

Научная статья
УДК 621.385.642
DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202210-04>

Математическая модель перспективного генератора магнетронного типа в терагерцевом диапазоне частот

В.Б. Байбурин¹, П.Д. Черепанов², В.П. Мещанов³, В.В. Комаров⁴, М.И. Балакин⁵
^{1,2,4,5} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, Россия)
³ ООО «НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов, Россия)
¹ baiburinvb@rambler.ru, ^{2,3} nika373@bk.ru, ⁴ vyacheslav.komarov@gmail.com, ⁵ balakinmaxim@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. Одной из актуальных проблем современной радиоэлектроники является освоение субтерагерцевого и терагерцевого диапазонов частот. Большие возможности терагерцевого диапазона обусловлены его уникальными свойствами излучения: высокая проникающая и разрешающая способности, малое рассеяние, легкость фокусировки, чем обусловлен большой интерес к его применению в различных областях науки и техники. При этом во всех случаях применения возникает проблема создания эффективных и вместе с тем компактных генераторов и усилителей, работающих в скрещенных электрических и магнитных полях, отличающихся небольшим весом и устойчивостью к различным видам воздействия: механическим, климатическим, радиационным. С точки зрения указанных требований представляется перспективным использование генераторов магнетронного типа, однако серьезным препятствием на пути их применения является необходимость прецизионного изготовления сверхминиатюрных многорезонаторных анодных структур, а также их эффективное охлаждение.

Цель. Разработать математическую модель для проектирования и создания устойчиво работающего в диапазоне терагерцевых и субтерагерцевых частот магнетронного генератора с улучшенными рабочими параметрами и эксплуатационными характеристиками.

Результаты. Предложена максимально упрощенная конструктивная схема магнетронного генератора, основанная на подтвержденной гипотезе П.Л. Капицы о возможности генерации электромагнитной энергии в генераторе магнетронного типа, в котором многорезонаторная анодная структура заменена коаксиальным резонатором для обеспечения существенного снижения технологических ограничений. Исследована математическая модель генератора магнетронного типа, позволяющая рассчитывать траекторию движения зарядов, наведенный переменный потенциал, наведенные токи, мощность генерирования, а также все выходные параметры генератора на частоте 300 ГГц. Показана возможность дальнейшего повышения частоты генерации.

Практическая значимость. Полученные в результате математического моделирования динамические параметры магнетронного генератора открывают перспективу продвижения исследований в направлении повышения терагерцевых частот, например, до 400–500 ГГц благодаря существенно упрощенной компактной конструкции пространства взаимодействия. Подобные генераторы удовлетворяют требованиям компактности, малого веса и устойчивости к различным видам негативного воздействия (механическим, климатическим, радиационным) и могут найти применение в фундаментальной и практической медицине.

Ключевые слова

Генератор магнетронного типа, частота 300 ГГц, коаксиальное пространство взаимодействия, благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00357, <https://rscf.ru/project/22-19-00357>.

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук, профессору Андрею Дмитриевичу Григорьеву за обсуждение материалов статьи и полезные замечания.

Для цитирования

Байбурин В.Б., Черепанов П.Д., Мещанов В.П., Комаров В.В., Балакин М.И. Математическая модель перспективного генератора магнетронного типа в терагерцевом диапазоне частот // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 10. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202210-04>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Уникальные свойства терагерцевого излучения, в частности, высокая проникающая и разрешающая способности, малое рассеяние и легкость фокусировки, обеспечили интерес к изучению терагерцевого диапазона во многих областях науки и техники [1–6]. В медицине в настоящее время активно развивается изучение белков, ДНК и различных видов раковых клеток с использованием терагерцевого излучения. Оно может быть использовано в качестве инструмента при хирургических операциях по удалению опухолей рака кожи, прямой кишки, при воздействии на бактериальную микрофлору медицинских объектов и в других медицинских применениях [3]. Большие возможности терагерцевых волн также используются при решении задач авиакосмической техники.

© Байбурин В.Б., Черепанов П.Д., Мещанов В.П., Комаров В.В., Балакин М.И., 2022

При этом для всех этих применений актуальным является проблема реализации эффективных и вместе с тем компактных устройств, устойчивых к различным видам воздействия: механическим, климатическим, радиационным. С точки зрения указанных требований представляются перспективными генераторы магнетронного типа [7]. Однако серьезным препятствием на пути их применения является необходимость прецизионного изготовления сверхминиатюрных резонаторных анодных структур, а также трудности эффективного их охлаждения [1].

Ц е л ь р а б о т ы – разработать математическую модель для проектирования и создания устойчиво работающего в диапазоне терагерцевых и субтерагерцевых частот магнетронного генератора с улучшенными рабочими параметрами и эксплуатационными характеристиками.

В работе предложена конструктивная схема магнетронного генератора, исключая необходимость в многорезонаторной структуре анода, и позволяющая преодолеть ряд технических и технологических трудностей, а также разработанная математическая модель, позволяющая рассчитать траекторию зарядов, наведенный переменный потенциал и все выходные параметры генератора на частоте 300 ГГц (длина волны 1 мм).

Математическая модель и конструкция генератора

В основу предложенной конструктивной схемы и математической модели магнетронного генератора положена гипотеза П.Л. Капицы [8] о возможности отдачи энергии заряда радиальному переменному электрическому полю в пространстве взаимодействия коаксиального резонатора. Это позволяет отказаться от изготовления многорезонаторной анодной структуры, а также увеличить радиусы внутреннего цилиндра (катода) и внешнего цилиндра (анода), что способствует решению проблемы охлаждения.

Анализ проводился применительно к конструктивной схеме магнетронного генератора, представленной на рис. 1–3.

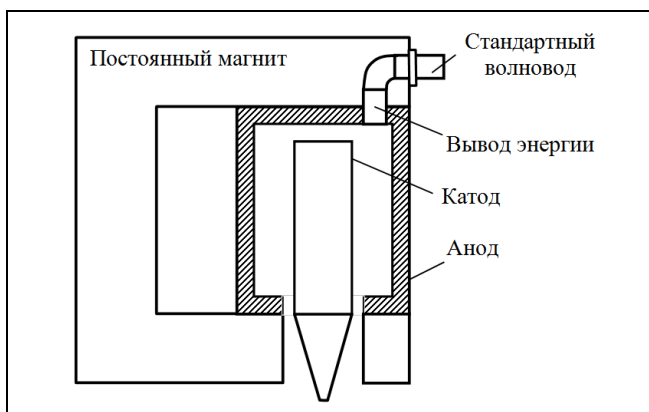


Рис. 1. Конструкция прибора
Fig. 1. Sketch image of the instrument

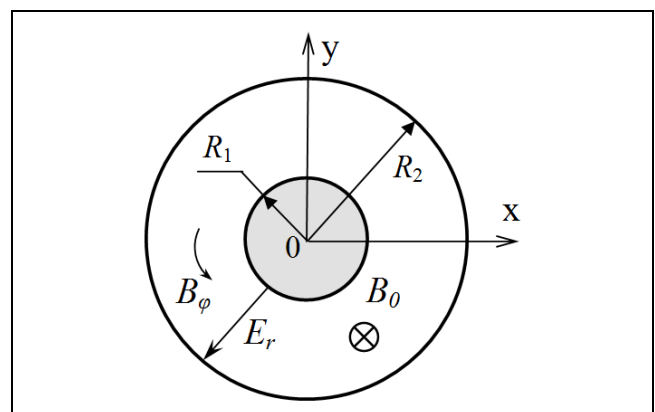


Рис. 2. Пространство взаимодействия прибора
Fig. 2. The interaction space of the instrument

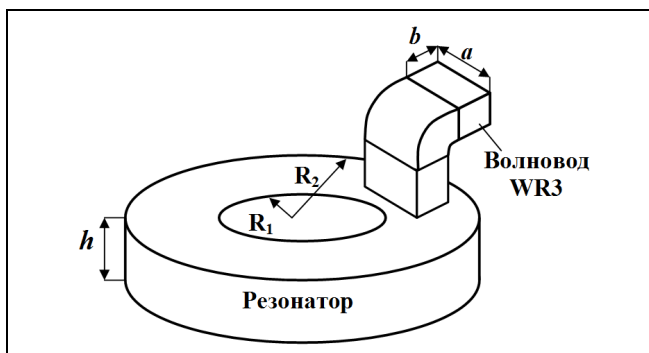


Рис. 3. Трехмерная конфигурация коаксиального резонатора с выводом энергии на стандартном волноводе
Fig. 3. 3D-configuration of coaxial resonator with power output on standard waveguide

При построении математической модели использовались приближение заданного поля и условие баланса мощностей [9], а также допущение о доминирующем влиянии основной ТЕМ-гармоники в коаксиальном резонаторе. Математическая модель включает уравнения движения зарядов, а также уравнения для расчета наведенного тока I_n и наведенного переменного потенциала U_n , постоянного тока анода I_0 , мощности генерирования $P_{ген}$ и мощностей потерь на основе электронной бомбардировки P_a^n и скин-эффекта $P_{с-э}^n$. Для уравнений движения зарядов в трехмерной декартовой системе координат можно записать следующие выражения:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \eta(E_x + \tilde{B}_z \dot{y} - \tilde{B}_y \dot{z}), \\ \ddot{y} = \eta(E_y + \tilde{B}_x \dot{z} - \tilde{B}_z \dot{x}), \\ \ddot{z} = \eta(E_z + \tilde{B}_y \dot{x} - \tilde{B}_x \dot{y}), \end{cases} \quad (1)$$

где η – удельный заряд электрона;

$$E_x = E_{0x} + \tilde{E}_x, \quad E_y = E_{0y} + \tilde{E}_y; \quad (2)$$

$$E_{0y} = \frac{yU_0}{r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}; \quad (3)$$

$$\tilde{E}_x = -\frac{x\tilde{U} \cos(\omega t + \theta)}{r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad \tilde{E}_y = -\frac{y\tilde{U} \cos(\omega t + \theta)}{r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}. \quad (4)$$

Здесь U_0 – постоянный потенциал анода; \tilde{U} – амплитуда переменного потенциала.

Переменные составляющие магнитной индукции \tilde{B}_x, \tilde{B}_y можно определить как

$$\tilde{B}_x = -\frac{\mu_0 y \tilde{U} \cos(\omega t + \theta)}{Z_0 r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad \tilde{B}_y = -\frac{\mu_0 x \tilde{U} \cos(\omega t + \theta)}{Z_0 r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; Z_0 – волновое сопротивление; $\omega = 2\pi f$; θ – начальная фаза; $B_z = B_0$ – постоянная магнитная индукция; $E_z = 0$.

Введем функцию $f(r)$:

$$f(r) = \frac{1}{r^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (6)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$.

Систему уравнений (1) можно привести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, введя обозначения

$$\dot{x} = v_x, \quad \dot{y} = v_y, \quad \dot{z} = v_z,$$

и решить методом однородного поля [10] с шагом, обеспечивающим не менее 200 координатных точек на каждой траектории с исходными координатами зарядов на катоде и нулевыми начальными скоростями.

На основе данных расчета траекторий наведенный ток I_H определяется по теореме Шокли–Рамо [11]:

$$I_H = \left[\frac{E_{0x} v_x + E_{0y} v_y}{U_0} + \frac{\tilde{E}_x v_x + \tilde{E}_y v_y}{\tilde{U}} \right] q + q \frac{v_z}{r_u}. \quad (7)$$

С учетом введенных выше соотношений выражение (7) можно записать в более компактном виде:

$$I_H = q \left[f(r)(v_x x + v_y y) [1 - \cos(\omega t + \theta)] + \frac{v_z}{r_u} \right]. \quad (8)$$

В уравнении (8) расчет заряда q был проведен с учетом значения плотности тока термоэмиссии (i) [12]:

$$q = i 2\pi R_1 h_a t_{\text{прол}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{прол}}$ – время пролета заряда от катода до анода, определяемое при расчете траекторий.

Наведенный переменный потенциал определяется из соотношения

$$U_H = I_H R_{\text{эКВ}}, \quad (10)$$

где $R_{\text{эКВ}}$ рассчитано на основе работ [1,13,14]:

$$R_{\text{экв}} = \frac{Z_0}{\pi^2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) Q_n, \quad (11)$$

где Q_n – нагруженная добротность.

Постоянный ток анода I_0 определяется формулой

$$I_0 = \frac{q}{t_{\text{прол}}}. \quad (12)$$

Мощность потерь на аноде за счет электронной бомбардировки равна

$$P_a^n = \frac{qv^2}{2\eta}, \quad (13)$$

где $v^2 = v_x^2 + v_y^2$, v_x и v_y – скорости заряда при попадании на анод.

Мощность потерь за счет скин-эффекта определяется из соотношения

$$P_{\text{с-э}}^n = I_n^2 \frac{2\pi R_2}{\gamma h_a \Delta}, \quad (14)$$

где γ – удельная проводимость материала анода; Δ – толщина скин-слоя материала анода:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu_0 \omega}}. \quad (15)$$

Мощность генерирования вычисляется как

$$P_{\text{ген}} = \frac{I_n^2 R_{\text{экв}}}{2}, \quad (16)$$

а подводимая мощность равна

$$P_{\text{подв}} = I_0 U_0. \quad (17)$$

Расчеты проводились в ходе ряда итераций с учетом требований баланса мощностей, т.е. близости расчетного значения наведенного переменного потенциала исходному заданному значению.

Как показали расчеты, на входе волноводного вывода энергии (см. рис. 1) выходная мощность $P_{\text{вых}}$ составляет около 20% от мощности генерирования за минусом мощности потерь. Средняя мощность $P_{\text{ср}}$ определялась как $P_{\text{вых}}$, деленная на скважность, а $P_{\text{вых}}$ можно записать в виде

$$P_{\text{вых}} = (P_{\text{ген}} - P_a^n - P_{\text{ср}}^n) \cdot 0,2. \quad (18)$$

Выражение для КПД магнетронного генератора запишем следующим образом:

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{вых}}}{I_0 U_0}. \quad (19)$$

Исходные данные для расчета динамических параметров магнетронного генератора: $R_1 = 0,001$ м; $R_2 = 0,0015$ м; $h_a = 0,005$ м; $U_0 = 16000$ В; $B_0 = 0,82$ Тл; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\gamma = 5,9 \cdot 10^7$ Ом/м; $Z_0 = 377$ Ом; $\eta = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг; $\dot{U} = 7000$ В; $i = 100$ А/см²; $\omega = 2\pi \cdot 300 \cdot 10^9$ Гц; $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; скважность = 1000, длительность импульса $75 \cdot 10^{-9}$ с.

На рис. 4 и 5 в увеличенном масштабе приведены типичные траектории зарядов в координатах (x , y) и (z , r). В таблице приведены итоговые данные расчета динамических параметров генератора магнетронного типа в импульсном режиме генерирования.

Таблица. Динамические параметры генератора магнетронного типа в импульсном режиме генерирования

I_0 , А	U_0 , В	\dot{U} , В	$P_{\text{подв}}$, Вт	$P_{\text{ген}}$, Вт	P_a^n , Вт	$P_{\text{с-э}}^n$, Вт	$P_{\text{вых}}$, Вт	$P_{\text{ср}}$, Вт	КПД, %
3,14	1600	7286	50240	17123	$7,3 \cdot 10^{-7}$	59	3240	3,24	0,07

Как видно из таблицы, предложенная математическая модель прогнозирует приемлемые на данном этапе выходные данные генератора магнетронного типа на частоте 300 ГГц. Указанные данные могут быть улучшены при оптимизации геометрических параметров, а также величин постоянного потенциала анода и магнитной индукции.

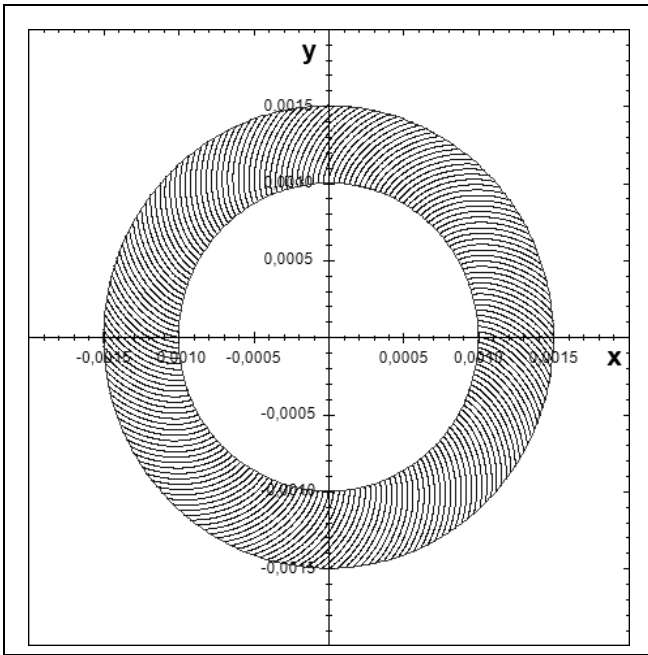


Рис. 4. Траектории зарядов в поперечном сечении пространства катод-анод

Fig. 4. Trajectory of charges in cross section space cathode-anode

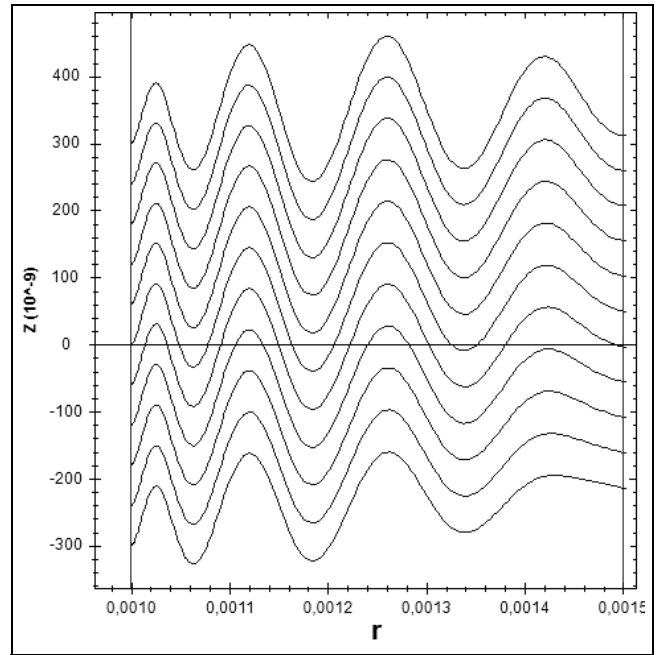


Рис. 5. Траектории в пространстве взаимодействия вдоль оси катода

Fig. 5. Trajectories in the interaction space along the cathode axis

Заключение

Полученные в результате математического моделирования динамические параметры магнетронного генератора открывают перспективу продвижения исследований в направлении повышения терагерцевых частот, например, до 400–500 ГГц. Кроме того, такого рода генераторы отличаются существенно упрощенной и более компактной конструкцией пространства взаимодействия, имеют небольшой вес и обладают значительной устойчивостью к различным видам нагрузок.

Предложенная в работе математическая модель генератора магнетронного типа позволяет рассчитать траекторию движения зарядов, наведенный переменный потенциал, наведенные токи, мощность генерирования, а также все выходные параметры генератора на частоте 300 ГГц. Подобные магнетронные генераторы могут найти актуальные области применения в различных сферах науки и техники, в частности, в бортовой авиационной технике, а также в фундаментальной и практической медицине.

Список источников

1. Григорьев А.Д. Терагерцовая электроника. М.: Физматлит. 2020.
2. Байбури В.Б., Розов А.С., Хороводова Н.Ю., Никифоров А.А. Новый подход к созданию перспективных компактных умножителей частоты субтерагерцового и терагерцового диапазонов для применения в условиях бортовой электронной техники // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 8. С. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.18.127/i00338486-2021108-12>.
3. Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона: монография / Под ред. А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. 2016.
4. Байбури В.Б., Мещанов В.П., Розов А.С. Оценка КПД при параметрической генерации в скрещенных полях // Радиотехника. 2015. № 7. С. 45–47.
5. Байбури В.Б., Мещанов В.П., Розов А.С. Влияние полей пространственного заряда на параметрическую генерацию в скрещенных полях // Радиотехника. 2017. № 7. С. 95–97.
6. Байбури В.Б., Розов А.С., Хороводова Н.Ю., Чернышев С.Л. Совместное влияние различных факторов на параметрическую генерацию в скрещенных полях // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7(10). С. 52–56. DOI: 10.18127/j00338486-201907(10)-09.
7. Захаров А.А., Булдаков Е.И., Еремин В.П. Исследование и разработка мощных импульсных двухмиллиметровых магнетронов повышенной надежности // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 80–86.
8. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. М.: Изд-во академических наук СССР. 1962.
9. Вайнштейн Л.Я., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио. 1973.
10. Кураев А.А., Байбури В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ приборов. Минск: Наука и техника. 1990.

11. Shockley W. Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge // Journal of Applied Physics. 1938. № 9 (10). P. 635–636. DOI: 10.1063/1.1710367.
12. Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н. Современные эффективные катоды (К истории их создания на ФГУП «НПП «Исток») // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника: науч.-технич. сборник. М. 2011. С. 5–24.
13. Гвоздовер С.Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М.: Техничко-теоретическая литература. 1956.
14. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь. 1971.

Информация об авторах

Вил Бариевич Байбури – вед. науч. сотрудник; д.ф.-м.н., профессор
SPIN-код: 1983-6164

Павел Дмитриевич Черепанов – ассистент
SPIN-код: не представлен

Валерий Петрович Мещанов – д.т.н., профессор, засл. деятель науки РФ, директор
Author ID: 3116

Вячеслав Вячеславович Комаров – д.т.н., доцент, зам. директора; профессор
SPIN-код: 6238-6611

Максим Игоревич Балакин – к.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой
SPIN-код: 2027-4242

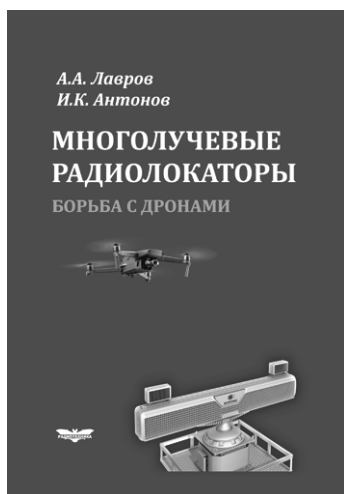
Поступила в редакцию 02.08.2022

Одобрена после рецензирования 12.08.2022

Принята к публикации 30.09.2022

Уважаемые читатели!

В Издательстве «Радиотехника» вышла книга



Лавров А.А., Антонов И.К.

Многолучевые радиолокаторы. Борьба с дронами

Монография

Научное издание

DOI 10.18127/B9785931082097

ISBN 978-5-93108-209-7

Рассмотрены основы построения, режимы работы, потенциальные характеристики и алгоритмы обработки сигналов многолучевых радиолокаторов, предназначенных для обнаружения малоскоростных малоразмерных целей. Описаны режимы метеобеспечения и обзора морской поверхности. Представлена структура программ расчета характеристик и имитационного моделирования. Используются результаты исследований многолучевого экспериментального радиолокатора.

Для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в области создания и эксплуатации систем радиолокации.

По вопросам заказа и приобретения книг обращаться по адресу:

107031, Москва, Кузнецкий мост, 20/6.

Тел.: (495) 625-78-72, 621-48-37;

<http://www.radiotec.ru>; e-mail: info@radiotec.ru

Original article

Mathematical model of promising magnetron-type generator in the terahertz frequency range

V.B. Bayburin¹, P.D. Cherepanov², V.P. Meshchanov³, V.V. Komarov⁴, M.I. Balakin⁵

^{1,2,4,5} Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky (Saratov, Russia)

³ JSC «NPP «Nika-SVCh» (Saratov, Russia)

¹ baiburinvb@rambler.ru, ^{2,3} nika373@bk.ru, ⁴ vyacheslav.komarov@gmail.com, ⁵ balakinmaxim@gmail.com

Abstract

As the analysis of modern monographs and review materials in recent years shows, the development of oscillators and amplifiers in the terahertz range is one of the most important problems of modern radio engineering. In the centimeter wavelength range, magnetron-type generators and amplifiers have proven themselves well due to their compactness, resistance to climatic, mechanical, and radiation loads. However, in the transition to the terahertz range (wavelengths of 1 mm and less), almost insurmountable difficulties occur due to the need for super precision manufacturing of multi-cavity anode structures, as well as their cooling. In order to overcome these problems, the authors propose to use the hypothesis of P.L. Kapitsa about the possibility of generating electromagnetic energy in the absence of a multi-cavity anode structure, namely, in the interaction space formed by a coaxial resonator. The paper presents a mathematical model of the magnetron current generator, which makes it possible to calculate the charge trajectory, induced currents, generation power at a frequency of 300 GHz. It is concluded that it is possible to further increase the generation frequency.

Keywords

Generator of magnetron current, frequency 300 GHz, coaxial interaction space, gratitude

For citation

Bayburin V.B., Cherepanov P.D., Meshchanov V.P., Komarov V.V., Balakin M.I. Mathematical model of promising magnetron-type generator in the terahertz frequency range. Achievements of modern radioelectronics. 2022. V. 76. № 10. P. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202210-04> [in Russian]

REFERENCES

1. Grigor'ev A.D. Teragertsovaya elektronika. M.: Fizmatlit. 2020. [in Russian]
2. Bayburin V.B., Rozov A.S., Khorovodova N.Yu., Nikiforov A.A. Novyy podkhod k sozdaniyu perspektivnykh kompaktnykh umnozhitelnykh chastoty subteragertsevogo i teragertsevogo diapazonov dlya primeneniya v usloviyakh bortovoy elektronnoy tekhniki. Radiotekhnika. 2021. T. 85. № 8. S. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.18.127/i0038486-2021108-12>. [in Russian]
3. Generatsiya i usilenie signalov teragertsovogo diapazona: monografiya. Pod red. A.E. Khramova, A.G. Balanova, V.D. Eremki, V.E. Zapevalova, A.A. Koronovskogo. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 2016. [in Russian]
4. Bayburin V.B., Meshchanov V.P., Rozov A.S. Otsenka KPD pri parametricheskoy generatsii v skreshchennykh polyakh. Radiotekhnika. 2015. № 7. S. 45–47. [in Russian]
5. Bayburin V.B., Meshchanov V.P., Rozov A.S. Vliyanie poley prostranstvennogo zaryada na parametricheskuyu generatsiyu v skreshchennykh polyakh. Radiotekhnika. 2017. № 7. S. 95–97. [in Russian]
6. Bayburin V.B., Rozov A.S., Khorovodova N.Yu. Chernyshev S.L. Sovmestnoe vliyanie razlichnykh faktorov na parametricheskuyu generatsiyu v skreshchennykh polyakh. Radiotekhnika. 2019. T. 83. № 7(10). S. 52–56. DOI: [10.18127/j00338486-201907-10-09](https://doi.org/10.18127/j00338486-201907-10-09). [in Russian]
7. Zakharov A.A., Buldakov E.I., Eremin V.P. Issledovanie i razrabotka moshchnykh impul'snykh dvukhmilimetrovykh magnetronov povyshennoy nadezhnosti. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. № 4 (60). V. 2. S. 80–86. [in Russian]
8. Kapitsa P.L. Elektronika bol'shikh moshchnostey. M.: Izd-vo akademicheskikh nauk SSSR. 1962. [in Russian]
9. Vaynshteyn L.Ya., Solntsev V.A. Lektsii po sverkhvysokochastotnoy elektronike. M.: Sov. radio. 1973. [in Russian]
10. Kuraev A.A., Bayburin V.B., Il'in E.M. Matematicheskie modeli i metody optimal'nogo proektirovaniya SVCh priborov. Minsk: Nauka i tekhnika. 1990. [in Russian]
11. Shockley W. Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge. Journal of Applied Physics. 1938. № 9 (10). P. 635–636. DOI: [10.1063/1.1710367](https://doi.org/10.1063/1.1710367).
12. Dyubua B.Ch., Korolev A.N. Sovremennyye effektivnyye katody (K istorii ikh sozdaniya na FGUP «NPP «Istok»). Elektronnyaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika: nauch.-tekhnich. sbornik. M. 2011. S. 5–24. [in Russian]
13. Gvozdover S.D. Teoriya elektronnykh priborov sverkhvysokochastotnoy elektronike. M.: Tekhniko-teoreticheskaya literatura. 1956. [in Russian]
14. Vol'man V.I., Pimenov Yu.V. Tekhnicheskaya elektrodinamika. M.: Svyaz'. 1971. [in Russian]

Information about the authors

Vil B. Baiburin – Leading Research Scientist; Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor

Pavel D. Cherepanov – Research Assistant

Valeriy P. Meschanov – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Honored Scientist of RF, Director

Vyacheslav V. Komarov – Dr.Sc. (Eng.), Associate Professor, Deputy Directors; Professor

Maksim I. Balakin – Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of Department

The article was submitted 02.08.2022

Approved after reviewing 12.08.2022

Accepted for publication 30.09.2022