

УДК 621.385.624

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДВУХСТВОЛЬНОГО КЛИСТРОНА ДЛЯ СИСТЕМ ДАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

В. А. Царев^{1,2}, Д. А. Нестеров²

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77

²АО «НПП «Алмаз», 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, д. 1

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2019 г.

Аннотация: В статье представлены результаты численного моделирования двухлучевого клистрона X-диапазона, предназначенного для использования в передатчиках системы дальней космической связи. В результате расчетов, проведенных с помощью 1D программы “AJDISK”, было установлено, что новый прибор может обеспечить при ускоряющем напряжении 16 кВ следующие выходные параметры: уровень выходной непрерывной мощности 24 кВт, КПД 33%, ширину полосы усиления 90 МГц и коэффициент усиления 44 дБ. Особенностью конструкции промежуточных резонаторов является, по аналогии с фотонно-кристаллическими резонаторами (PBG), использование металлических стержней для создания дефекта в резонаторе. С помощью изменения диаметра и местоположения этих стержней в дефектной зоне осуществлялась настройка промежуточных резонаторов на заданную резонансную частоту.

Ключевые слова: наземная дальняя космическая связь, X-диапазон, двухствольный клистрон, 3D моделирование, фотонно-кристаллический резонатор с запрещенной зоной, КПД, полоса усиления.

Abstract. The article presents the results of computational modeling for double-beam X-band klystron designed to use in the deep space communications system transmitters. As a result of performed calculations in 1D program “AJDISK”, it was established that the new device at an accelerating voltage of 16 kV can provide the following output parameters: CW output power level - 24 kW, an efficiency - 33%, a bandwidth - 90

MHz and a gain - 44 dB. A structural feature of the intermediate resonators is the using of metal rods to create a defect in the resonator, by analogy with the photonic crystal resonators (PBG). The intermediate resonators were tuned to an intended resonant frequency by changing a diameter and a location of these rods in the defect zone.

Keywords: ground deep space communication, X-band, two-barrel klystron, 3D modeling, photonic band gap resonator, efficiency, amplification band.

Введение

Мощные усилительные клистроны в настоящее время имеют широкую сферу применения: радиолокация, СВЧ-нагрев, ускорительная и медицинская техника и ряд других областей [1-3].

Одной из важнейших областей применения этих приборов является дальняя космическая связь, из-за особенностей радиопрозрачности атмосферы Земли осуществляемая на частотах X-диапазона [4, 5].

В отечественных передатчиках дальней космической связи сейчас используется усилительный однолучевой клистрон непрерывного действия со следующими выходными параметрами: выходная мощность 12.5 кВт, полоса усиления по уровню -1 дБ 80 МГц, КПД 34% [4, 6]. Для расширения полосы на выходе этого прибора установлены активные двухзачорные резонаторы, которые вместе с пассивными резонаторами, образуют двухзвенные фильтровые системы (рис 1).

Для осуществления будущих космических полетов в дальнем космосе требуется повышенная надежность и высокое качество радиоаппаратуры систем наземной радиосвязи. Для этого необходимо, как минимум, увеличить выходную непрерывную мощность клистронных усилителей с 12 кВт до 25 кВт [7]. Обычно это достигается за счет увеличения ускоряющего напряжения. Используя данный подход, фирма CPI разработала однолучевые клистроны VA-876P и VA-876J [8], которые в X-диапазоне обеспечивают получение непрерывной выходной мощности 25 кВт при величине ускоряющего напряжения, соответственно, 21 и 25 кВ. Этот же подход можно было бы

использовать при создании нового отечественного клистрона с таким же уровнем выходной мощности. Однако при увеличении ускоряющего напряжения усложняется конструкция, увеличиваются масса и габариты источников питания. Кроме того, снижается надежность работы такого прибора из-за вероятности возникновения СВЧ пробоя в зазоре выходного резонатора.

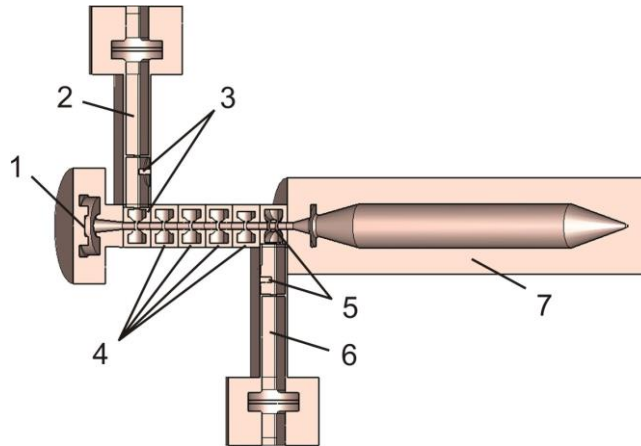


Рис. 1. 3D-модель однолучевого клистрона X-диапазона: 1 – электронная пушка, 2 – входное устройство прибора; 3 – входная двухзвенная фильтровая система; 4 – промежуточные резонаторы; 5 – выходная двухзвенная фильтровая система с активным двухзазорным резонатором; 6 – выходное устройство прибора; 7 – коллектор.

Перечисленных недостатков лишен альтернативный подход для повышения уровня выходной мощности – переход к двухствольным клистроном [9, 10]. Конструирование двухствольных клистронов затруднено в связи с тем, что при удвоении числа пучков пропорционально падает величина характеристического сопротивления резонаторов, что уменьшает полосу усиления.

Целью настоящего исследования является разработка нового мощного широкополосного клистрона двухствольной конструкции, выходные параметры которого удовлетворяют современным требованиям по надежности и качеству систем дальней радиосвязи.

Для достижения поставленной цели резонаторы нового прибора клистронов должны иметь высокое характеристическое сопротивление при низкой неравномерности СВЧ электрического поля в пролетных каналах и отсутствии самовозбуждения.

1. Проектирование и расчет резонаторов двухствольного клистрона

В результате проведенных 3D-расчетов с помощью программы REZON [11] были предложены новые конструкции резонаторов, отвечающих поставленным выше требованиям. Выходной резонатор работает на 2π (синфазном) виде колебаний. Вместе с пассивным резонатором он образует двухзвенную фильтровую систему, применение которой увеличивает импеданс выходной колебательной системы примерно в 1.5 раза. Промежуточные резонаторы выполнены одноззорными (рис. 2, б). Как будет показано ниже, выбранная форма боковых стенок призматических резонаторов обеспечивает малую неравномерность СВЧ электрического поля в середине зазоров над пролетными каналами.

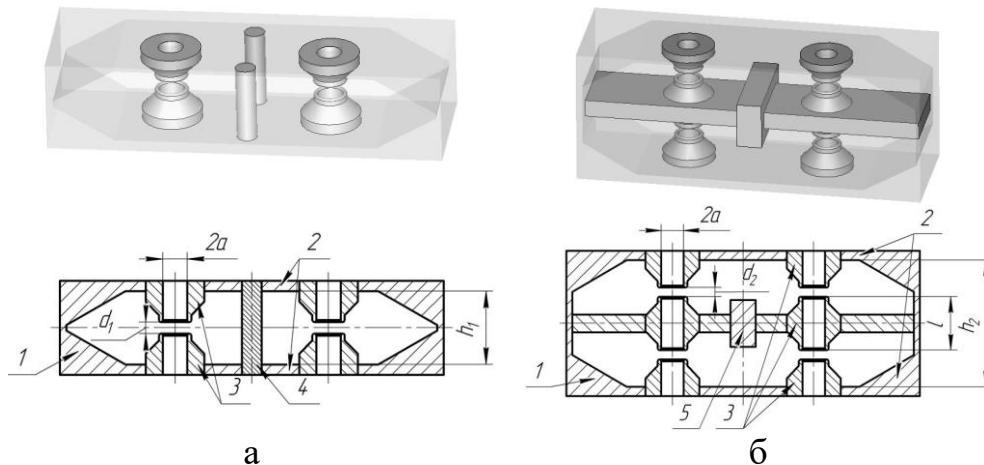


Рис. 2. Общие виды и поперечные разрезы одноззорного (а) и двухззорного (б) резонаторов с размерами: $a=1.8$ мм, $d_1=1.7$ мм; $d_2=1.5$ мм; $l=8.4$ мм; $h_1=10.8$ мм; $h_2=20$ мм.

Проведенные нами исследования показали, что сплошные боковые металлические стенки резонатора могут быть заменены на решетку из металлических стержней, установленных параллельно оси клистрона и замкнутых на боковые крышки резонатора. Такая резонансная структура аналогична полупроводниковой фотонно-кристаллической структуре с запрещенной зоной (PBG), имеющей дефект решетки. Эта структура впервые была предложена Яблоновичем в работе [12]. В дальнейшем возможности применения такой структуры в резонаторах СВЧ диапазона были показаны в работах [13-15].

Изменяя шаг решетки и диаметр стержней, можно управлять частотами конкурирующих мод колебаний, примыкающих к частоте рабочей 2π -моды. В настоящей работе в качестве промежуточных резонаторов исследовалась гибридная резонансная PBG-система, дефектная область которой состоит из металлического корпуса 1, закрытого боковыми крышками 2. В корпусе установлены две пролетные трубы 3 и два металлических стержня 4 (рис.2, а). С помощью изменения диаметра и местоположения этих стержней в дефектной зоне осуществлялась настройка промежуточных резонаторов на заданную резонансную частоту f_i (i - номер резонатора).

Кроме того, с помощью этих стержней осуществлялся подбор наилучшего (для взаимодействия с пучком) характера распределения электромагнитного поля для рабочей моды в пространстве взаимодействия. Особенностью конструкции выходного двухзазорного резонатора является наличие поперечной металлической пластины 5. Эта пластина электрически соединяет боковые грани резонатора в плоскости, перпендикулярной осям пролетных каналов.

2. Расчет выходных параметров двухствольного клистрона

Расчет проводился с помощью одномерной программы AJDISK [16], позволяющей в режиме большого сигнала оперативно моделировать физические процессы в клистроне. В качестве исходных входных данных были выбраны следующие параметры:

- центральная частота полосы усиления $f_0=7200$ МГц,
- напряжение луча $U_0=16$ кВ,
- число стволов $N=2$,
- ток одного луча $I_0=2.3$ А,
- радиус пролетного канала $a=1.8$ мм,
- радиус луча $b=1.1$ мм.

С помощью этой программы была проведена оптимизация длин труб дрейфа, ширины зазоров резонаторов и резонансных частот парциальных резонаторов для получения заданных величин КПД, выходной мощности и полосы усиления клистрона. Все исходные электронные и

электродинамические параметры были рассчитаны с помощью программы 3D моделирования резонаторных систем REZON [11].

В таблице 1 показаны величины характеристического сопротивления ρ и собственной добротности Q_0 для двух моделей резонаторов и приведены графики распределения СВЧ электрического поля, измеренного в середине зазоров над пролетными каналами. Из таблицы видно, что оба резонатора обеспечивают высокое характеристическое сопротивление и имеют низкую неравномерность СВЧ электрического поля. Для одноззорного резонатора неравномерность поля составляет 0.5%, а для двухззорного – 3%.

Таблица 1. Сравнение параметров одноззорного и двухззорного резонаторов на центральной частоте.

f_0 , ГГц	Картина поля	ρ , Ом	Q_0	f_0 , ГГц	Картина поля	ρ , Ом	Q_0
7.200		56	3593	7.200		96	3490

Параметры резонаторов, полученные в результате оптимизации, приведены в таблице 2, а результаты расчетов по программе AJDISK показаны на рисунках 3 и 4. В таблице используются следующие обозначения: $\rho_\Sigma = \rho_1 \cdot N$ – суммарное характеристическое сопротивление двух стволов; ρ_1 – характеристическое сопротивление в одном пролетном канале; $N=2$ – число стволов; M – коэффициент взаимодействия; Q_H – нагруженная добротность; f_i – частота i -го резонатора.

Таблица 2. Параметры резонаторов клистрона в AJDISK.

№	1	2	3	4	5	6
ρ_Σ , Ом	192	112	112	112	110	288
M	0.725	0.761	0.761	0.761	0.761	0.725
Q_H	213	-	-	-	-	60
Q_0	3478	3703	3674	3659	3646	3490
f_0 , МГц	7161	7184	7369	7294	7256	7228

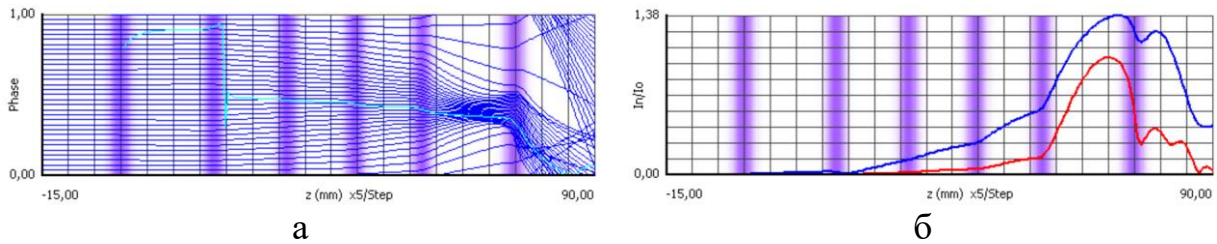


Рис. 3. Графики фазовых траекторий (а) и относительных величин токов первой и второй гармоник (б) от расстояния вдоль оси прибора.

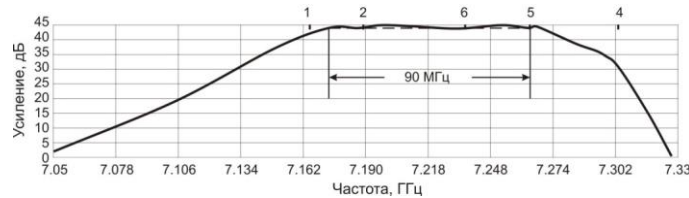


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления от частоты.

Сравним выходные параметры разработанного нового двухствольного клистрона с отечественным клистроном-аналогом «Веста» [6] и зарубежными аналогами VA-876J и VA-876P [8]. Результаты сравнения приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение параметров клистронов.

	Веста [6]	Новая разработка	VA-876J	VA-876P
Микропервеанс на один луч, мкА/В ^{3/2}	1.136	1.136	1.011	1.150
Напряжение луча, кВ	16	16	25	21
Ток луча, мА	2.3	2.3×2	4	3.5
Рабочая частота, ГГц	7.2	7.2	7.19	7.19
Подводимая мощность, кВт	36.8	73.6	100	73.5
Входная мощность, Вт	0.5	0.5×2	5	2.5
Ширина полосы усиления (-1 дБ), МГц	80	90	90	45
Выходная мощность, кВт	12.5	24	25	25
Полный КПД, %	34	33	25	34
Коэффициент усиления, дБ	44	44	37	40
Количество резонаторов	6	6	5	5
Число лучей	1	2	1	1

Заключение

Основные преимущества по сравнению с отечественным аналогом:

- повышение уровня выходной мощности в 2 раза при сохранении полного КПД, коэффициента усиления, а также параметров и конструкции электронно-оптических систем,

- расширение полосы усиливаемых частот в 1.1 раза.

Основные преимущества по сравнению с лучшим зарубежным аналогом:

- уменьшенная в 1.6 раза величина ускоряющего напряжения,
- увеличение КПД в 1.3 раза;
- увеличение коэффициента усиления в 1.2 раза;
- увеличение долговечности за счет уменьшения плотности тока на катоде в 1.7 раза.

Проведенное сравнение показывает, что новая конструкция двухствольного клистрона по своим характеристикам лучше современных отечественных и зарубежных аналогов и ее применение в наземных передатчиках позволит существенно повысить качество и надежность систем дальней космической связи.

Результаты были получены при выполнении гранта в рамках конкурса «УМНИК 17-12 (а), договор номер 12717ГУ/2017 от 25.04.2018 г. и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00611.

Литература

1. Bin Shen, Yaogen Ding, Sandalov A.N., Chashurina A.N. Computer simulations of 100 kW L-band CW broadband multi-beam klystron // IEEE Transaction on Electron Devices. 2005. No 5. P. 889. DOI: [10.1109/IVESC.2004.1414252](https://doi.org/10.1109/IVESC.2004.1414252).
2. Nusinovich G., Levush B., Abe. D. A Review of the Development of Multiple-Beam Klystrons and TWTs // USA, McLean: Naval Research Laboratory, 2003. 45 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/235166704_A_Review_of_the_Development_of_Multiple-Beam_Klystrons_and_TWTs (дата обращения 24.10.2019).
3. Борисов Л., Щелкунов Г. Мощные и сверхмощные СВЧ-источники: от клистронов до нового класса приборов // Электроника НТБ. 2012. № 4. С. 58-64. URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3288_906.pdf (дата обращения 24.10.2019).

4. Пат. 2483386, RU, МПК⁷ Н 01 J 25/00, Мощный широкополосный клистрон / В.А. Царев, В.И. Ширшин, В.В. Муллин, В.К. Семенов, П.А. Пичугин – опубл. 27.05.13 в бюл. № 15. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2483386> (дата обращения 24.10.2019).
5. Vodonos Ya. I., Conroy B.L., Losh D.L., Silva A. Advances in Ground Transmitters for the NASA Deep Space // Proceedings of the IEEE. 2007. No 10. P. 1945-1957. DOI: [10.1109/JPROC.2007.905050](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.905050).
6. Царев В.А., Ширшин В.И. Мощный широкополосный усилительный клистрон X-диапазона частот с выходной непрерывной мощностью 12,5 кВт // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2013. № 3(518). С. 101-107.
7. Vicente C., Gahete C. Feasibility Study of an All European Klystron for Deep Space Communications // ESA.INT: European Space Agency. URL: <http://gsp.esa.int/documents/10192/43064675/C102484ExS.pdf/9be696e0-cb4c-446e-91a1-7d668380626d> (дата обращения 24.10.2019).
8. Microwave Power Products Division // CPII.COM: Communication & Power Industries. URL: <http://www.cpii.com/product.cfm/1/20/48> (дата обращения 24.10.2019).
9. Touv A.A. X-Band high power broadband low-voltage multi-beam klystron amplifier with two-barrel design // Proceedings of International University Conference “Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies”, St. Petersburg, May 1999. P. 83-85. DOI: [10.1109/UHF.1999.787884](https://doi.org/10.1109/UHF.1999.787884).
10. Тув А.А. Трехсантиметровый мощный широкополосный низковольтный многолучевой усилительный клистрон двухствольной конструкции // Радиотехника. 2000. №2. С. 51-53.
11. Мучкаев В.Ю., Царев В.А. REZON // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011611748 от 24.02.2011 г. 1 с.
12. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev.Lett. 1987. Vol. 58. No 20. P.2059-2062. DOI: [10.1109/UHF.1999.787884](https://doi.org/10.1109/UHF.1999.787884) .

13. Sirigiri J.R., Kreischer K.E., Machuzak J., Mastovsky I. Photonic-band-gap resonator gyrotron // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86. No 24. P.5628-5631. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.5628](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.5628).
14. Shapiro M.A., Brown W.J., Mastovsky I., Sirigiri J.R., Temkin R.J. 17 GHz photonic band gap cavity with improved input coupling // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2001. Vol. 4. P.7. DOI: [10.1103/PhysRevSTAB.4.042001](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.4.042001).
15. Robak S., Boyden D., Shin Y.-M. RF-components embedded with photonic-band-gap (PBG) and fishnet-metamaterial structures for high frequency accelerator application // Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA, Convention center, Pasadena, 29 sept.-4 oct. 2013. P. 102-104. . URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.02064.pdf> (дата обращения 24.10.2019).
16. Jensen Aaron, Fazio Michael, Neilson Jeffrey, Scheitrum Glenn. Developing sheet beam klystron simulation capability in AJDISK // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61. No 6. P.1666-1671. DOI: [10.1109/TED.2014.2298753](https://doi.org/10.1109/TED.2014.2298753).

Для цитирования:

Царев В.А., Нестеров Д.А. Оптимизация конструкции и выходных параметров мощного широкополосного двухствольного клистрона для систем дальней космической связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.9