

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.10>

УДК 621.385.624

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДВУХАЗОРНОМ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ НИЗКОВОЛЬТНОГО ДВУСТВОЛЬНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА X-ДИАПАЗОНА

В. А. Царев, А. В. Ливчина

Саратовский государственный технический университет,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2020 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты сравнения данных трехмерного электромагнитного моделирования двух конструкций двухазорных фотонно-кристаллических резонаторов двуствольного многолучевого клистрона, работающего в X-диапазоне при ускоряющем напряжении 3,6 кВ с уровнем выходной мощности около 2 кВт. Эти конструкции резонаторов предназначены для работы на основном  $\pi$ -виде колебаний. Они отличаются разным профилем пролетных труб. Каждая из пролетных труб в этих конструкциях содержит 19 пролетных каналов, расположенных линейными рядами. Приведены результаты оптимизации комплекса электронных и электродинамических параметров. Найдены оптимальные режимы работы и конструкции резонансных систем, позволяющие существенно уменьшить степень неоднородности эффективного характеристического сопротивления в пространстве взаимодействия.

**Ключевые слова:** многолучевой двуствольный клистрон X-диапазона, противофазный вид колебания, фотонно-кристаллический резонатор, эффективное характеристическое сопротивление, двойной зазор.

**Abstract.** This paper presents the results of comparing data from three-dimensional electromagnetic modeling of two designs of double-gap photonic crystal resonators of a two-barrel multi-beam klystron operating in the X-band at an accelerating voltage of 3.6 kV. These resonators are designed to operate on the main  $\pi$ -type oscillation with an output power level of about 2 kW. They are characterized by

different profiles of the beam-let tubes. Each of the beam-let tubes in these structures contains 19 beam channels arranged in linear rows. The results of optimization of the complex of electronic and electro-dynamic parameters are presented. The optimal parameters and designs of resonant systems are found, which make it possible to significantly reduce the degree of inhomogeneity of the effective characteristic resistance in the interaction space.

**Key words:** two barrel multi-beam klystron, anti-phase type of oscillation, photonic crystal resonator, effective characteristic impedance, double-gap.

## Введение

Усилители мощности на многолучевых клистронах (МЛК) находят широкое применение в тропосферной и космической связи, радиолокации и навигации, а также в технике ускорителей элементарных частиц [1-3].

Эффективным путем устранения недостатков, присущих однолучевым клистроном, а именно сравнительно низкого КПД, высокого ускоряющего напряжения, больших габаритов и массы, явилось создание многоствольных многолучевых клистронов (МСМЛК), имеющих резонаторы с компактным с расположением пролетных каналов в индивидуальной пролетной трубе [4].

Обычно число стволов в МСМЛК, при плотной упаковке  $N$  пролетных каналов в пределах одной пролетной трубы, не превышает двух, а число каналов в каждой пролетной трубе - не более семи. Это связано с тем, что дальнейшее увеличение, как числа пролетных каналов, так и числа стволов, всегда сопровождается на высшем виде колебаний пропорциональным уменьшением эффективного характеристического сопротивления резонатора

$$\rho_{eff} = \rho M^2 = \frac{R}{Q_0} M^2, \quad (1)$$

где  $M$ - коэффициент взаимодействия (коэффициент связи),  $R$  –резонансное сопротивление эквивалентного параллельного колебательного контура,  $Q_0$  – собственная добротность резонатора.

Величина  $\rho_{eff}$  является своеобразным показателем эффективности процесса взаимодействия. Чем выше этот показатель, тем выше эффективность обмена энергией между пучком электронов и СВЧ полем резонатора и, следовательно, тем больше КПД и коэффициент усиления клистрона.

Для повышения величины  $\rho_{eff}$  в ряде широкополосных многоствольных клистронов X-диапазона могут быть применены двухззорные призматические резонаторы, работающие на  $\pi$ -виде высшего вида ( $TM_{310}$ ) колебаний [5]. Это позволяет не только существенно укоротить длину пространства взаимодействия, но и обеспечивает возможность повышения КПД и коэффициента усиления МСМЛК за счет выравнивания СВЧ поля в зазорах взаимодействия.

Одной из актуальных задач в области разработки высокоэффективных многоствольных клистронов X-диапазона, работающих при низком ускоряющем напряжении (не более 4 кВ) и повышенных уровнях выходной мощности (более 1 кВт) является создание двухззорных резонаторов с числом пролетных каналов  $N > 14$ , в которых основным рабочим видом колебаний в резонаторе  $\pi$ -мода.

Эта задача весьма сложна, поскольку при значительном увеличении числа каналов резко возрастает неоднородность СВЧ-поля в пределах поперечного сечения индивидуальных пролетных труб и происходит резкое уменьшение  $\rho_{eff}$  в пролетных каналах, находящихся ближе к краям этих труб. Это приводит к высокочастотному расслоению сгустков электронов и падению КПД.

Для существенного уменьшения неоднородности СВЧ-поля в пределах поперечного сечения индивидуальных пролетных труб, показатели эффективности в разных пролетных каналах должны отличаться на малую величину.

Определение  $\rho_{eff}$  расчетным путем является очень сложной задачей из-за сложной функциональной зависимости этого показателя от многих конструктивных и физических факторов. К их числу следует отнести: форму

резонатора, размеры двойных бессточных зазоров, геометрию пространства взаимодействия, величину пространственного заряда пучка, степень заполнения пучком пролетного канала. Поэтому выбор оптимальной конструкции резонаторов для рассматриваемого типа приборов весьма сложен.

Одновременно нужно решать задачу управления резонансными частотами высших паразитных мод колебаний с тем, чтобы устранить их попадание в рабочую полосу частот клистрона. Для решения этой задачи следует переходить к гибридной конструкции резонансной системы, включающей в себя дополнительную фотонно-кристаллическую электродинамическую систему [6-10].

В настоящей работе исследуется один из путей выравнивания показателя эффективности  $\rho_{eff}$  в поперечном сечении пролетных труб, входящих в состав новой конструкции двухзазорного фотонно-кристаллического резонатора двуствольного низковольтного клистрона, работающего на противофазном виде колебаний в X- диапазоне частот.

## 1. Конструкция резонатора

Резонансная система двухзазорного фотонно-кристаллического резонатора (ДФКР) двуствольного клистрона, основные геометрические размеры которого представлены в таблице 1, включает в себя емкостную и индуктивную части. Емкостная часть (см. рисунки 1, 2) состоит из двух центральных многоканальных пролетных труб 1,2, двух верхних пролетных труб 3,4 которые закреплены на верхней крышке резонатора 5 и двух нижних пролетных труб 6,7 расположенных, соответственно, на нижней крышке резонатора 8. Все пролетные трубы имеют в поперечном сечении форму шестигранника, причем парциальные каналы 9 расположены в каждой пролетной трубе линейными рядами. Между торцевыми поверхностями центральных и торцевыми поверхностями верхних и нижних пролетных труб образованы два симметричных двойных высокочастотных зазора 10 и 11.

Индуктивная часть резонансной системы также состоит из двух частей, каждая из которых включает в себя два четвертьволновых отрезка

симметричной полосковой линии 12 и 13. Эти отрезки полосковых линий в разных стволах ориентированы друг относительно друга под углом в 60 градусов. Они соединены с прямоугольным (имеющим размеры широкой и узкой стенок-  $a'$  и  $b'$ ) корпусом резонатора 14 через промежуточную металлическую рамку 15. Рамка снабжена тремя дополнительными выступами шестигранной формы 16 с отверстиями 17 для пропускания основных металлических стержней 18. Основные металлические стержни 18, в свою очередь, соединены с верхней 5 и нижней 8 крышками резонатора. В промежуточной металлической рамке имеются дополнительные отверстия 19 для пропускания через них дополнительных металлических стержней 20, позволяющих управлять частотой и спектром паразитных мод колебаний.

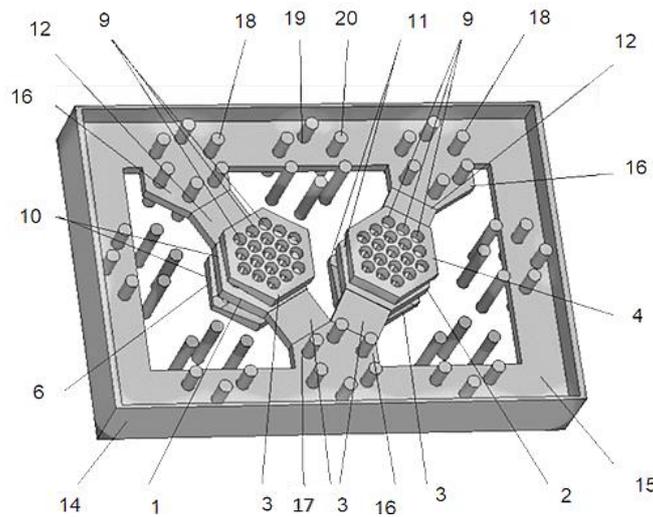


Рис. 1. Трехмерная модель резонатора.

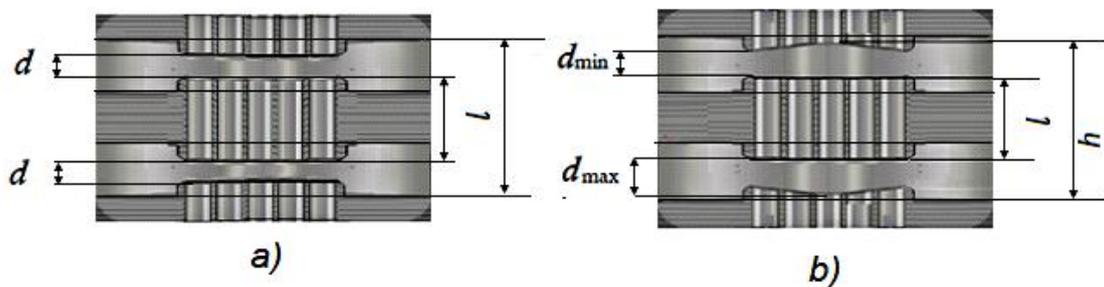


Рис. 2. Емкостная часть резонатора:  
 а) равные длины зазоров, б) неравные длины зазоров.

Таблица 1. Основные геометрические размеры модели резонатора

$a'$ , мм	$b'$ , мм	$h$ , мм	$a$ , мм	$l$ , мм	$d_{max}=d_1$ , мм	$d_{min}$ , мм
24	35	5,8	0,5	1,2	1,5	1,0

Целью дальнейших исследований являлся анализ эффективности процесса электронно-волнового взаимодействия для конструкций резонаторов, представленных на рисунке 2.

## 2. Сравнительный анализ комплекса электрических и электронных параметров исследуемых конструкций резонаторов

Анализ данных структур был проведен в программе электродинамического моделирования резонаторов “REZON” [11]. Для расчетов электрических и электронных параметров в этой программе использовались следующие соотношения [12].

$$\rho = \frac{R}{Q_0} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) dz \right|^2}{4\pi f_0 W_s}, \quad (1)$$

$$M = \sqrt{\frac{I_0^2(\gamma b) - I_1^2(\gamma b)}{I_0(\gamma a)}} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) e^{j\beta_e z} dz}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) dz \right|}; \quad (2)$$

$$\frac{G_e}{G_0} = -\frac{\beta_e}{4} \frac{\partial |M|^2}{\partial \beta_e}, \quad (3)$$

где  $E_z(z)$ -функция распределения продольной компоненты напряженности электрического поля на уровне при  $r = a$ ,

$$\beta_e = \frac{2\pi f_0}{V_0} - \text{продольная}$$

постоянная распространения;  $V_0$ - скорость электронного потока;  $f_0$  – резонансная частота рабочего вида колебаний,  $W_s$  – запасенная энергия поля,

$I_0(\gamma b)$ ,  $I_1(\gamma b)$ ,  $I_0(\gamma a)$  – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков от соответствующих аргументов  $\gamma b = \frac{2\pi f_0 b}{V_0}$ ,  $\gamma a = \frac{2\pi f_0 a}{V_0}$ .

Следует отметить, что уравнение (3) достаточно общее и распространяется на все формы зазора, а также на резонаторы «с распределённым взаимодействием». Его смысл в том, что отношение проводимости нагрузки пучком  $G_e$  к проводимости пучка  $G_0$  полностью определяется коэффициентом взаимодействия  $M$  и его изменением, связанным с изменением ускоряющего напряжения.

В результате предварительного анализа были выбраны оптимальные параметры (таблица 2) процесса электронно- волнового взаимодействия, при которых исключается попадание в рабочую полосу частот клистрона высших паразитных мод колебаний, а также устраняется его самовозбуждение.

Таблица 2. Параметры электронно- волнового взаимодействия

Параметры	
Частота рабочего (противофазного) вида колебаний $f_0$ , ГГц	7,5
Ускоряющее напряжение $U_0$ , кВ	3.6
Число лучей $N$	38
Ток одного луча $I_{01}$ , А	0,043
Коэффициент заполнения, $b/a$	0.6
Плотность тока в луче $J_0 = \frac{I_{01}}{\pi b^2}$ , А/см <sup>2</sup>	15,2
Микропервеанс одного луча $p_{\mu 1} = \frac{I_{01} \cdot 10^6}{U_0^{3/2}}$ , мкА/В <sup>3/2</sup>	0,2
Подводимая мощность $P_0$ , Вт	5882

На рисунке 3 представлены зависимости электронных параметров процесса электронно-волнового взаимодействия от изменения ускоряющего напряжения для двух вариантов конструкций резонаторов, показанных на рисунке 2. Эти кривые были получены для параметров процесса взаимодействия, указанных в таблице 2.

Коэффициенты взаимодействия  $M$  и величины относительной электронной проводимости  $G_e/G_0$  для второго варианта были рассчитаны с учетом соответствующих длин зазоров для каждого ряда в отдельности, обеспечивающих минимальный средний разброс эффективного характеристического сопротивления  $\rho M^2$  в пространстве взаимодействия. Из рисунка 3 видно, что при выбранных параметрах коэффициент взаимодействия  $M$  для всех рассматриваемых вариантов имеет достаточно большие значения, а относительная электронная проводимость  $G_e/G_0$  находится в области положительных значений.

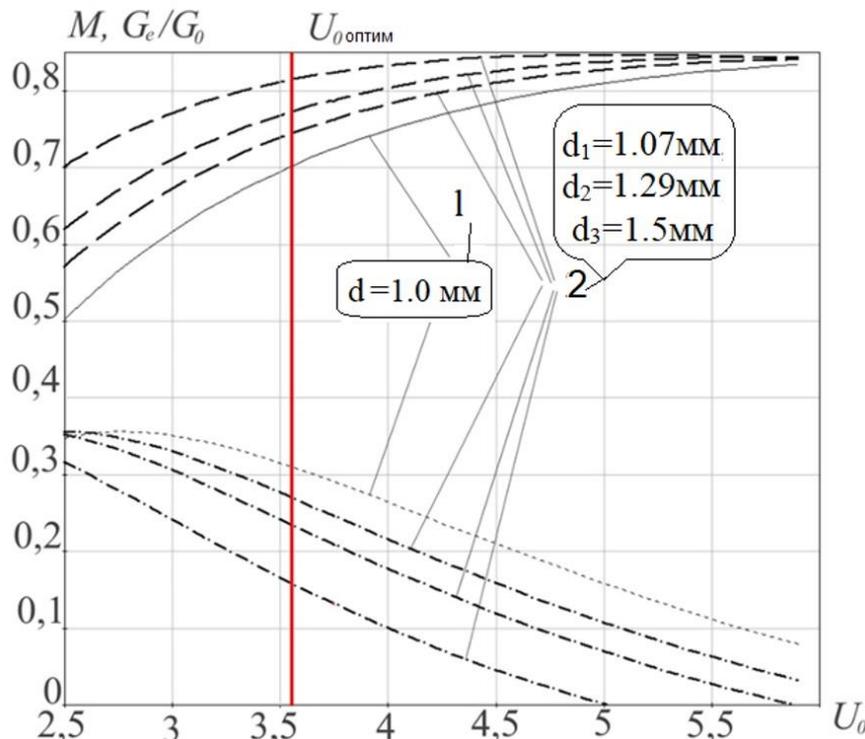


Рис. 3. Зависимости коэффициента взаимодействия  $M$  и относительной электронной проводимости  $\frac{G_e}{G_0}$  от значения ускоряющего напряжения  $U_0$ ; 1 - при постоянной вдоль поперечного сечения длине пролетных труб (рисунок 2, а); 2 – при изменяющихся вдоль поперечного сечения длинах пролетных труб (рисунок 2,б)

Исходя из полученных результатов, показанных в таблице 3, при ускоряющем напряжении  $U_0=3,6$  kV степень неоднородности характеристического сопротивления  $\rho M^2$  у конструкции, изображенной на рисунке 2, а составляет 16,3%, а у конструкции, показанной на рисунке 1,б равна 7,9%.

Таблица 3. Результаты расчета параметров электронно-волнового взаимодействия для двух моделей рассматриваемых резонаторов

№	Геометрические параметры двойного зазора	Параметры электронно- волнового взаимодействия										
		$\rho M^2$ , Ом					$G_e/G_0$					$Q_0$
1	$d_1=d_2=d_3=d_4=d_5=1.0$ мм; $l=1.2$ мм	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
		ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	ряд	
		д	д	д	д	д	д	д	д	д	д	
		25, 1	28, 4	30	29, 3	26, 4	$(G_e/G_0)_{cp}=0.3$					
$(\rho M^2)_{cp}= 27,84$ Ом										208 4		
16.3%												
2	$d_1=d_5=1.07$ мм, $d_2=d_4=1.29$ мм; $d_3=1.5$ мм; $l=1.2$ мм	31, 1	31, 5	30, 3	32, 5	32, 9	0,1 5	0,2 3	0.2 1	0.2 3	0.1 5	208 4
		$(\rho M^2)_{cp} = 31,66$ Ом					$G_e/G_0)_{cp}=0.194$					
		=7.9%										

### Заключение

Найдены оптимальные режимы работы и предложена новая, работающая на основном  $\pi$ - виде колебаний, конструкция двухзазорного фотонно-кристаллического резонатора. Резонатор предназначен для применения в составе двухвольтового низковольтного 3б-лучевого клистрона X-диапазона с уровнем выходной мощности порядка 2 кВт.

Показана возможность существенного выравнивания в такой конструкции резонатора показателя эффективности  $\rho_{eff}$  за счет изменения длин двойных

зазоров в поперечном сечении многоканальных пролетных труб. Это позволяет не только существенно укоротить длину пространства взаимодействия, но и обеспечивает возможность повышения КПД и коэффициента усиления клистрона. За счет введения в конструкцию резонатора фотонно-кристаллической решетки упрощается задача управления резонансными частотами высших паразитных мод колебаний, а также устраняется самовозбуждение клистрона.

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научно-исследовательского проекта № 19-07-00611\20.

### Литература

1. Gelvich E.A., Zhary E.V. *et al.* A new generation of power klystrons on the base of multiple-beam design. // IEEE MTT-S, Digest. 1991. P.1319-1329.
2. Balkcum A., Wright E., Bohlen H. *et al.*, Operation of a 1.3 GHz, 10MW Multiple Beam Klystron. // Fifth IVEC Proc. 2004. Monterey, California, USA. P.280-281.
3. Ding Y., Shen B., Shi S., Cao J. S-Band Multi-Beam Klystron with Bandwidth of 10%. // IEEE Transactions of Electron Devices. 2005. Vol.52. No.5. P.889-894.
4. Kravtsov I.A., Rusakov S.V., Touv A.A., Shifman R.G. The method for analysis of multibarrel klystron output circuit. // 2005 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. Sevastopol, Crimea, 2005. Vol.1. P.199-200. <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2005.1564869> .
5. Wen-jiao Y., Fu-min L., Hong-yi Y. Research on  $\pi$ -mode Double-Gap Rectangular TM<sub>310</sub> Cavity. // 2007 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Builin. 2007. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2007.381454>.
6. Xu Y., Seviour R. Design of photonic crystal klystrons. // Proc. of the 1st Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC-2010). JACoW. Kyoto, Japan. 2010. P.4002–4004.
7. Smirnov A.V., Duly D.Yu. Rod-loaded and PBG multibeam klystron cavities. //

- Proc. of Particle Accelerator Conf. (PAC-2005). Knoxville, Tennessee. 2005. P.3095–3096.
8. Tsarev V.A. New fractal and photonic crystal resonators for multi-beam microwave vacuum devices. // Proc. of the 2018 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2018). Saratov, 2018. Vol.1. P.449–457.
9. Ливчина А.В., Царев В.А. Моделирование двухзорового фотонно-кристаллического резонатора двуствольного миниатюрного многолучевого клистрона // Сборник трудов VX Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». – Саратов: Техно-Декор, 2020. С.145-146.
10. Ливчина А.В., Царев В.А. Новые типы фотонно-кристаллических двухзоровых резонаторов для миниатюрных многолучевых клистронов коротковолновой части СВЧ диапазона // Письма в ЖТФ. 2020. Т.46. №3. С.35. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.03.48990.18017>
11. Мучкаев В.Ю., Царев В.А. REZON. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011611748 от 24.02.2011.
12. Caryotakis G. High power klystrons: theory and practice at the Stanford Linear Accelerator Center. 2005. SLAC-PUB 10620. P.34–35.

**Для цитирования:**

Царев В.А., Ливчина А.В. Исследование параметров процесса электронно-волнового взаимодействия в двухзоровом фотонно-кристаллическом резонаторе низковольтного двуствольного многолучевого клистрона X-диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.10>