УДК 621.385.624 https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-513-523

Математическое моделирование низковольтного многолучевого клистрона миллиметрового диапазона

В. А. Царев[1,2], *В. Ю. Мучкаев*[1], *М. А. Манжосин*[2]

[1]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054 Саратов, ул. Политехническая, 77
[2]АО «НПП» Алмаз»
Россия, 410033 Саратов, ул. Панфилова, 1
E-mail: tsarev_va@mail.ru, muchkaev_vadim@mail.ru, manzhosinma@almaz-rpe.ru
Автор для переписки Вадим Юрьевич Мучкаев, muchkaev_vadim@mail.ru
Поступила в редакцию 14.07.2020, принята к публикации 20.08.2020, опубликована 30.10.2020

Цель настоящего исследования – определить эффективность работы низковольтных многолучевых клистронов в Ka-диапазоне частот, при использовании электронно-оптической системы клистрона-аналога, работающего в Ku-диапазоне. **Методы.** Собственные частоты и основные размеры резонаторов найдены с помощью решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области с прямоугольной пространственно-временной сеткой разбиения. Параметры, характеризующие взаимодействие (характеристическое сопротивление, коэффициент взаимодействия, относительная электронная проводимость, добротность), были рассчитаны методами численного интегрирования и дифференцирования по полученным распределениям электромагнитного поля резонатора. Оценка эффективности различных вариантов конструкций многолучевых клистронов проводилась с помощью известных одномерных программ «AJDISK» и «DISKLY». **Результаты.** Были рассмотрены две конструкции многолучевых клистронов: с шестью и девятью резонаторами. Показано, что использование электронно-оптической и магнитной системы низковольтного многолучевого клистрона Ka-диапазона позволяет создать эффективный усилитель, работающий в Ku-диапазоне с выходной мощностью от 0.5 кВт (вариант с 6 резонаторами) до 1 кВт (вариант с 9 резонаторами). **Заключение.** Предложенные конструкции низковольтных многолучевых клистронов позволяют получить эффективные усилители в Ka-диапазоне частот с выходной мощностью до 1 кВт. При этом использование электронно-оптической системы клистрона-аналога, работающего в Ku-диапазоне, обеспечивает снижение производственных затрат.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, миллиметровый диапазон, вычислительная электродинамика.

Образец цитирования: Царев В.А., Мучкаев В.Ю., Манжосин М.А. Математическое моделирование низковольтного многолучевого клистрона миллиметрового диапазона // Известия вузов. ПНД. 2020. Т. 28, № 5. С. 513–523. https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-513-523

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Финансовая поддержка. Работа поддержана РФФИ, грант № 17-02-00307.

© *Царев В.А., Мучкаев В.Ю., Манжосин М.А., 2020*

https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-513-523

Mathematical modeling of a low-voltage multibeam klystron of millimeter range

V. A. Tsarev[1,2], *V. Yu. Muchkaev*[1], *M. A. Manzhosin*[2]

[1]Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia
[2] JSC «SPE» Almaz»
1, Panfilova I.V. St., Saratov 410033, Russia
E-mail: tsarev_va@mail.ru, muchkaev_vadim@mail.ru, manzhosinma@almaz-rpe.ru
Correspondence should be addressed to Vadim Yu. Muchkaev, muchkaev_vadim@mail.ru
Received 14.07.2020, accepted 20.08.2020, published 30.10.2020

The **purpose** of this work is to determine the efficiency of low-voltage multibeam klystrons in the Ka-frequency range, using an electron-optical klystron-analog system operating in the Ku-range. **Methods.** The natural frequencies and main dimensions of the resonators were found by solving the Maxwell equations by the finite difference method in the time domain (FDTD) with a rectangular spatio-temporal partition grid. The parameters characterizing the interaction (characteristic impedance, coupling factor, relative electronic conductivity, Q-factor) were calculated by numerical integration and differentiation methods of the obtained distributions of the electromagnetic field of the resonator. Evaluation of the effectiveness of various designs of multibeam klystrons was carried out using the well-known one-dimensional programs «AJDISK» and «DISKLY». **Results.** Two designs of multibeam klystrons were considered: with six and nine resonators. It is shown that the use of the electron-optical and magnetic systems of the low-voltage multibeam klystron of the Ka-band allows us to create an efficient amplifier operating in the Ku-band with an output power from 0.5 kW (version with 6 resonators) to 1 kW (version with 9 resonators). **Conclusion.** The proposed designs of low-voltage multibeam klystrons make it possible to obtain efficient amplifiers in the Ka-frequency range with an output power of up to 1 kW. At the same time, the use of an electron-optical system of a klystron-analogue operating in the Ku-band ensures a reduction in production costs.

Key words: multibeam klystron, millimeter range, computational electrodynamics.

Reference: Tsarev V.A., Muchkaev V.Yu., Manzhosin M.A. Mathematical modeling of a low-voltage multibeam klystron of millimeter range. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 513–523.
https://doi.org/10.18500/0869-6632-2020-28-5-513-523

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Acknowledgements. This work was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant No. 17-02-00307.

Введение

Низковольтные многолучевые клистроны (НМЛК) в настоящее время находят широкое применение в бортовых передатчиках радиосистем различного назначения [1–3].

Важнейшими преимуществами НМЛК перед однолучевыми клистронами распределенного взаимодействия (КРВ) и лампами бегущей волны (ЛБВ) являются низкие питающие и модулирующие напряжения, малые габариты и масса, а также высокая устойчивость к воздействию жестких механических нагрузок. Эти приборы в настоящее время обычно работают в импульсном режиме в диапазоне частот от 10.7 до 18.0 ГГц (Ku-диапазон) при скважности от 3 до 20. Уровень их выходной мощности изменяется от сотен ватт до 1 кВт в диапазоне выбора величины ускоряющего напряжения от 2.5 до 3.5 кВ. Группирователь клистрона, как правило, состоит из пяти однозазорных призматических резонаторов, работающих на виде H_{101}. С целью достижения необходимой ширины полосы пропускания в качестве выходного резонатора обычно применяется резонансная система, состоящая из активного двухзазорного резонатора, работающего на синфазном виде колебаний, а также дополнительного пассивного резонатора.

Реализуемая ширина полосы рабочих частот НМЛК в Ku-диапазоне обычно составляет 200 . . . 300 МГц при коэффициенте усиления около 40 дБ и КПД порядка 20% [4].

Существуют также многолучевые односекционные ЛБВ, работающие в Ku-диапазоне [5]. По сравнению с НМЛК, они характеризуются несколько большими рабочим напряжением (6 . . . 8 кВ) и полосой рабочих частот (500 . . . 900 МГц), довольно высоким значением КПД (до 35%), и небольшим коэффициентом усиления (10 . . . 15 дБ).

Ужесточение требований к радиолокационным, авиационно-космическим системам, в которых используются НМЛК, приводит к необходимости разработки приборов этого класса, работающих в диапазоне частот 35 . . . 36 ГГц (Ka-диапазон).

Однако продвижение этих приборов в Ka-диапазон затруднено по ряду причин. Во-первых, с увеличением частоты уменьшаются размеры поперечного сечения пролетных каналов, что, в свою очередь, приводит к росту плотности тока электронного потока и увеличению требований к эмиссионным характеристикам катодов. Во-вторых, возрастает индукция магнитного поля, необходимая для фокусировки многолучевого электронного потока.

В-третьих, возникают значительные трудности изготовления малоразмерных деталей резонаторов с допусками 0.05 . . . 0.1 мкм. Это относится также к конструкции многолучевой электронной пушки и к ряду других функциональных узлов. Данные технологические трудности обуславливают высокую стоимость сборки и приводят к снижению процента выхода приборов[1]. В связи с этим актуальной является задача исследования возможности использования электронно-оптической и магнитной систем НМЛК Ku-диапазона для создания на их базе высокоэффективного усилителя, работающего в Ka-диапазоне.

Целью настоящей работы является исследование возможности достижения указанных выше параметров в новой конструкции НМЛК, работающего в Ka-диапазоне, при сохранении неизменной конструкции и размеров электронно-оптической системы клистрона-аналога, работающего в Ku-диапазоне.

1. Методика расчета

В качестве исходной была выбрана конструкция разработанного в АО «НПП «Алмаз» 19-лучевого усилительного клистрона, резонансная система которого образована шестью однозазорными резонаторами [3].

Для бортовых радиолокационных и телекоммуникационных систем, работающих на частоте 35 ГГц, СВЧ-усилители должны иметь параметры, находящиеся в следующих пределах: выходная импульсная мощность не менее 350 Вт с неравномерностью не более 1.5 дБ в полосе рабочих частот, ширина рабочих частот не менее 100 МГц, ускоряющее напряжение 3 . . . 5 кВ, коэффициент усиления 30 . . . 50 дБ, электронный КПД 15 . . . 20% [4].

Поиск значений размеров резонаторов и их оптимизация проводились с помощью трехмерного численного моделирования по программе REZON [6], в которой для решения уравнений Максвелла использовался метод конечных разностей во временной области с прямоугольной пространственно-временной сеткой разбиения. Электромагнитное поле в резонаторах возбуждалось с помощью точечного источника синусоидальным сигналом с огибающей в форме кривой Гаусса.

Параметры, которые характеризуют процесс взаимодействия (характеристическое сопротивление ρ и коэффициент взаимодействия для бессеточного зазора M) определялись в малосигнальном приближении по методике, изложенной в работе [7], путем численного интегрирования

[1]Процент выхода приборов – процентное отношение количества приборов, признанных годными, то есть удовлетворяющих всем требованиям технических условий, к количеству приборов, запущенных за операцию.

функций распределения напряженности электрического поля, полученных в результате численного анализа по программе [6]:

$$\rho = \frac{1}{S}\int\limits_S \rho(x,y)ds = \frac{1}{2\omega_0 W S}\int\limits_S \left(\int_{z_1}^{z_2} |E_z(x,y,z)|dz\right)^2 ds, \tag{1}$$

$$M = \frac{1}{S}\int\limits_S M(x,y)ds = \frac{1}{S}\int\limits_S \left(\frac{\int_{z_1}^{z_2} E_z(x,y,z)\exp(-j\beta_e z)dz}{\int_{z_1}^{z_2} |E_z(x,y,z)|dz}\right) ds. \tag{2}$$

Здесь $E_z(x,y,z)$ – функция распределения продольной компоненты напряженности электрического поля в пространстве взаимодействия; $S = \pi b^2$ – площадь взаимодействия, $b/a = 0.6$ – коэффициент заполнения, a – радиус пролетного канала; $W = 0.5\int_V \varepsilon_0 E^2 dV$ – энергия электромагнитного поля, V – объем исследуемого резонатора, $\varepsilon_0 = 8.85\cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\beta_e = \omega_0/v_0$ – постоянная распространения невозмущенного электронного потока, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – собственная круговая частота рабочего вида колебаний, $v_0 = \sqrt{2eU_0/m_e}$ – скорость электронного потока, U_0 – ускоряющее напряжение, e и m_e – заряд и масса электрона, соответственно.

Значение относительной электронной проводимости G_e/G_0 рассчитывалось путем численного дифференцирования по формуле, приведенной в работе [8]:

$$\left(\frac{G_e}{G_0}\right)_{cp} = -\frac{\beta_e}{2}\frac{\overline{\partial M_{cp}}}{\overline{M_{cp}}\partial\beta_e}, \tag{3}$$

где $G_0 = I_0/U_0$ – проводимость электронного потока, I_0 – ток электронного потока, $\overline{M_{cp}} = \sqrt{\sum_n M_n^2/n}$, n – количество пролетных каналов.

2. Конструкция резонансной системы

Конструкция промежуточных резонаторов (рис. 1, *a*) разрабатываемого усилительного клистрона Ka-диапазона аналогична конструкции резонаторов, установленных в клистроне, описан-

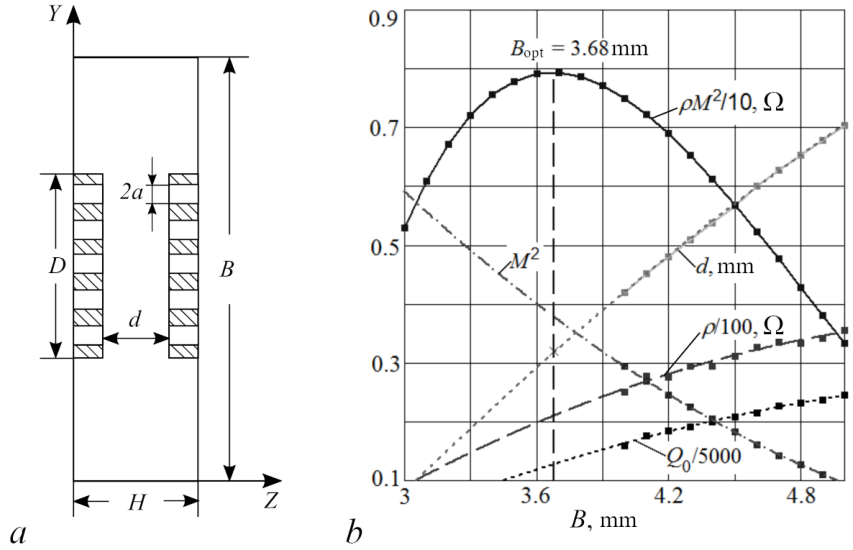

Рис. 1. *a* – Поперечное сечение промежуточного резонатора. *b* – Зависимости основных параметров резонатора от ширины стенки *B*

Fig. 1. *a* – Cross section of an intermediate resonator; *b* – Dependences of the main resonator parameters on the wall width *B*

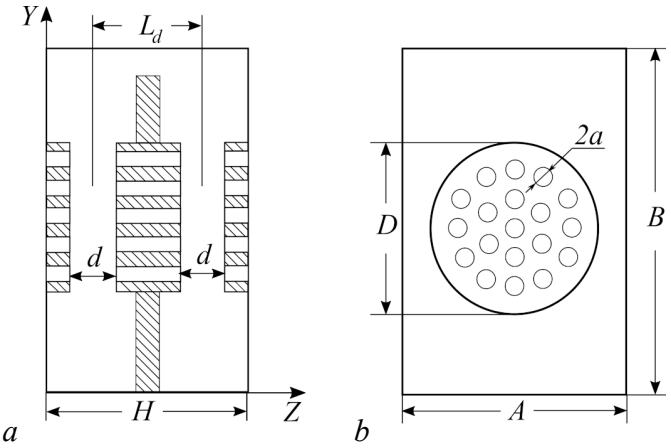

Рис. 2. Поперечное (*a*) и продольное (*b*) сечения выходного двухзазорного резонатора

Fig. 2. Cross (*a*) and longitudinal (*b*) sections of the output double-gap cavity

ном в работе [3]. На боковых стенках корпуса прямоугольной формы высотой H расположена многоканальная пролетная труба диаметром D, образующая высокочастотный СВЧ зазор шириной d. В пролетных трубах выполнены пролетные каналы с радиусом $a = 0.25$ мм.

Диаметр $D = 3.34$ мм многоканальной пролетной трубы был выбран из условия $D \leq (0.4 \ldots 0.45)\lambda$, где $\lambda = 8.57$ мм – длина волны, соответствующая центральной частоте рабочей полосы прибора [9].

Была проведена оптимизация конструкции резонатора, в ходе которой рассчитывались зависимости значений электродинамических параметров от ширины стенки B (рис. 1, *b*). При этом подстройка резонатора на заданную частоту осуществлялась за счет изменения ширины зазора d, а высота $H = 1$ мм была постоянной.

Как следует из приведенных данных, оптимальным является значение $B = 3.68$ мм. При этом характеристическое сопротивление $\rho = 21$ Ом, ширина зазора $d = 0.32$ мм, собственная добротность $Q_0 = 640$.

Выходной резонатор представлял собой двухзазорный резонатор, возбуждаемый на синфазном виде колебаний (2π-вид). Конструкция этого резонатора показана на рис. 2. Значение высоты H было выбрано равным 3 мм.

Известно, что оптимальный режим отбора мощности в нагрузку в выходном резонаторе на 2π-виде достигается при угле пролета между зазорами $\varphi_0 = m\omega_0 L_d/\upsilon_0 \approx m(1.6\pi \ldots 1.7\pi)$, где m – номер пространственной гармоники, L_d – расстояние между центрами зазоров [11]. Однако на первой пространственной гармонике $(m = 1)$ при выбранных электрических параметрах из-за малых размеров двойного зазора это условие не реализуется. Поэтому был выбран режим работы на второй пространственной гармонике $(m = 2)$. В этом случае угол пролета между зазорами резонатора ω_0 равен 3.6π (при $L_d = 2$ мм).

Значения остальных размеров были найдены после проведения расчетов по программе REZON: $A = 4$ мм, $B = 6$ мм, $d = 0.42$ мм. При этих размерах собственная добротность резонатора $Q_0 = 798$, характеристическое сопротивление $\rho = 28.6$ Ом, коэффициент взаимодействия $M = 0.44$.

3. Результаты моделирования клистронов с разными конструкциями резонаторов группирователя

Были исследованы две конструкции НМЛК с разным числом резонаторов группирователя. Первая конструкция (НМЛК1) имела резонансную систему, состоящую из шести резонаторов:

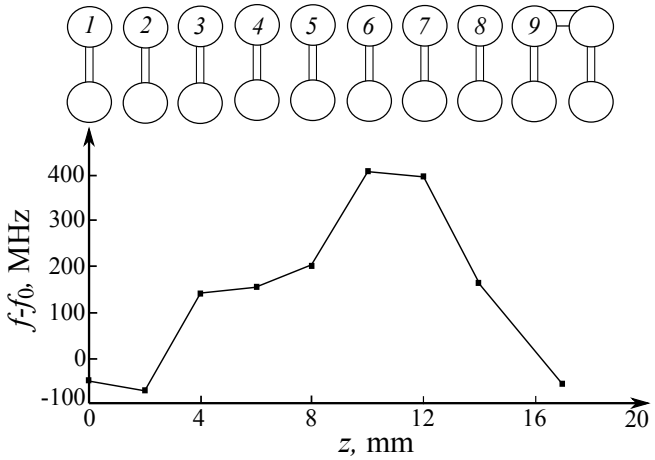

Рис. 3. Схема частотной настройки резонаторов НМЛК2

Fig. 3. Scheme of frequency tuning of resonators LMBK2

пять однозазорных резонаторов (см. рис. 1) и один выходной двухзазорный резонатор (см. рис. 2). Вторая конструкция (НМЛК2) имела резонансную систему из девяти резонаторов: восьми однозазорных резонаторов и выходного двухзазорного резонатора.

Расчеты проводились с помощью известных одномерных программ моделирования работы клистрона «AJDISK» [12] и «DISKLY» [13]. Взаимодействие электронных потоков друг с другом при пролете через зазоры резонаторов не учитывалось.

Резонаторы в рассматриваемых конструкциях клистронов были настроены по схеме, близкой к скиртронной. Согласно варианту этой схемы, описанному в работе [14], входной резонатор настраивается на нижний край полосы частот, промежуточные (группирующие) резонаторы – на частоты ее верхнего края, а выходной резонатор – на центральную частоту. При этом длины дрейфа между резонаторами подбираются из следующих условий:

$$l_1 \approx l_2 \approx \lambda_q/20, \tag{4}$$

$$l_3 \approx \lambda_q/4, \tag{5}$$

где l_1 – расстояние между входным и первым группирующим резонаторами, l_2 – расстояние между группирующими резонаторами, l_3 – расстояние между последним промежуточным и выходным резонаторами, $\lambda_q = 2\pi c/\omega_e$, c – скорость света в вакууме, ω_e – плазменная частота.

Скиртронная схема настройки не обеспечивает достаточно равномерной зависимости первой гармоники тока в выходном резонаторе от частоты. Поэтому на практике часто пользуются модифицированной схемой, в которой частота второго резонатора сдвинута ближе к центральной частоте [15].

Отличие частотной настройки НМЛК1 и НМЛК2 от скиртронной заключалось в следующем. Расстояние между всеми резонаторами было одинаковым и равным $\lambda_q/20$, то есть $l_1 \approx l_2 \approx l_3 \approx \lambda_q/20$. С учетом того, что при выбранных параметрах клистронов $\lambda_q = 36.7$ мм, расстояние между центрами зазоров резонаторов было выбрано равным 2 мм.

Частота первого промежуточного резонатора у НМЛК1 и НМЛК2 была настроена ближе к нижнему краю полосы частот (рис. 3), что позволило добиться необходимой ее ширины.

На рис. 4 показаны результаты расчета НМЛК1, полученные с помощью разных программ. Как следует из расчетов, в НМЛК с этой конструкцией можно получить максимальную выходную мощность СВЧ-излучения $P_{\text{out}} = 540$ Вт при усилении 27.5 дБ.

На рис. 5 показаны аналогичные результаты расчета для НМЛК2. Из графиков фазовых траекторий видно, что, по сравнению с НМЛК1 (рис. 4), в случае НМЛК2 качество электрон-

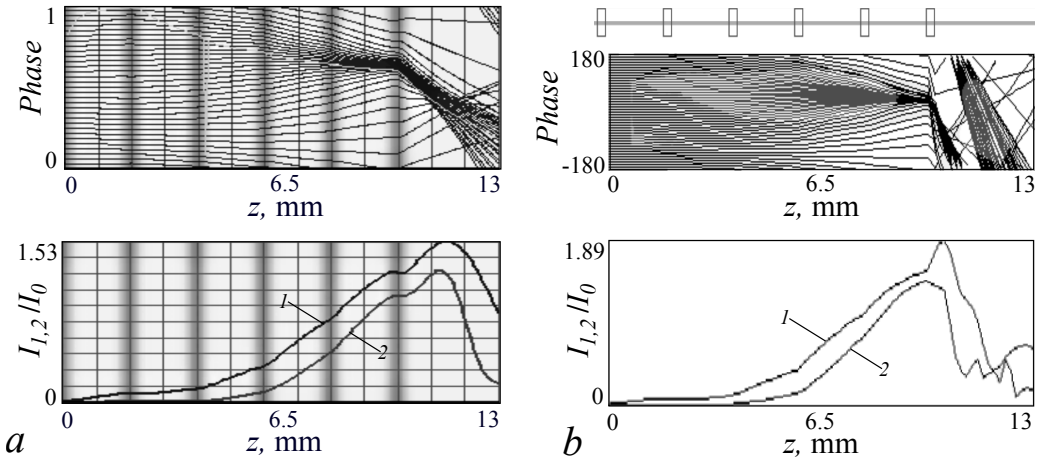

Рис. 4. Результаты расчета НМЛК1: *a* – полученные с помощью программы «AJDISK», *b* – полученные с помощью программы «DISKLY». Кривые *1* и *2* показывают зависимости нормализованных амплитуд первой I_1 и второй I_2 гармоник конвекционного тока, соответственно, от продольной координаты *z*

Fig. 4. Results of LMBK1 calculation: *a* – obtained using the «AJDISK» program, *b* – obtained using the «DISKLY» program. Curves *1* and *2* show the dependences of the normalized amplitudes of the first I_1 and second I_2 harmonics of the convection current, respectively, on the longitudinal coordinate *z*

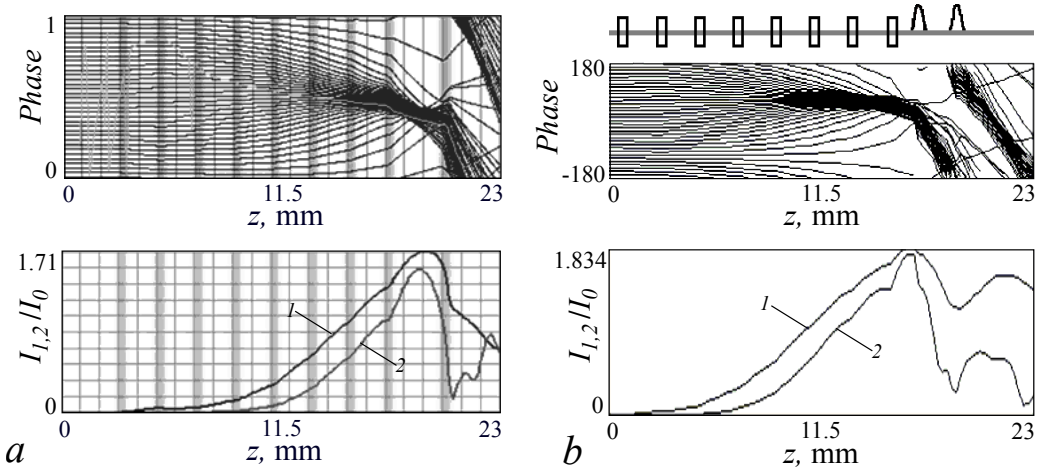

Рис. 5. Результаты расчета НМЛК2: *a* – полученные с помощью программы «AJDISK», *b* – полученные с помощью программы «DISKLY». Кривые *1* и *2* показывают зависимости нормализованных амплитуд первой I_1 и второй I_2 гармоник конвекционного тока, соответственно, от продольной координаты *z*

Fig. 5. Results of LMBK2 calculation: *a* – obtained using the «AJDISK» program, *b* – obtained using the «DISKLY» program. Curves *1* and *2* show the dependences of the normalized amplitudes of the first I_1 and second I_2 harmonics of the convection current, respectively, on the longitudinal coordinate *z*

Таблица. Ожидаемые параметры НМЛК миллиметрового диапазона
Table. Expected parameters of millimeter-range low-voltage multibeam klystron

Наименование параметра, единица измерения	КРВ	ЛБВ	НМЛК1 (расчет по AJDISK)	НМЛК2 (расчет по AJDISK)
Рабочая частота, ГГц	35	37.5	35	35
Число лучей	1	6	19	19
Выходная мощность, Вт	831	390	540	1009.7
Коэффициент усиления, дБ	37	19	27.5	35
Относительная ширина полосы рабочих частот, $\Delta f / f_0$ на уровне -3 дБ, %	0.61	–	0.61	0.75
Ускоряющее напряжение, кВ	14	6	4.2	4.2
Ток катода, А	0.5	0.36	1	1
Число резонаторов	5	–	6	9
Полный КПД, %	11.87	–	12.6	24.2
Электронный КПД, %	–	16.3	15.75	30.1
Контурный КПД, %	–	–	80	80
Приведенный радиус пролетного канала, рад	1.17	1.27	1.43	1.43
Величина фокусирующего магнитного поля, кГс	2.3	2.7	3	3

ных сгустков, влетающих в зазор выходного резонатора выше, так как почти все электроны, вылетевшие из входного резонатора за период изменения СВЧ-поля, участвуют в их формировании. Рост качества группировки электронов приводит к существенному увеличению значения максимальной выходной мощности: по программе «AJDISK» $P_{\text{out}} = 1009.7$ Вт.

Полученные с помощью программы «AJDISK» результаты расчетов НМЛК1 и НМЛК2 приведены в Таблице (по программе «DISKLY» были получены близкие по значению результаты).

Проведенное сравнение с данными численного моделирования пятирезонаторного КРВ, рассмотренного в работе [16], показало, что применяя конструкцию НМЛК2, можно при существенно меньшем ускоряющем напряжении U_0 получить большее значение выходной мощности и сопоставимый коэффициент усиления. При этом полный КПД у НМЛК2 значительно выше, чем у КРВ.

В сравнении с многолучевой ЛБВ, конструкция которой рассмотрена в работах [17, 18], НМЛК1 позволяет получить большее значение выходной мощности (540 Вт у НМЛК1 и 390 Вт у ЛБВ) при близких значениях электронного КПД.

При сопоставлении данных расчета ЛБВ и НМЛК2 видно, что у последнего значительно выше электронный КПД (почти в 2 раза) и выходная мощность (более чем в 2.5 раза) при меньшем значении ускоряющего напряжения U_0.

Тут стоит отметить, что ширина полосы рабочих частот у ЛБВ предсказуемо выше, чем у НМЛК1 и НМЛК2. В соответствии с требованиями, которые приведены в работах [17, 18], указывается значение полосы рабочих частот не менее 1 ГГц. Однако итоговое значение данного параметра, полученное по результатам расчетов, не приводится.

Обсуждение и заключение

Из полученных результатов следует, что для создания высокоэффективного усилителя, работающего в Ka-диапазоне, можно использовать электронно-оптическую и магнитную системы НМЛК Ku-диапазона. При этом устраняются проблемы изготовления малоразмерных пролетных каналов (это относится также к конструкции многолучевой электронной пушки и к ряду других

функциональных узлов), уменьшается стоимость сборки приборов и увеличивается их процент выхода.

Дальнейшее улучшение параметров НМЛК возможно за счет реализации многомодового режима взаимодействия, использования на выходе прибора трехзазорной резонаторной системы, замены оставшихся однозазорных резонаторов в группирователе на три резонатора, связанных попарно (кластерные резонаторы).

Библиографический список

1. *Закурдаев А.Д.* Мощные малогабаритные и миниатюрные многолучевые клистроны для бортовых РЛС // Радиотехника. 2006. №. 3. С. 31–33.
2. *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 // АПЭП-2018. Сентябрь 2018. Саратов: «Амирит», 2018. С. 232–236.
3. *Царев В.А., Чигуров И.А., Шалаев П.Д.* Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ku-диапазона длин волн // Радиотехника. 2015. № 7. С. 41–44.
4. *Востров М.С., Закурдаев А.Д., Макаров А.П.* О возможности реализации малогабаритных многолучевых клистронов в 8-мм диапазоне длин волн с высокой средней мощностью (до 100 Вт) // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2013. Т. 519, № 4. С. 37–45.
5. *Победоносцев А.С., Сазонов Б.В.* Односекционные многолучевые многорежимные ЛБВ // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2013. Т. 518, № 3. С. 131–135.
6. *Мучкаев В.Ю., Царев В.А.* Rezon // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011611748. 2011.
7. *Григорьев А.Д., Янкевич В.Б.* Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. М.: «Радио и связь». 1984.
8. *Caryotakis G.* High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. Menlo Park, California, «SLAC», 2005.
9. *В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков*. Многолучевой СВЧ прибор О-типа. // Патент № 0002507626. 2014.
10. *Тореев А.И., Федоров В.К., Патрушева Е.В.* Клистрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона // Радиотехника и электроника. 2009. № 8. С. 1001–1008.
11. *Тореев А.И., Федоров В.К.* Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 109–115.
12. *Jensen A.J., Caryotakis G., Scheitrum D., Sprehn D., Steele B.* Sheet beam klystron simulations using AJDISK // Proc. IEEE 7th. IVEC Conf. Monterey. Apr. 2006. Monterey. USA. 2006. P. 489–490.
13. *Teryaev V.E.* DISKLY code for calculation and optimization of klystrons // Proceedings of the Int. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF-93). July 1993. Dubna. Russia. 1993. P. 161–166.
14. *Smullin L.D., Bers A., Rummler W.R., Haus H.A., Morse D.L., Rushforth W.K., McCullough R.B.* Broadband-buncher klystron // Microwave Electronics: RLE Progress Report no. 056. «Research Laboratory of Electronics (MIT)». 1960. P. 93–107.
15. *Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И.* Микроволновая электроника: Учебник. СПб.: «Лань», 2016.

16. *Shin Y.M., Park G.S., Scheitrum G.P., Caryotakis G.* Circuit analysis of an extended interaction klystron // Journal of the Korean Physical Society. 2004. Vol. 44, no. 5 P. 1239–1245.
17. *Ракова Е.А.* Расчет проекта многолучевой «прозрачной» ЛБВ Ка-диапазона // Н.т.к. студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ имени Арменского. Февраль 2015. Москва: «МИЭМ НИУ ВШЭ», 2015. С. 169–170.
18. *Ракова Е.А., Галдецкий А.В.* Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона // Электроника и микроэлектроника СВЧ. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 104–108.

References

1. Zakurdaev A.D. Powerful small-sized and miniature multi-beam klystrons for airborne radars. *Radioengineering*, 2006, no. 3, pp. 31–33 (in Russian).
2. Vostrov M.S. Broadband miniature multi-beam klystron of two-centimeter wavelength rangewith bandwidth not less than 300 MHz and irregularity of output power not more than 1.5 dB. *2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, 2018, Saratov, pp. 232–236 (in Russian).
3. Tsarev V.A., Chigurov I.O., Shalaev P.D. Improved output parameters of multi-beam compact amplifier pulse klystron of Ku-band wavelengths. *Radioengineering*, 2015, vol. 7, pp. 41–44 (in Russian).
4. Vostrov M.S., Zakurdayev A.D., Makarov A.P. On the possibility of realizing small-sized multipath klystrons in the 8 mm wavelength range with high average power (up to 100 W). *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnika*, 2013, vol. 519, no. 4, pp. 37–45 (in Russian).
5. Pobedonostsev A.S., Sazonov B.V. Single-section multibeam multi-mode TWT. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1: SVCH-tekhnika*, 2013, vol. 518, no. 3, pp. 131–135 (in Russian).
6. Muchkaev V.Yu., Tsarev V.A. Rezon. Certificate of official registration of a computer program, no. 2011611748. 2011 (in Russian).
7. Grigor'yev A.D., Yankevich V.B. Microwave resonators and resonator slowdown systems. Numerical methods of calculation and design. Moscow, «Radio i Svyaz», 1984 (in Russian).
8. Caryotakis G. High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. Menlo Park, California, «SLAC», 2005.
9. Pugnin V.I., Yunakov A.N. O-type multipath microwave device. Patent No. 0002507626, 2014 (in Russian).
10. Toreev A.I., Fedorov V.K., Patrusheva E.V. Millimeter-wave extended interaction klystrons. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 8, pp. 952–958.
11. Toreev A.I., Fedorov V.K. Millimeter-wave extended interaction amplifier klystron. *Prikladnaya Fizika*, 2011, no. 54, pp. 109–115.
12. Jensen A.J., Caryotakis G., Scheitrum D., Sprehn D., Steele B. Sheet beam klystron simulations using AJDISK. *Proc. IEEE 7th. IVEC Conf. Monterey*, Apr., 2006, Monterey, USA, 2006, pp. 489–490.
13. Teryaev V.E. DISKLY code for calculation and optimization of klystrons. *Proceedings of the Int. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF-93)*. July 1993, Dubna, Russia, 1993, pp. 161–166.
14. Smullin L.D., Bers A., Rummler W.R., Haus H.A., Morse D.L., Rushforth W.K., McCullough R.B. Broadband-buncher klystron. *Microwave Electronics: RLE Progress Report No. 056*. «Research Laboratory of Electronics (MIT)», 2001, pp. 93–107.

15. Grigor'yev A.D., Ivanov V.A., Molokovskii S.I. Microwave Electronics. St. Petersburg, «Lan», 2016 (in Russian).
16. Shin Y.M., Park G.S., Scheitrum G.P., Caryotakis G. Circuit analysis of an extended interaction klystron. *Journal of the Korean Physical Society*, 2004, Vol. 44, no. 5, pp. 1239–1245.
17. Rakova E.A. Calculation of the project of multibeam «transparent» TWT Ka-band. *S.t.c. of Students, Postgraduates and Young Professionals of the NRU HSE*, 2015, Moscow, pp. 169–170 (in Russian).
18. Rakova E.A., Galdetsky A.V. Multibeam «transparent» TWT millimeter wave. *Elektronika i mikroelektronika SVCH*, 2015, SPb, pp. 104–108 (in Russian).

Царев Владислав Алексеевич – родился в Саратове (1943). Окончил с отличием Саратовский авиационный техникум (1962). В 1996 г. защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук в диссертационном Совете при НИИ «Исток» (Московская область, г. Фрязино). С 1999 года является профессором кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета. Научные интересы – технологии создания электронной компонентной базы в области мощных электровакуумных СВЧ-приборов клистронного типа и их гибридов, включая микроволновые устройства наноэлектроники с автоэмиссионными катодами; компьютерное моделирование и проектирование электродинамических, электронно-оптических и магнитных фокусирующих систем этих приборов; СВЧ-энергетика.

Россия, 410054 Саратов, Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410033 Саратов, ул. Панфилова, д. 1
АО «НПП» Алмаз»
E-mail: tsarev_va@mail.ru

Мучкаев Вадим Юрьевич – родился в с. Широком Татищевского района Саратовской области (1986). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2008). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Разработка и исследование резонансных систем на основе двухзазорных резонаторов для мощных широкополосных многолучевых СВЧ-приборов клистронного типа» по специальности «Вакуумная и плазменная электроника» (2011, СГТУ). С 2011 года работает на кафедре «Электронный приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета в должности доцента. Научные интересы – мощные и сверхмощные источники излучения СВЧ и ТГЧ диапазонов, многолучевые и ленточные электронные потоки, методы численного моделирования и проектирования электродинамических, электронно-оптических систем; моделирование взаимодействия электронных потоков с СВЧ-полями.

Россия, 410054 Саратов, Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
E-mail: muchkaev_vadim@mail.ru

Манжосин Михаил Алексеевич – родился в Саратове (1988). Окончил факультет электронной техники и приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. по направлению «Электронные приборы и устройства» (2010). Является аспирантом 4 курса очной формы обучения по направлению «Электроника, радиотехника и системы связи», направленность «Вакуумная и плазменная электроника». С 2009 года работает в АО «НПП «Алмаз», с 2017 года на должности заместителя начальника испытательно-измерительного комплекса. Научные интересы – электровакуумные СВЧ-приборы на ЛБВ и клистронах. Опубликовал 11 научных статей и 1 патент на изобретение по указанным направлениям.

Россия, 410054 Саратов, Политехническая, 77
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410033 Саратов, ул. Панфилова, д. 1
АО «НПП» Алмаз»
E-mail: mina-1988@mail.ru