




Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 6
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6)

Научная статья
УДК 537.862
DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-915-926

Генерация двухчастотного излучения в монодроне с трехзакорным резонатором

В. Ю. Мучкаев , А. П. Онищенко, В. А. Царев

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия

Е-mail: muchkaev_vadim@mail.ru, onishchenkoap@gmail.com, tsarev_va@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2021, принята к публикации 05.07.2021, опубликована 30.11.2021

Аннотация. Цель настоящей работы – исследование режимов и условий, позволяющих добиться возбуждения генерации СВЧ-колебаний на высшем виде колебаний, частота которого кратна частоте основного вида, в монодроне с трехзакорным резонатором. Методом исследований является трехмерное численное моделирование, с помощью которого были подобраны размеры и рассчитаны основные электродинамические параметры резонатора (характеристическое сопротивление, коэффициент взаимодействия, относительная электронная проводимость), рассмотрены режимы работы монодрона, которые характеризуются возбуждением колебаний на высшем виде. Результат. В рассматриваемом резонаторе можно добиться кратного (равного трем) отношения частоты 25-го высшего вида колебаний и частоты $\pi/2$ -вида. Анализ результатов 3D моделирования показал, что в таком резонаторе возможно одновременное возбуждение генерации электромагнитных колебаний на этих частотах. Максимальное значение мощности колебаний на частоте 100.22 ГГц достигло 15.4 Вт при ускоряющем напряжении 7825 В и микропервансе электронного потока 0.36 мкА/В^{3/2}. Максимальное значение КПД на третьей гармонике составило 0.83% при общем (с учетом генерации электромагнитных колебаний на основной и третьей гармониках) КПД 17% для рассмотренного резонатора. Заключение. Установлено, что предложенный метод генерации терагерцевого излучения достаточно перспективен для дальнейшего развития и решает проблемы классических СВЧ-приборов в миллиметровом диапазоне, такие как критически малые размеры элементов и высокая плотность тока электронного луча.

Ключевые слова: трехзакорный резонатор, монодрон, миллиметровый диапазон длин волн, вычислительная электродинамика.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 19-07-00611.

Для цитирования: Мучкаев В. Ю., Онищенко А. П., Царев В. А. Генерация двухчастотного излучения в монодроне с трехзакорным резонатором // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 6. С. 915–926.

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-915-926

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

Generation of double-frequency radiation in monotron with three-gap cavity

V. Y. Muchkaev✉, A. P. Onishchenko, V. A. Tsarev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia

E-mail: ✉muchkaev_vadim@mail.ru, onishchenkoap@gmail.com, tsarev_va@mail.ru

Received 23.05.2021, accepted 05.07.2021, published 30.11.2021

Abstract. Purpose of this work is to study modes and conditions that make it possible to excite the highest type of microwave oscillations, the frequency of which is a multiple of the frequency of the main type, in a monotron with a three-band resonator. Method of the investigation is a numerical 3D modeling, used to calculate the dimensions and electrodynamic parameters of the resonator (characteristic impedance, coupling coefficient, relative electronic conductivity); operation modes of the monotron are considered, which are characterized by excitation of oscillations in the highest type oscillations. Result. In the resonator under consideration, it is possible to achieve a multiple (equal to three) ratio between the frequency of the 25th highest type of oscillations and the frequency of the $\pi/2$ -type. It was shown that in such resonator simultaneous excitation of electromagnetic field on those frequencies can be made. The maximum of an output power achieved at 100.22 GHz is 15.4 W with an accelerating voltage of 7825 V and an electronic beam microperveance $0.36 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$. The maximal efficiency on a third harmonic is 0.83% while the total efficiency (generating electromagnetic waves of the first and the third harmonics) is up to 17%. Conclusion. It was set that the described method of generation of terahertz range radiation is promising for further investigation, as it solves problem that orthodox microwave devices meet in the millimeter wavelength range, such as small linear dimensions of the components and critical current density of the electronic beam.

Keywords: three-gap cavity, monotron, millimeter wavelength range, PIC modeling.

Acknowledgements. This work was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-07-00611.

For citation: Muchkaev VY, Onishchenko AP, Tsarev VA. Generation of double-frequency radiation in monotron with three-gap cavity. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6):915–926.

DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-915-926

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

Введение

Создание компактных, мощных и эффективных источников терагерцевого (ТГц) и субтерагерцевого (суб-ТГц) диапазонов частот (миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн) является одной из актуальных задач современной вакуумной СВЧ-электроники [1–3].

Электромагнитное излучение в этих диапазонах обладает как свойствами радиоволн, так и свойствами света: оно не ионизирует объект воздействия, имеет высокую направленность и прозрачность для широкого набора непроводящих материалов [4].

Эти свойства определяют перспективы создания новых, работающих в этом диапазоне длин волн, средств анализа материалов, устройств для исследования свойств плазмы и управления ее параметрами [5], для создания систем передачи информации со сверхбольшой пропускной способностью (до 10 Гбит/с и более) [6, 7], приборов для лечения и диагностики заболеваний [8], систем безопасности [9]. Все эти приложения требуют применения относительно недорогих, простых в эксплуатации и достаточно мощных (от нескольких десятков до нескольких тысяч и более ватт) источников излучения.

Одним из наиболее простых по конструкции приборов в вакуумной СВЧ-электронике является монотрон [10, 11], в котором можно добиться как весьма высоких значений выходной мощности [12], так и КПД [13, 14].

Классические методы по увеличению частоты генерации монотронов, основанные на уменьшении характерных линейных размеров, как и в случае традиционных вакуумных СВЧ-приборов (клистронов, КРВ, ЛБВ, ЛОВ), оказываются труднореализуемыми, что вызвано физическими

и технологическими ограничениями: плотность тока, удельная термическая нагрузка и значения механических допусков принимают критические значения [15].

Альтернативным способом является работа на высших видах колебаний. Однако с ростом порядкового номера вида колебаний его основные электродинамические параметры (характеристическое сопротивление ρ , коэффициент взаимодействия M , электронная проводимость g_e) имеют тенденцию к снижению, в связи с чем резко возрастает минимальная величина тока возбуждения.

Тем не менее возбудить генерацию на высшем виде электромагнитных колебаний возможно и при токах значительно ниже значения минимального тока возбуждения при условии достижения кратного соотношения между частотами основного и высшего вида колебаний [16].

В данной работе рассматриваются режимы генерации на высшем виде колебаний в монодроне с трехзачорным резонатором. Путем подбора размеров резонатор можно настроить таким образом, чтобы частота одного из высших видов колебаний (в дальнейшем будем называть его высшим рабочим видом), способного относительно эффективно взаимодействовать с электронным потоком, была равна $f_n = n f_1$, где f_1 – частота вида колебаний, выбранного в качестве основного рабочего, а n – порядок кратности (в работе рассматривается случай, когда $n = 3$). При прохождении электронного потока в таком резонаторе возможно получить генерацию электромагнитного излучения сразу на двух частотах: f_1 и f_n .

1. Конструкция резонатора

Конструкция исследуемого трехзачорного резонатора показана на рис. 1. Он образован резонансными полостями 1, 2 и 3, имеющими форму параллелепипеда. Связь между соседними резонансными полостями обеспечивалась с помощью двух П-образных щелей связи. За счет изменения параметров a и b щелей связи осуществлялась подстройка частот основного и высшего видов колебаний.

Для пролета многолучевого электронного потока предусмотрено 10 цилиндрических каналов 4 радиусом $r_a = 0.2$ мм, расположенных в двух стволах (по пять каналов в каждом стволе).

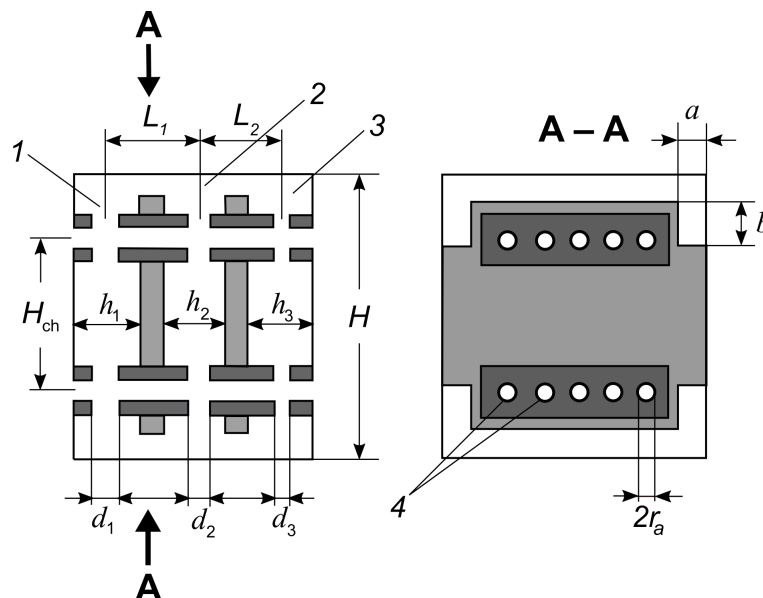


Рис. 1. Продольное и поперечное сечения исследуемого трехзачорного резонатора

Fig. 1. Longitudinal and cross section of the considered resonator

Для начала расчетов были выбраны следующие исходные значения.

1. Основным рабочим видом колебаний был выбран $\pi/2$ -вид колебаний с частотой $f_1 \approx 33.3$ ГГц. Следовательно, высший вид должен иметь частоту 100 ГГц.
2. Резонатор образован резонансными полостями одинаковой высоты $h = h_1 = h_2 = h_3$.
3. Расстояние между стволами $H_{ch} \approx \lambda_n/2$ (см. рис. 1), где λ_n – длина волны высшего вида колебаний с частотой $3f_1$.
4. Ускоряющее напряжение $U_0 = 8$ кВ.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом резонаторе видом с наименьшей частотой является π -вид с противоположными ВЧ-напряжениями на зазорах; $\pi/2$ -вид – это первый высший вид (кривая 1 на рис. 2) с околонулевыми ВЧ-напряжениями в зазорах второй резонансной полости (обозначенной цифрой 2 на рис. 1) и противоположными в зазорах первой и третьей (обозначенными цифрами 1 и 3 на рис. 1) резонансных полостей. Выбор этого вида в качестве основного рабочего обусловлен, во-первых, удобством настройки его частоты для достижения условия $f_3 = 3f_1$ (где f_3 – частота высшего рабочего вида колебаний). Во-вторых, положение второй резонансной полости слабо влияет на взаимодействие электронного потока с $\pi/2$ -видом. Следовательно, выбор расстояний $L_{1,2}$ определяется только достижением максимально эффективного взаимодействия электронного потока с полем высшего рабочего вида колебаний.

Расчеты распределения электромагнитного поля резонатора и его собственных частот проводились методом трехмерного численного моделирования, в основе которого лежит решение уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD) с прямоугольной пространственно-временной сеткой разбиения [17–19]. Электромагнитное поле в резонаторе возбуждалось с помощью точечного источника синусоидальным сигналом с гауссовой огибающей. Стенки резонатора рассматривались как идеальные проводники.

Предварительные расчеты показали, что 25-й высший вид колебания имеет частоту, близкую к 100 ГГц, и пространственное распределение электрического поля, способного относительно эффективно взаимодействовать с электронным потоком. У этого вида колебаний ВЧ-напряжения противоположны на зазорах 1 и 3 (кривая 2 на рис. 2), и он был выбран в качестве высшего рабочего вида колебаний.

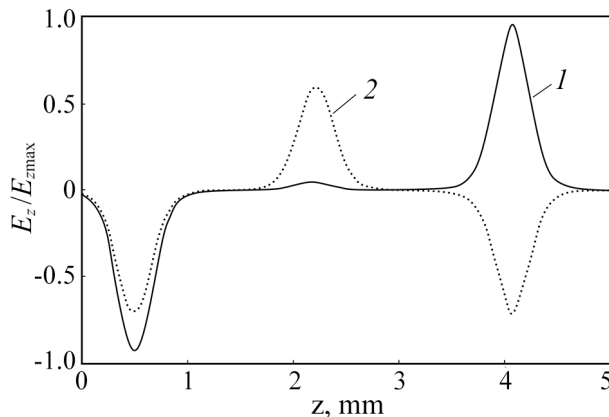


Рис. 2. Распределение продольной компоненты напряженности электрического поля основного рабочего ($\pi/2$)-вида колебания (кривая 1) и высшего рабочего вида колебания (кривая 2) в пролетном канале резонатора

Fig. 2. Distribution of the longitudinal component of the main operating ($\pi/2$)-mode (curve 1) and higher operating mode (curve 2) electric fields in a drift tube of the considered resonator

Расстояние $L_{1,2}$, определяющее угол пролета электронов между центрами зазоров при заданном ускоряющем напряжении, вычислялось по формуле

$$L = \frac{\phi v_0}{\omega}, \quad (1)$$

где ϕ – угол пролета между зазорами, $\omega = 2\pi f$ – собственная круговая частота рабочего вида колебаний, $v_0 = \sqrt{2eU_0/m_e}$ – скорость электронного потока, e и m_e – заряд и масса электрона, соответственно.

В итоге были выбраны следующие расстояния между зазорами: $L_1=1.72$ мм, $L_2=1.85$ мм. Они обеспечивают попадание электронных сгустков в тормозящую фазу поля основного рабочего вида колебаний в зазорах третьей резонансной полости и в тормозящую фазу поля высшего рабочего вида колебаний в зазорах второй и третьей резонансной полости.

Остальные размеры были подобраны в ходе настройки резонаторов на заданную частоту основного ($f_1 \approx 33.3$ ГГц) и высшего видов колебаний ($f_3 \approx 100$ ГГц): $h = 1$ мм, $H = 3.9$ мм, $H_{ch} = 2.4$ мм, $r_a = 0.2$ мм.

2. Расчет электродинамических параметров исследуемого резонатора

Характеристическое сопротивление ρ и коэффициент взаимодействия M рассчитывались путем численного интегрирования по формулам [20]:

$$\rho = \frac{1}{S} \int_S \rho(x, y) ds = \frac{1}{4\pi f W S} \int_S \left(\int_{Z_1}^{Z_2} |E_z(x, y, z)| dz \right)^2 ds, \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{S} \int_S M(x, y) ds = \frac{1}{S} \int_S \left(\frac{\int_{Z_1}^{Z_2} E_z(x, y, z) e^{-j\beta_e Z} dz}{E_z(x, y, z) dz} \right)^2 ds, \quad (3)$$

где $E_z(x, y, z)$ – функция распределения продольной компоненты величины электрического поля, $\beta_e = 2\pi f_0 / v_0$ – постоянная распределения невозмущенного электронного потока, f_0 – рабочая частота, $S = 0.36\pi r_a^2$ – площадь области взаимодействия, $W = 0.5 \int_V \epsilon_0 E^2 dV$ – электромагнитная энергия, E – напряженность электрического поля, V – объем исследуемого резонатора.

Вычисленные значения коэффициента взаимодействия позволили найти относительную электронную проводимость [21]:

$$g_e = -\frac{\beta_e}{4} \frac{\partial |M^2|}{\partial \beta_e}. \quad (4)$$

Величина добротности резонатора найдена по формуле, приведенной в работе [22]

$$Q = \frac{2\pi f_0 W}{P_v + P_s}, \quad (5)$$

где $P_v = \pi f_0 \epsilon_0 \epsilon_r \tan(\delta) \int_V |E|^2 dv$ – потери в объеме диэлектрика, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость, $P_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \mu f_0}{\sigma}} \int_S |H_{\tan}|^2 ds$ – поверхностные потери, $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $\tan(\delta)$ – тангенс диэлектрических потерь, μ – магнитная проницаемость металлических стенок, σ – удельная проводимость, H_{\tan} – тангенциальная компонента величины магнитного поля.

Интегралы, стоящие в выражениях (2), (3), (5), определялись численно по найденным ранее в узлах пространственной сетки значениям электрического поля. Шаг интегрирования определялся величиной шага пространственной сетки. Расчет по формуле (4) проводился методом численного дифференцирования.

Полученные значения характеристического сопротивления приведены в Таблице.

Таблица. Характеристическое сопротивление в пролетных каналах резонатора
Table. Characteristic impedance in the transit channels of the resonator

Номер пролетного канала (слева направо)	1, 5	2, 4	3
$\pi/2$ -вид	16.2 Ом	22.9 Ом	25.5 Ом
π -вид	12.9 Ом	11.3 Ом	9.1 Ом

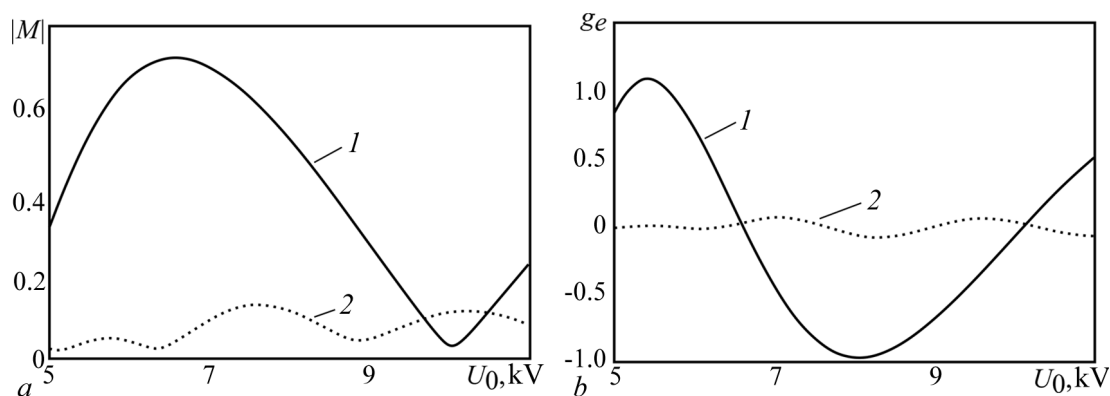


Рис. 3. Результаты расчетов зависимостей коэффициента взаимодействия M (a) и относительной электронной проводимости g_e (b) от ускоряющего напряжения U_0 на основном (кривые 1) и высшем (кривые 2) рабочих видах колебаний

Fig. 3. Dependencies of the coupling coefficient M (a) and relative electronic conductivity g_e (b) over accelerating voltage U_0 . Curve 1 – main operating mode; curve 2 – highest operating mode

На рис. 3, a представлены характерные зависимости коэффициента взаимодействия M основного и высшего рабочих видов колебаний от напряжения U_0 , рассчитанные по формуле (3).

Зависимости относительной электронной проводимости g_e , рассчитанные по формуле (4), показаны на рис. 3, b.

Из представленных данных видно, что в диапазоне ускоряющих напряжений 7.7...9 кВ значение относительной электронной проводимости на основном и высшем рабочих видах колебаний отрицательно. Следовательно, возможно одновременное возбуждение этих видов колебаний.

3. Режим генерации двухчастотных колебаний

Рассмотрим возможность одновременного возбуждения в рассматриваемом трехзорном резонаторе электромагнитных колебаний на основном и высшем рабочих видах.

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель, основанная на решении самосогласованной системы уравнений Максвелла–Власова в трехмерном случае. При этом электромагнитные поля вычислялись непосредственно решением уравнений Максвелла с помощью метода конечных разностей с граничными условиями, соответствующими идеально проводящим стенкам пространства взаимодействия, в прямоугольной системе координат на пространственно-временных сетках с постоянными шагами по времени. Электронный поток, движущийся в пролетных каналах, представляется потоком «макрочастиц» с одинаковым удельным зарядом, равным заряду электрона. Интегральные характеристики (плотность заряда, плотность тока и т.д.) находились с помощью взвешивания частиц на пространственно-временной сетке и затем использовались при нахождении электромагнитных полей в расчетной области [23, 24]. Во время моделирования магнитное поле имело только продольную компоненту $B_z = 0.2$ Тл.

Резонатор имел две щели связи с внешней нагрузкой: первая – в боковой стенке второй резонансной полости, вторая – в боковой стенке третьей резонансной полости. Расположение и размеры щелей связи были подобраны таким образом, чтобы первая щель связи нагружала, в основном, высший рабочий вид колебаний, а вторая – основной.

Максимальный общий ток I_0 моноростного несгруппированного электронного потока, возбуждающего монотрон, был ограничен значением 0.25 А (ток в одном электронном луче не превышал 25 мА). Следовательно, максимальная плотность тока составляла 55.3 А/см².

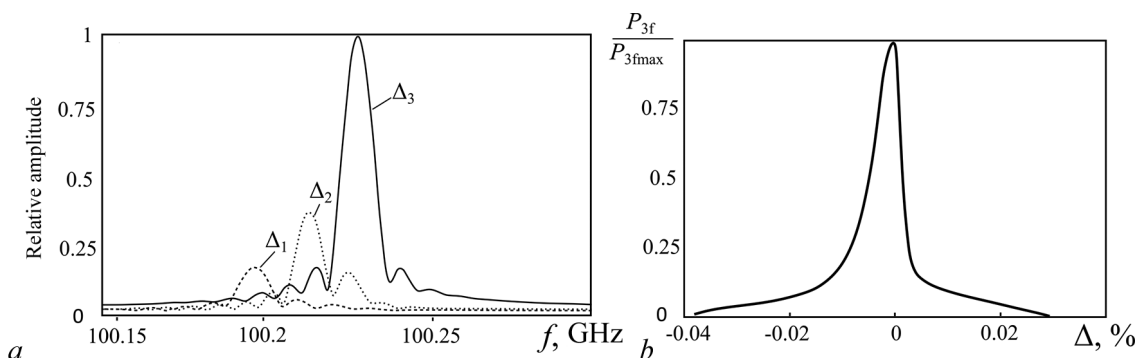


Рис. 4. *a* – Участок фурье-спектра сигнала, снимаемого с щели связи второй резонансной полости при различных значениях параметра расстройки $\Delta = (1 - 3f_1/f_3) \cdot 100\%$, при этом $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3 \approx 0$. *b* – Зависимость приведенной выходной мощности на высшем виде колебаний от параметра расстройки Δ

Fig. 4. *a* – Part of the Fourier spectrum of a signal, picked from the connection slit of the second resonant cavity with a changing value of detuning $\Delta = (1 - 3f_1/f_3) \cdot 100\%$, while $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3 \approx 0$. *b* – Dependency of the normalized output power at highest operating mode over the value of detuning Δ

Из результатов расчетов следует, что, когда отношение f_3/f_1 не равно 3, генерация СВЧ-мощности происходит только на частоте f_1 (в спектре, конечно, присутствует составляющая с частотой $3f_1$, но ее относительная амплитуда более чем на 40...50 дБ ниже спектральной составляющей с частотой f_1). Амплитуда составляющей с частотой $3f_1$ увеличивается при приближении значения соотношения f_3/f_1 к 3 и достигает максимального значения, когда $f_3/f_1 = 3$ (рис. 4, *a*). Ширина полосы, в которой наблюдалось резонансное взаимодействие третьей гармоники тока с электромагнитным полем высшего вида колебаний, определялась нагруженной добротностью на высшем виде и составляла в расчетах 8...15 МГц (рис. 4, *b*).

Стоит отметить, что спектральная составляющая с частотой $2f_1$ при этом была на 30 дБ меньше спектральной составляющей с частотой $3f_1$ (рис. 5).

Были проведены расчеты по нахождению оптимального значения ускоряющего напряжения, нагруженной добротности и тока пучка.

В процессе моделирования максимальная мощность и КПД достигались при $U_0 = 7825$ В. Наибольшая выходная мощность P_{3f} на частоте $f_3 = 3f_1 = 100.22$ ГГц составила 15.4 Вт при

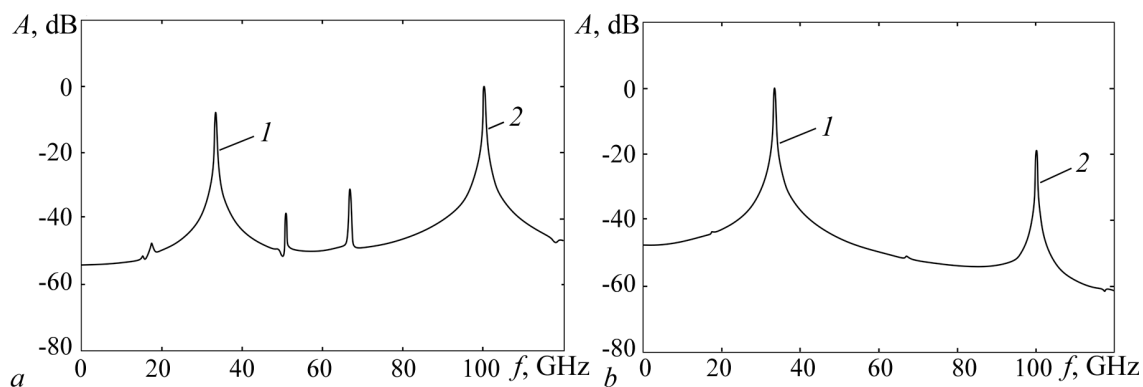


Рис. 5. Спектры колебаний сигнала, снимаемого со второй (*a*) и третьей (*b*) резонансных полостей в режиме установившихся колебаний при токе электронного потока 0.25 А и ускоряющем напряжении 7825 В. Частота основного вида колебаний 33.41 ГГц (1), высшего вида – 100.22 ГГц (2)

Fig. 5. Spectrum of the signal picked from the second (*a*) and the third (*b*) resonant cavities working on the steady-state regime. The electron flow current is 0.25 A, accelerating voltage is 7825 V. Frequency of the main operating mode is 33.41 GHz (1), frequency of the 100.22 GHz (2)

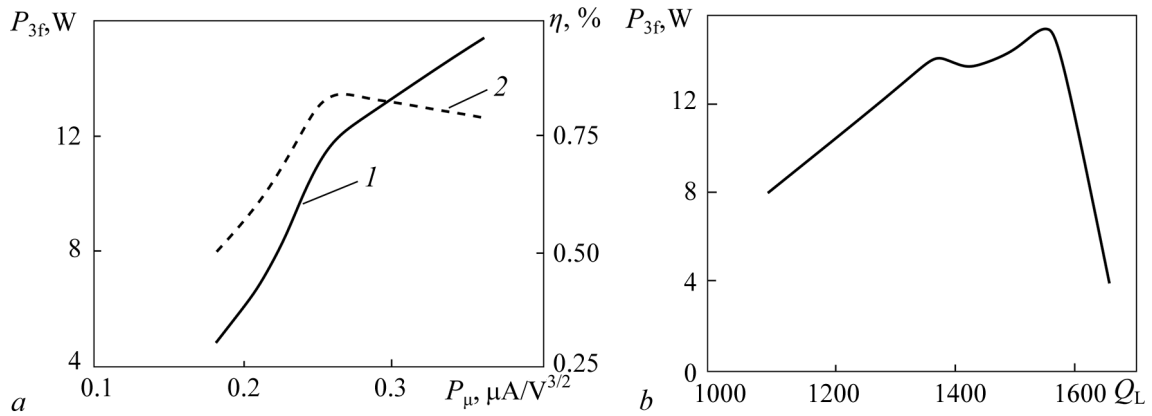


Рис. 6. Результаты моделирования возбуждения монотрона моноразностным несгруппированным электронным потоком при ускоряющем напряжении $U_0 = 7825 \text{ В}$: *a* – зависимости выходной мощности (кривая 1) и КПД (кривая 2) на высшем виде колебаний от микропервеанса электронного потока P_μ при нагруженной добротности $Q_L = 1541$; *b* – зависимость выходной мощности на высшем виде колебаний от величины нагруженной добротности Q_L при микропервеансе $P_\mu = 0.36 \text{ мкА}/\text{В}^{3/2}$

Fig. 6. Modeling results of the excitation of monotrone by non modulated monovelocity electronic flow with accelerating velocity $U_0 = 7825 \text{ V}$. *a* – dependencies of the output power (curve 1) and efficiency (curve 2) on the higher order mode over microperveance of the electron flow P_μ with a loaded Q-factor $Q_L = 1541$; *b* – dependence of the output power over the value of loaded Q-factor with microperveance $P_\mu = 0.36 \text{ }\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$

токе электронного потока 0.25 А (рис. 6, *a*). Выходная мощность на частоте f_1 при этом была 332.6 Вт .

Максимальный КПД по третьей гармонике составил 0.83% и был получен при $I_0 = 0.18 \text{ А}$ (что соответствует микропервеансу электронного потока $P_\mu = 0.26 \text{ мкА}/\text{В}^{3/2}$) при общем КПД (с учетом генерации СВЧ-мощности на частоте $f_1 = 33.41 \text{ ГГц}$ и на частоте $3f_1 = 100.22 \text{ ГГц}$) в 17% . Оптимальная нагруженная добротность Q_L на высшем виде колебаний составила 1541 (рис. 6, *b*) при значении собственной добротности $Q_0 = 1978$.

Заключение

Таким образом, анализ результатов показал, что в рассматриваемом трехзворном резонаторе при наступлении кратного соотношения частот высшего и основного рабочих видов колебаний возможно возбуждение электромагнитных колебаний на высшем виде с частотой $3f_1$. С ростом тока электронного потока мощность генерации как на основном, так и на высшем виде колебаний ожидаемо растет. На высшем виде колебаний максимальное значение выходной мощности составило 15.4 Вт при микропервеансе электронного потока $0.36 \text{ мкА}/\text{В}^{3/2}$. Максимальное значение КПД по третьей гармонике составило 0.83% и получено при $P_\mu = 0.26 \text{ мкА}/\text{В}^{3/2}$. Несмотря на то, что результаты были получены для частоты 100 ГГц , они позволяют заключить о перспективности применения данного метода для освоения терагерцевого диапазона частот.

Стоит отметить, что помимо рассмотренной в работе схемы с соотношением частот высшего и основного видов колебаний, равного трем, возможно получить и другие кратные соотношения. Пример конструкции с соотношением $f_n = 2f_1$ приведен в работе [16].

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что при росте порядка кратности n становится сложнее возбудить высший вид колебаний с частотой f_n . Последнее вызвано, во-первых, снижением значений ρ и M на высшем виде колебаний и, как следствие, увеличением значения тока возбуждения. Во-вторых, уменьшается амплитуда соответствующей гармоники тока электронного потока, который вначале модулируется только полем основного вида колебаний.

В-третьих, увеличивается неравномерность продольной компоненты электрического поля высшего вида вдоль радиуса пролетного канала, что также ухудшает взаимодействие с электронным потоком.

Частично решить перечисленные проблемы можно за счет увеличения количества зазоров резонатора и перехода к многоствольным конструкциям, что и было продемонстрировано в данной работе. Однако это приводит к усложнению конструкции.

Список литературы

1. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН. 2011. Т. 181, № 8. С. 867–874.
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201108f.0867.
2. Grigoriev A. D. Terahertz electronics // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 27–28 Sept. 2018, Saratov, Russia. New York: IEEE, 2018. P. 5–10. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542172.
3. Federici J., Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107, no. 11. P. 111101. DOI: 10.1063/1.3386413.
4. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nature Photon. 2007. Vol. 1, no. 2. P. 97–105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3.
5. Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В., Мещанов В. П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУР. 2014. № 4(34). С. 5–21.
6. Григорьев А. Д. Проблемы разработки источников мощного когерентного излучения терагерцового диапазона // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 139–143.
7. Вишневецкий В., Фролов С., Шахнович И. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 1. С. 90–97.
8. Taylor Z. D., Singh R. S., Bennett D. B., Tewari P., Kealey C. P., Bajwa N., Culjat M. O., Stojadinovic A., Lee H., Hubschman J.-P., Brown E. R., Grundfest W. S. THz medical imaging: in vivo hydration sensing // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, no. 1. P. 201–219.
DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159551.
9. Pawar A. Y., Sonawane D. D., Erande K. B., Derle D. V. Terahertz technology and its applications // Drug Invention Today. 2013. Vol. 5, no. 2. P. 157–163.
DOI: 10.1016/j.dit.2013.03.009.
10. Bronwell A. B., Beam R. E. Theory and Application of Microwaves. New York: McGraw-Hill, 1947. 486 p.
11. Birdsall C. K., Bridges W. B. Electron Dynamics of Diode Regions. New York: Academic Press, 1966. 270 p.
12. Barroso J. J., Kostov K. G. A 5.7-GHz, 100-kW microwave source based on the monotron concept // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. Vol. 27, no. 2. P. 580–586. DOI: 10.1109/27.772289.
13. Царев В. А., Мучкаев В. Ю., Шалаев П. Д. Исследование многолучевого микроволнового генератора пролетного типа К-диапазона с электродинамической системой из двух связанных через щель резонаторов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 7. С. 25–34.
14. Мучкаев В. Ю., Федяев В. К., Царев В. А. Численное исследование электродинамических свойств многолучевого монотрона с трехзазорным резонатором К-диапазона частот // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 9. С. 886–890.
DOI: 10.7868/S0033849416090084.
15. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., Kory C. L., Neil G. R., Park G.-S., Park J., Temkin R. J.

- Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, no. 1. P. 54–75. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2151610.
16. Muchkaev V. Y., Senchurov V. A., Kurkin S., Badarin A. Electron flow modulation in double-gap cavity with a multiple ratio of the two modes frequencies // IEEE Trans. Electron Devices. 2021. Vol. 68, no. 2. P. 835–840. DOI: 10.1109/TED.2020.3046994.
 17. Sullivan D. M. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method. New York: IEEE Press, 2000. 165 p.
 18. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comput. Phys. 1994. Vol. 114, no. 2. P. 185–200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159.
 19. Kunz K. S., Luebbers R. J. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. New York: CRC Press, 1993. 464 p.
 20. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
 21. Caryotakis G. High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center. No. SLAC-PUB 10620. Menlo Park, CA, USA: Stanford Linear Accelerator Center, 2005. 138 p.
 22. Карлинер М. М. Электродинамика СВЧ: Курс лекций. Новосибирск: НГУ, 2006. 258 с.
 23. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979. 224 с.
 24. Бэдсел Ч., Лэнгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.

References

1. Bratman VL, Litvak AG, Suvorov EV. Mastering the terahertz domain: sources and applications. Physics-Uspekhi. 2011;54(8):837–844. DOI: 10.3367/UFNe.0181.201108f.0867.
2. Grigoriev AD. Terahertz electronics. In: 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 27-28 Sept. 2018, Saratov, Russia. New York: IEEE; 2018. P. 5–10. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542172.
3. Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications. J. Appl. Phys. 2010;107(11):111101. DOI: 10.1063/1.3386413.
4. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. Nature Photon. 2007;1(2):97–105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3.
5. Isaev VM, Kabanov IN, Komarov VV, Meschanov VP. Modern radio-electronic systems of terahertz frequency range. Proceedings of TUSUR University. 2014;(4(34)):5–21 (in Russian).
6. Grigoriev AD. Problems in the development of sources of powerful coherent terahertz radiation. In: Abstracts of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference «Electronics and Microelectronics Microwave». Vol. 1. Saint Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»; 2015. P. 139–143 (in Russian).
7. Vishnevskiy V, Frolov S, Shakhnovitch I. Radio relay millimeter wave communication systems: New velocity horizons. Electronics: Science, Technology, Business. 2011;(1):90–97 (in Russian).
8. Taylor ZD, Singh RS, Bennett DB, Tewari P, Kealey CP, Bajwa N, Culjat MO, Stojadinovic A, Lee H, Hubschman JP, Brown ER, Grundfest WS. THz medical imaging: in vivo hydration sensing. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011;1(1):201–219. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159551.
9. Pawar AY, Sonawane DD, Erande KB, Derle DV. Terahertz technology and its applications. Drug Invention Today. 2013;5(2):157–163. DOI: 10.1016/j.dit.2013.03.009.
10. Bronwell AB, Beam RE. Theory and Application of Microwaves. New York: McGraw-Hill; 1947. 486 p.

11. Birdsall CK, Bridges WB. *Electron Dynamics of Diode Regions*. New York: Academic Press; 1966. 270 p.
12. Barroso JJ, Kostov KG. A 5.7-GHz, 100-kW microwave source based on the monotron concept. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999;27(2):580–586. DOI: 10.1109/27.772289.
13. Tsarev VA, Muchkaev VY, Shalaev PD. Studying a multibeam microwave drift-tube K-band oscillator with an electrodynamic system of two slot-coupled resonators. *Tech. Phys. Lett.* 2014; 40(4):288–292. DOI: 10.1134/S1063785014040117.
14. Muchkaev VY, Fedyaev VK, Tsarev VA. Numerical investigation of the electrodynamic properties of a K-band multibeam monotron with a three-gap cavity. *J. Commun. Technol. Electron.* 2016;61(9):1034–1038. DOI: 10.1134/S1064226916090084.
15. Booske JH, Dobbs RJ, Joye CD, Kory CL, Neil GR, Park GS, Park J, Temkin RJ. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011;1(1):54–75. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2151610.
16. Muchkaev VY, Senchurov VA, Kurkin S, Badarin A. Electron flow modulation in double-gap cavity with a multiple ratio of the two modes frequencies. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2021;68(2):835–840. DOI: 10.1109/TED.2020.3046994.
17. Sullivan DM. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. New York: IEEE Press; 2000. 165 p.
18. Berenger JP. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.* 1994;114(2):185–200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159.
19. Kunz KS, Luebbers RJ. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. New York: CRC Press; 1993. 464 p.
20. Grigoriev AD, Yankevich VB. *Resonators and Resonator Microwave Deceleration Systems. Numerical Methods of Calculation and Design*. Moscow: Radio and Communication; 1984. 248 p. (in Russian).
21. Caryotakis G. *High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center*. No. SLAC-PUB 10620. Menlo Park, CA, USA: Stanford Linear Accelerator Center; 2005. 138 p.
22. Carliner MM. *Electrodynamics of Microwave: The Course of Lectures*. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2006. 258 p. (in Russian).
23. Roshal AS. *Modeling of Charged Beams*. Moscow: Atomizdat; 1979. 224 p. (in Russian).
24. Birdsall CK, Langdon AB. *Plasma Physics via Computer Simulation*. Boca Raton: CRC Press; 1991. 504 p. DOI: 10.1201/9781315275048.



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 двухзональных резонаторов для мощных широкополосных многолучевых СВЧ-приборов клистронного типа» по специальности «Вакуумная и плазменная электроника» (2011, СГТУ). С 2011 года работает на кафедре «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета в должности доцента. Научные интересы – мощные и сверхмощные источники излучения СВЧ и ТГц 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
 ORCID: 0000-0001-8298-9120
 AuthorID: 1054793

Онищенко Антон Павлович – родился в Балакове Саратовской области (1995). Окончил с отличием Саратовский государственный технический университет по направлению электроника и наноэлектроника (2019). С 2019 года является аспирантом кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета по направлению «Вакуумная и плазменная электроника».

Россия, 410054 Саратов, Политехническая, 77

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.

E-mail: onishchenkoap@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4915-5447



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

ORCID: 0000-0003-0668-2594

AuthorID: 181428