

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.7>

УДК: 621.385.69

## ТРЕХАЗОРНЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ МИНИАТЮРНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА

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

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Статья поступила в редакцию 6 июля 2021 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования трехазорного резонатора для миниатюрного многолучевого клистрона. Особенностью резонатора является применение в конструкции подвешенной диэлектрической подложки с расположенными на ней полосковыми резонансными проводниками. Были рассчитаны основные электродинамические параметры резонатора. Проведен анализ высокочастотного электрического поля вдоль пространства взаимодействия для каждой из мод. Для противофазной и синфазной мод показана возможность настройки резонатора на кратные резонансные частоты. Рассчитаны электронные параметры для режима кратности частот. Исследованный резонатор может найти применение в миниатюрных многолучевых клистронах сантиметрового и миллиметрового диапазона.

**Ключевые слова:** трехазорный резонатор, миниатюрный многолучевой клистрон, подвешенная диэлектрическая подложка, полосковый проводник, противофазная мода, синфазная мода.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of a three-gap resonator for a miniature multi-beam klystron. A feature of the resonator is the use in the construction of a suspended dielectric substrate with strip resonant conductors located on it. The main electrodynamic parameters of the resonator were calculated. The analysis of the high-frequency electric field along the interaction space is carried out for each of the modes. For the antiphase and in-phase modes, the possibility of tuning the resonator to multiple resonant frequencies is shown. Electronic parameters were calculated for the

frequency multiplicity mode. The investigated resonator can find application in miniature multi-beam klystrons of the centimeter and millimeter range.

**Key words:** three-gap resonator, miniature multi-beam klystron, suspended dielectric substrate, strip conductor, antiphase mode, in-phase mode.

## Введение

Активное освоение микроволнового диапазона требует разработки новых типов высокоэффективных генераторов и усилителей. Для бортовой аппаратуры кроме высоких выходных параметров такие приборы должны удовлетворять строгим требованиям по массогабаритным характеристикам. Чтобы решить противоречие между увеличением функциональности и уменьшением веса и габаритов приборов, были предложены различные варианты комплексированных устройств, например [1]. На предприятии АО «НПП «Исток» были разработаны так называемые complex microwave devices (CMD) [2-3]. Так как рабочее питающее напряжение CMD должно быть достаточно низким, в таких устройствах необходим низковольтный выходной усилитель.

Одним из кандидатов на такую роль выходного усилителя является многолучевой клистрон (МЛК) [4-5]. Преимущества таких приборов давно известны. Это высокий уровень средней и импульсной мощности при низких питающих напряжениях, малые масса и габаритные размеры, относительно широкая полоса рабочих частот. Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) находят в настоящее время широкое применение в бортовых передатчиках радиосистем различного назначения (РЛС, навигация, связь). Число лучей ММЛК обычно выбирается равным 18 или 19 при рабочих напряжениях 2,5-3 кВ, коэффициенте усиления 35-45 дБ и уровне выходной импульсной мощности до 1 кВт [6-7].

Известно, что для получения высокого КПД выходной резонатор клистрона должен иметь высокое эквивалентное сопротивление  $R_e = \rho Q_n$ , где  $\rho$  – волновое сопротивление резонатора,  $Q_n$  – его нагруженная добротность [8]. Это требование сложно выполнимо для однозачорных резонаторов. Решение

проблемы заключается в использовании резонаторов с повышенным волновым сопротивлением, в частности, многозазорных.

Наряду с этим, значительный интерес представляет создание ММЛК, 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 [9]. Это может обеспечить улучшенные электрические параметры и характеристики резонансной системы, и миниатюризацию прибора в целом. Резонансные системы с диэлектрическими подложками в качестве элементной базы низковольтных клистронов в настоящее время практически не исследованы.

Целью настоящей работы является исследование основных электродинамических параметров и характеристик трехзазорного многоканального резонатора с полосковыми резонансными проводниками, размещенными на диэлектрической подложке. Изучение возможности применения таких резонаторов в ММЛК.

## **1. Конструкция резонатора.**

Конструкция резонатора показана на рис. 1. Она включает в себя прямоугольный объемный резонатор (1), внутри которого расположена подвешенная диэлектрическая подложка (2), разделенная на две части. На подвешенной диэлектрической подложке с обеих сторон размещены полосковые линии (3). Полосковые линии электрически соединены с одной стороны с корпусом объемного резонатора, с другой стороны с центральными пролетными трубами (4). Две боковые пролетные трубы (5) расположены на боковой стенке объемного резонатора. Две центральные пролетные трубы и две боковые пролетные трубы образуют три высокочастотных зазора резонатора (6). Центральные и боковые пролетные трубы резонатора имеют по 18 каналов (7) для пролета электронного потока.

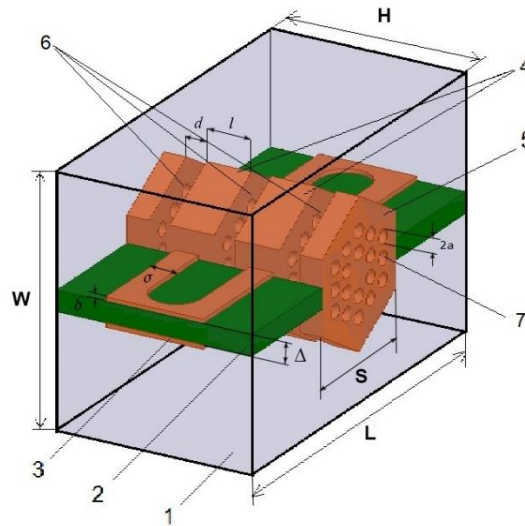


Рис. 1. Конструкция резонатора.

Основные размеры резонатора (в миллиметрах) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные размеры резонатора.

$W$	$H$	$L$	$d$	$l$	$a$	$S$	$\Delta$	$\delta$	$\sigma$
12	9.6	18	1	2.2	0.35	6.2	1	0.2	1.2

Для резонатора, у которого высота  $H$  много меньше длины волны, основной является мода  $H_{110}$ . Резонансная частота данной моды определяется следующим известным выражением:

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{W}\right)^2 + \left(\frac{1}{L}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $W$  и  $L$  – геометрические размеры резонатора.

Полосковые линии, расположенные на диэлектрической подложке, представляют собой двухпроводную систему, один конец которой закреплен на крышке объемного резонатора, а другой соединен с центральными пролетными трубами. Такая двухпроводная система может быть возбуждена двумя способами, если ее длина равна или кратна нечетному числу четвертей волн.

Первый способ возбуждения – противофазный. Второй способ возбуждения – синфазный. Оба вида колебаний (синфазный и противофазный) могут

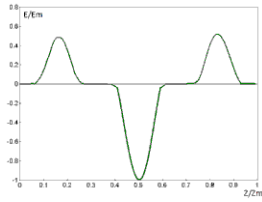
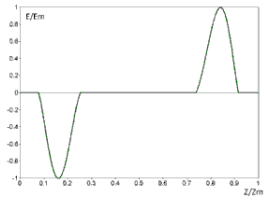
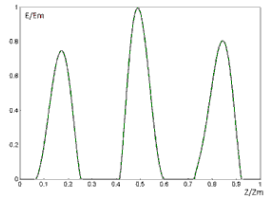
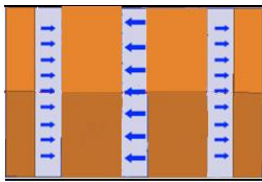
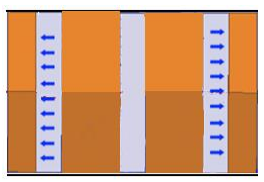
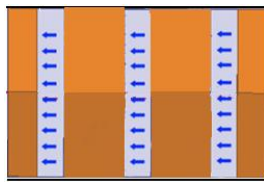
существовать одновременно и независимо друг от друга на одном двухпроводном колебательном контуре.

## 2. Результаты моделирования.

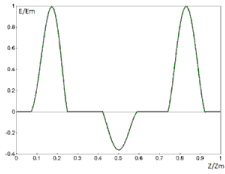
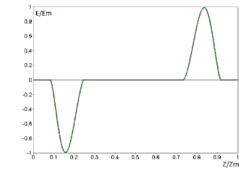
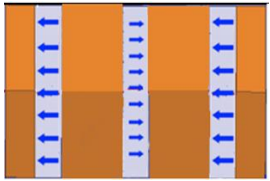
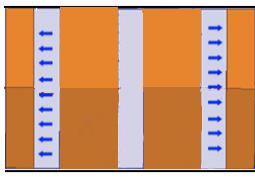
Расчет резонатора проводился методом конечных элементов в частотной области. Исследования проводились в диапазоне от 4 до 20 ГГц. В качестве материала для диэлектрической подложки был выбран алмаз, а для остальных элементов резонатора материал – медь. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 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 ( $2\pi$ ), мода №3. В то же время характеристическое сопротивление на высших частотах уменьшается, причем на высших модах незначительные изменения.

Таблица 2. Результаты моделирования резонатора.

Номер моды, $n$	1	2	3
Тип моды, $\psi$	$\pi$	$\pi/2$	$2\pi$
Распределение электрического поля в зазорах, $E_z/E_m = f(Z/Z_m)$			
Напряженность продольной составляющей электрического поля в зазорах			
$F_{0n}$ , ГГц	4.439	5.021	9.547
$Q_{0n}$	1130	2092	6291
$\rho_n$ , Ом	272	107	116

Продолжение таблицы 2.

Номер моды, $n$	4	5
Тип моды, $\psi$	$\pi$	$-\pi/2$
Распределение электрического поля в зазорах, $E_z/E_m = f(Z/Z_m)$		
Напряженность продольной составляющей электрического поля в зазорах		
$F_{0n}$ , ГГц	18.193	19.029
$Q_{0n}$	2395	5176
$\rho_n$ , Ом	22	31

Для исследованных видов колебаний получены графики нормированной напряженности электрического поля в пролетном канале вдоль пространства взаимодействия. Исследование электрического поля проводилось в пролетном канале первого слоя.

Следует отметить, что для 1 моды максимальная напряженность поля наблюдается во втором зазоре, в первом и третьем напряженность примерно в два раза ниже, поле в зазорах противофазно. Для моды 2 во втором зазоре поле отсутствует, при этом в первом и третьем зазорах поле одной амплитуды и противофазно. Для моды 3 поле синфазно, максимальное поле во втором зазоре. Для моды 4 при одинаковых полях в первом и третьем зазорах, во втором зазоре амплитуда поле 60% меньше, поля в зазорах противофазны. Для 5 моды наблюдается картина поля, сходная с модой 2 при отсутствии поля во втором зазоре.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики резонатора для выбранных мод, показаны значения импеданса  $R_{0n} = \rho_n Q_{0n}$  в диапазоне от 4 до 20 ГГц.

Из рис. 2 видно, что 1 и 2 типы колебаний ( $\pi$  и  $3\pi/2$ ) расположены в С-диапазоне, 3 мода расположена в Х-диапазоне, высшие типы колебаний сосредоточены в К-диапазоне. Максимальное значение  $\rho Q_0$  наблюдается для 3 моды.

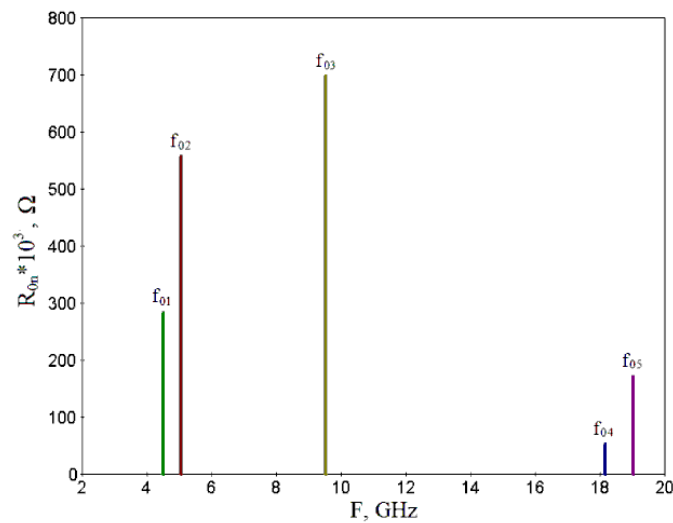


Рис. 2. Спектральные характеристики резонатора. Зависимость параметра  $R_{0n}$  от частоты.

В работе исследована возможность перестройки основных рабочих частот резонатора. Оценена возможность настройки резонатора на кратные частоты. Результаты исследований приведены на рис. 3.

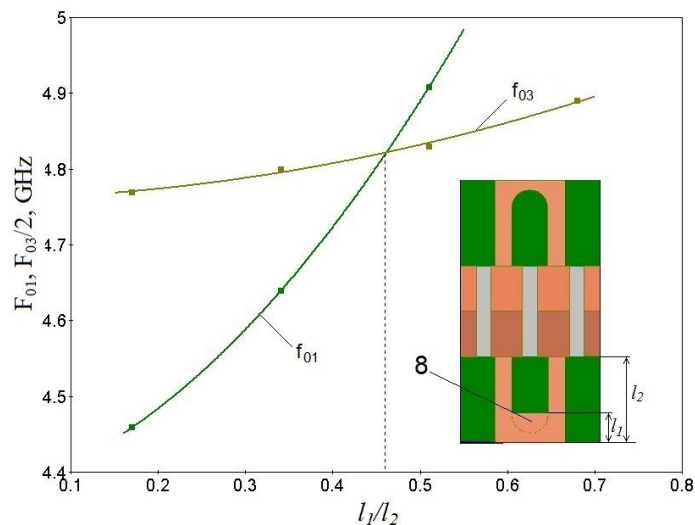


Рис. 3. Настройка резонатора на кратные резонансные частоты.

Для настройки резонатора на кратные резонансные частоты были выбраны моды №1 и №3. Для того чтобы добиться кратности резонансных частот необходимо проводник полосковой линии укоротить так, чтобы это укорочение влияло только на частоту противофазного вида колебаний. Это может быть достигнуто путем размещения небольшой пластины (8) в области короткого замыкания линии (см. рис. 3). Так как при синфазном возбуждении между проводниками контура отсутствует разность потенциалов, то эта пластина будет оказывать влияние только на длину волны противофазных колебаний. В ходе проведенных исследований длина короткозамыкающей пластины (8) ступенчато увеличивалась. Из рис. 4 видно, что частота противофазной моды №1 при увеличении длины отрезка  $l_1$  растет более резко, чем частота синфазной моды №3. Это позволяет настроить резонатор на кратные частоты. При этом удалось добиться кратности резонансных частот резонатора при относительной длине  $l_1/l_2=0.46$ .

Настройка резонатора на кратные резонансные частоты может быть использована для повышения КПД клистрона. Высокий КПД клистронов достигается за счет несинусоидальной скоростной модуляции, которая обычно реализуется при введении в конструкцию многорезонаторной системы двух дополнительных однозачерных резонаторов, имеющих собственные частоты, равные удвоенной частоте основного сигнала. Однако это увеличивает габариты и массу такого устройства. Устранить этот недостаток можно за счет применения вместо двух резонаторов одного резонатора, настроенного на две кратные резонансные частоты. Использование исследованного резонатора в конструкции многолучевого клистрона позволит уменьшить в целом его массу и габариты. Также возможно применения подобного резонатора в клистронных умножителях частоты.

В работе исследовано поведение электронных параметров клистрона – коэффициента взаимодействия  $|M|$  и относительной электронной проводимости  $G_e/G_0$  для трех первых частот резонатора. Полученные результаты приведены на



рис. 5.

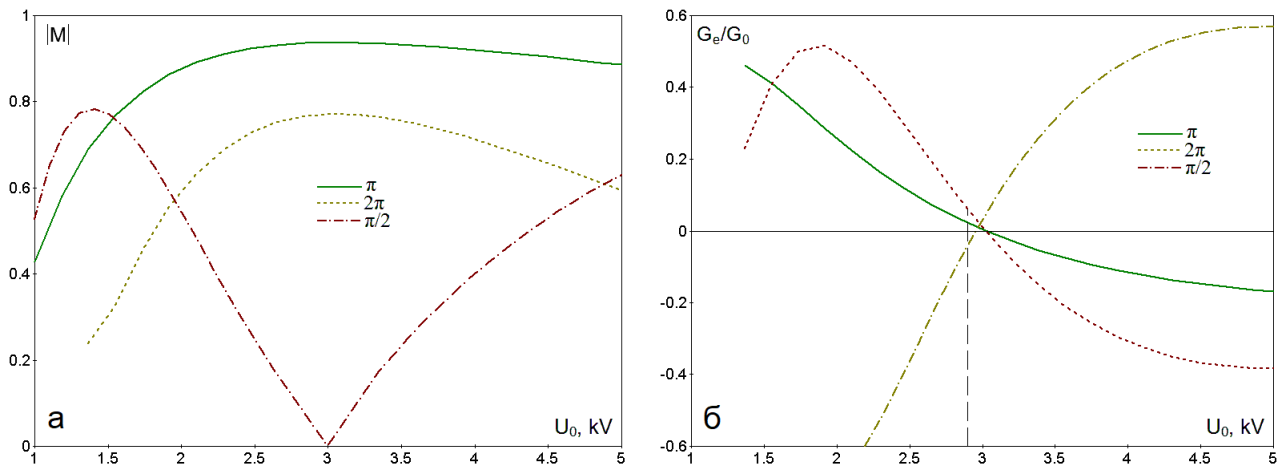


Рис. 5. Результаты расчета электронных параметров: а – коэффициент взаимодействия  $|M|$ ; б – относительная электронная проводимость  $G_e/G_0$ .

Из рис. 5 видно, что для низшего противофазного вида колебаний ( $\pi$ ) и высшего синфазного ( $2\pi$ ) удастся добиться режима работы клистрона без самовозбуждения  $G_e/G_0 > 0$  с высокими значениями коэффициента взаимодействия  $|M|$  при ускоряющем напряжении 2.8-2.9 кВ. В то же время для вида колебаний  $\pi/2$  в этом режиме коэффициент взаимодействия мал, а проводимость  $G_e/G_0$  имеет небольшое отрицательное значение.

## Заключение

Исследован трехзворный многоканальный клистронный резонатор с подвешенной диэлектрической подложкой и полосковыми проводниками, размещенными на ней. Определены основные электродинамические параметры в диапазоне от 4 до 20 ГГц. Проанализировано высокочастотное электрическое поле вдоль пространства взаимодействия. Исследована возможность работы резонатора в бигармоническом режиме на кратных резонансных частотах. Рассчитаны электронные параметры прибора для исследованного резонатора для случая кратности частот противофазного и синфазного колебаний.

Подобный тип резонатора может быть применен в низковольтных малогабаритных клистронах, работающих как сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн. Применение таких резонаторов позволит

существенно уменьшить массогабаритные параметры миниатюрных многолучевых клистронов.

## Финансирование

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

## Литература

1. Parker R.K., Abrams R.H. The Navy's role in vacuum tube electronic program. *Microwave Journal*. 1992. Vol.35. №3. P.82-92.
2. Гельвич Э.А. Мощные комплексированные СВЧ изделия. *Электронная техника. Серия 1, Электроника СВЧ*. 1982. Вып.12 (348). С.18-24.
3. 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. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.893196>
4. Korolyov A.N., Gelvich E.A., Zhary Y.V., Zakurdayev A.D., Poognin V.I. Multiple-beam klystron amplifiers: Performance parameters and development trends. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2004. №3. P.1109-1118. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.828807>
5. 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. *Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018»*. Саратов. 2018. С.232-236. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2018.8542258>
6. Bandyopadhyay A.K., Pal D., Saini A., Kant D. Saha S., Joshi L.M. Design of a Ku band miniature multiple beam klystron. *Advancement in science and technology: Proceedings of the 2nd International Conference on Communication Systems (ICCS-2015)*. Rajasthan, India. 2016. №1715 (1). P.020052. <https://doi.org/10.1063/1.4942734>

7. Царев В.А., Чигуров И.О., Шалаев П.Д. Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ku-диапазона длин волн. *Радиотехника*. 2015. №7. С.41-44.
8. Григорьев А.Д. Многоззорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн. *III Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. Санкт-Петербург. 2014. С.131-135.
9. Ракова Е.А., Галдецкий А.В., Корепин Г.Ф., Смирнов В.А., Зубков Н.П., Лябин Н.А., Парамонов В.С., Дерябкин А.В., Куликов Е.Н., Духновский М.П. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона. *V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. Санкт-Петербург. 2016. С.148-152.

**Для цитирования:**

Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Царев В.А., Акафьева Н.А. Трехззорный резонатор для миниатюрного многолучевого клистрона. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.7>