physical Review Letters. - 2000. - №85 (18). - С. 3966-3969.
9. Luo C., Johnson S. G., Joannopoulos J. D. All-angle negative refraction without negative effective index // Physical Review B. - 2002. - №65. - С. 201104-1 - 201104-4.
10. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // Журнал технической физики. – 2013. - № 1. – С. 3-28.
11. Duan Z. et al. Metamaterial-Inspired Vacuum Electron Devices and Accelerators // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. - Т. 66. - № 1. С. - 207-218.
12. Wang X. et al. Recent advances in metamaterial klystrons // EPJ Applied Metamaterials. – 2021. - Т. 8. - № 9. – С. 1-8.
13. Duan Z. et al. Sub-wavelength waveguide loaded by a complementary electric metamaterial for vacuum electron devices // Physics of Plasmas. – 2014. – Т. 21. - № 10. – С. 1-6.
14. Wang X. et al. Duan Novel S-Band Metamaterial Extended Interaction Klystron // IEEE Electron Device Letters. - 2020. - №41 (18). - С. 1580-1583.
15. Zhang X. et al. Miniaturized P-Band MW-Level Klystron With CeSRRs for CSNS Linac Application // IEEE Transactions on Electron Devices. - 2023. - №70 (9). - С. 4878-4884.
16. Zhang X. et al. A Miniaturized kW-Level Metamaterial-Inspired Extended Interaction Klystron at 650 MHz // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). - Chengdu, China: IEEE, 2023. - С. 1-2.
17. Wang X. et al. A miniaturized high-gain, high-efficiency metamaterial assisted S-band extended interaction klystron // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). - Busan, Korea (South): IEEE, 2019. - С. 1-2.
18. Tikhonov Yu.S. et al. Klystron Double-Gap Resonator with Integration of CeSRR Elements into the Resonance System // 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). - Saratov, Russian Federation: IEEE, 2024. - С. 61-64.