

*Мирошниченко А.Ю., Царев В.А., Акафьева Н.А.
Саратовский государственный технический
университет им. Ю.А. Гагарина*

Миниатюрный гибридный многолучевой микроволновый генератор электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона

В статье описана новая конструкция микроволнового генератора с гибридным механизмом работы - монотрона и отражательного клистрона, с многоззорным пространственно- развитым резонатором, для работы в коротковолновой части микроволнового диапазона. Проведено численное моделирование резонансной системы прибора. Результаты работы могут быть использованы для создания высокоэффективных, малогабаритных и простых по конструкции СВЧ-генераторов на основе многоканальных многоззорных резонансных систем, работающих в одно- и многочастотном режимах в системах радиолокации, дистанционного зондирования, навигации, технологии изготовления материалов, медицине.

Ключевые слова: монотрон, отражательный клистрон, миллиметровый диапазон, резонатор, подвешенная керамическая подложка, автоэмиссионный катод, электромагнитное поле, взаимодействие

В последнее время, благодаря работам многих отечественных ученых (Д.И. Трубецкова, В.П. Панова, В.А. Солнцева, В.А. Царева, В.К. Федяева, А.В. Галдецкого и др.), а также зарубежных ученых (J.J. Varroso, K.G. Kostov и др.), значительно возрос интерес к таким микроволновым приборам, как монотрон, ввиду простоты его конструкции, перспективности применения в коротковолновом СВЧ диапазоне, однако обычные монотронные генераторы имеют низкий КПД. Основными направлениями улучшения выходных параметров монотронных генераторов являются применение многолучевых электронных пушек, использование многоззорных резонаторов, а также оптимизация режимов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем.

Анализ показал, что один из оптимальных вариантов конструкции может быть реализован в гибридном приборе, в котором первая часть прибора - монотрон, вторая - отражательный клистрон [1]. Однако такие устройства, несмотря на гибридный механизм работы на очень коротких длинах волн также работают неэффективно. Выходная мощность у них мала, к тому же наличие накального катода приводит к тому, что мощность накала становится сравнимой с выходной мощностью прибора. Малый ток луча в приборах с автоэмиссионными катодами можно компенсировать за счет вторичной эмиссии с поверхности отражателя [2], что позволяет усилить общий ток электронного луча и увеличить мощность прибора.

В коротковолновой части СВЧ диапазона и особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне использование классических резонансных систем (одноззорных и двухззорных) весьма затруднено, так как существуют технологические ограничения, которые препятствуют использованию электронных потоков с малым сопротивлением по постоянному току [3]. При этом для получения высокого КПД выходной резонатор клистрона должен иметь высокое эквивалентное сопротивление

$R_e = \rho Q_n$, где ρ – характеристическое сопротивление резонатора, Q_n – его нагруженная добротность. Решением данной проблемы является использование резонаторов с повышенным характеристическим сопротивлением, например многоззорных. Для возможности использования подобных резонансных систем в коротковолновой части СВЧ диапазона, эффективное характеристическое сопротивление резонатора $R_{эфф}$ должно быть близко к единице, т.е. выполняться условие [4]:

$$\frac{\rho M^2 Q_n}{R_0} = 1, \quad (1)$$

где M - коэффициент взаимодействия; R_0 - сопротивление электронного потока.

При этом для получения высокого КПД распределение поля в трех зазорах должно быть нарастающим по ходу движения электронного потока [5].

Изучению процессов взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля для различных мод в трехззорном распределенном резонаторе посвящено ряд работ [6-8]. Однако работа таких резонансных систем в составе многолучевого моноотрона мало изучена, а их проектирование и расчеты затруднены из-за трехмерного характера протекающих процессов и большого количества влияющих факторов.

Целью настоящей работы является изучение возможности создания многолучевого микроволнового генератора с многоззорными резонаторами с гибридным механизмом работы - моноотрона и отражательного клистрона, предназначенного для работы в миллиметровом диапазоне длин волн. Для реализации поставленной цели исследована возможность создания микроволнового генератора на базе предложенного патента [9].

Конструкция микроволнового генератора представлена на рисунке 1. Позициями на рисунке обозначены: 1-катодное основание, 2-система матричных автоэмиссионных катодов, 3- первый емкостной электрод, 4- блокировочная емкость, 5- одноззорный резонатор, 6-второй емкостной электрод, 7-отверстия связи, 8- двухззорный резонатор, 9- первый ленточный проводник, 10- подвешенная керамическая подложка, 11- третий ленточный проводник, 12- центральный емкостной электрод, 13 –третий емкостной электрод, 14- изолятор, 15 –отражательный электрод, 16-автоэмиссионное покрытие отражателя, 17- устройство связи с внешней нагрузкой, 18- источник питания отражателя, 19- источник ускоряющего напряжения, 20- второй ленточный проводник, 21- источник вытягивающего напряжения.

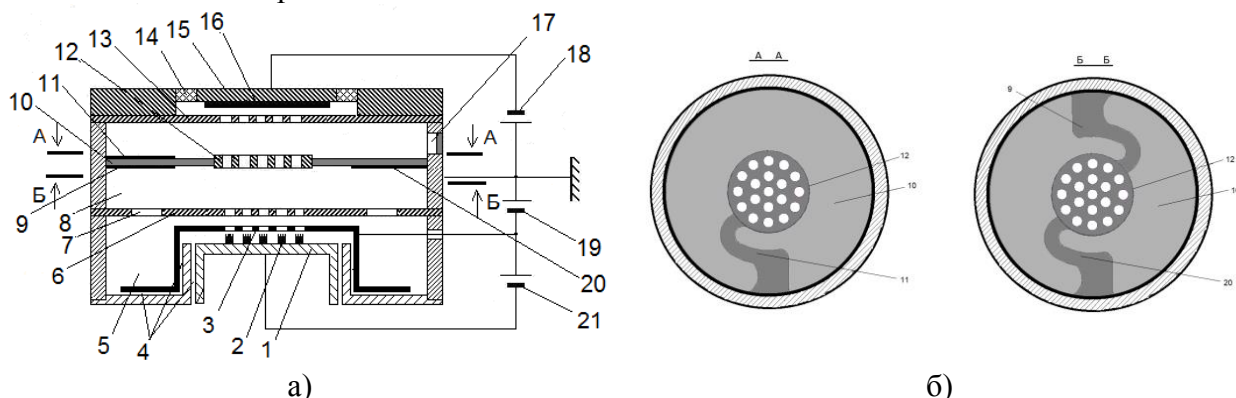


Рис. 1. а- микроволновый генератор с трехззорной резонансной системой; б - конструкция ленточных проводников на подвешенной керамической подложке.

В приборе начальное возбуждение одноззорного резонатора 5 электронным потоком осуществляется за счет хаотических автоколебаний электронов, возбуждающих одноззорный резонатор 5 на 2π -виде колебаний. Электромагнитная связь между одноззорным резонатором 5 и двухззорным резонатором 8 осуществляется через отверстия связи 7. Модулированный электронный поток, пройдя далее через отверстия

для пролета электронного потока второго емкостного электрода 6, ускоряется под действием ускоряющего напряжения источника питания 19, далее при прохождении электронного потока через двухзазорный резонатор 8 происходит его взаимодействие с полями двух высокочастотных зазоров. Для увеличения КПД СВЧ генератора к механизму монотронного группирования в приборе добавляется отражательный механизм, при этом на отражатель 15 нанесено вторично-эмиссионное покрытие 16. Расположенные на керамической подложке полуволновый и четвертьволновый резонансные контуры в виде ленточных проводников 9,11,20 (см. рисунок 1,б) обеспечивают неоднородное электрическое поле в двухзазорном резонаторе, которое улучшает эффективность взаимодействия электронного потока с СВЧ-полем резонаторов по сравнению с классическим монотроном на основе однозазорного резонатора. Резонатор прибора имеет следующие основные размеры: высота - 7,3 мм; радиус резонатора - 3,67 мм; радиус втулки - 0,35 мм; длина зазоров - 0,15; 0,38; 0,2 мм.

С помощью программы численного моделирования резонаторов «REZON» [10] проведено исследование резонансной системы на масштабной модели в сантиметровом диапазоне. Определены электродинамические параметры резонатора (рабочая частота F , собственная добротность Q), а также распределение напряженности продольной составляющей ВЧ электрического поля для противофазного и синфазного видов колебаний. Проведены расчеты распределения продольной нормированной компоненты электрического поля E_z/E_m для противофазного и синфазного колебания по длине пространства взаимодействия z (см. рисунок 2).

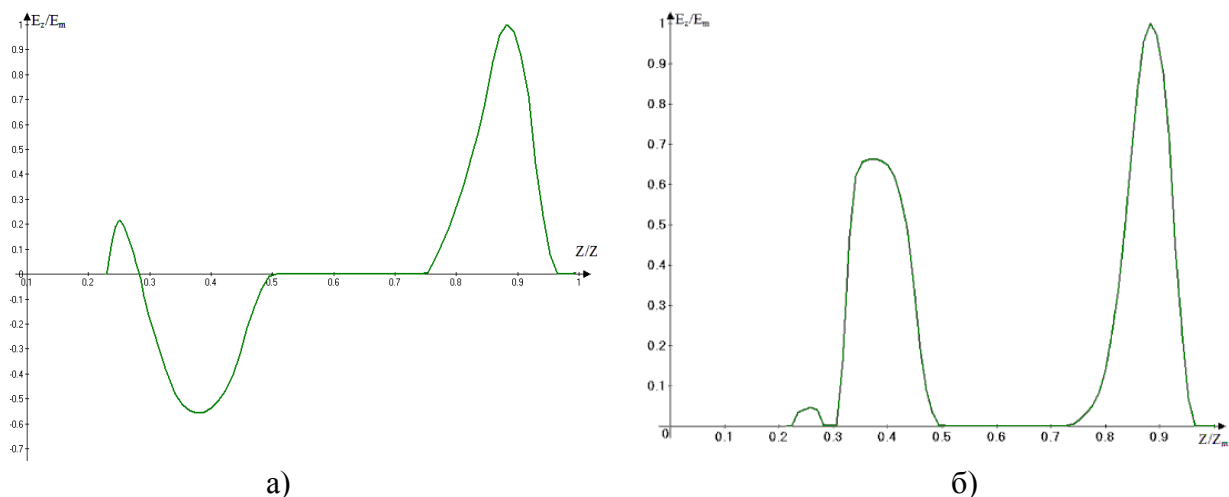


Рис. 2. Распределение высокочастотного поля вдоль пролетного канала резонансной системы: а - для противофазного вида колебаний; б - синфазного вида колебаний.

Проведены расчеты на противофазном типе колебаний (π), на частоте 7,486 ГГц и синфазном типе колебаний, возбуждаемом на частоте 17,824 ГГц. Расчет электронных параметров монотрона был проведен с помощью дисковой модели клистрона (нелинейный режим) и по малосигнальной теории (линейный режим).

На рисунке 3 представлены зависимости относительной активной компоненты электронной проводимости, G_e/G_0 и электронного КПД, η_e от величины ускоряющего напряжения U_0 .

Результаты расчетов показывают, что максимальный электронный КПД трехзазорного монотрона на противофазном виде колебаний может достигать 40% при ускоряющем напряжении 0,4 кВ в области генерации, соответствующей максимуму отрицательной электронной проводимости. Таким образом, чем больше отрицательное

значение электронной добротности по модулю $1/Q_{эл}$, тем лучше условия самовозбуждения генератора:

$$\frac{1}{Q_{эл}} = \frac{G_e}{G_0} \cdot \frac{\rho}{p_{\mu 1} U_0^{1/2} \cdot 10^{-6}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\mu 1}$ – микропервеанс одного луча; ρ – характеристическое сопротивление.

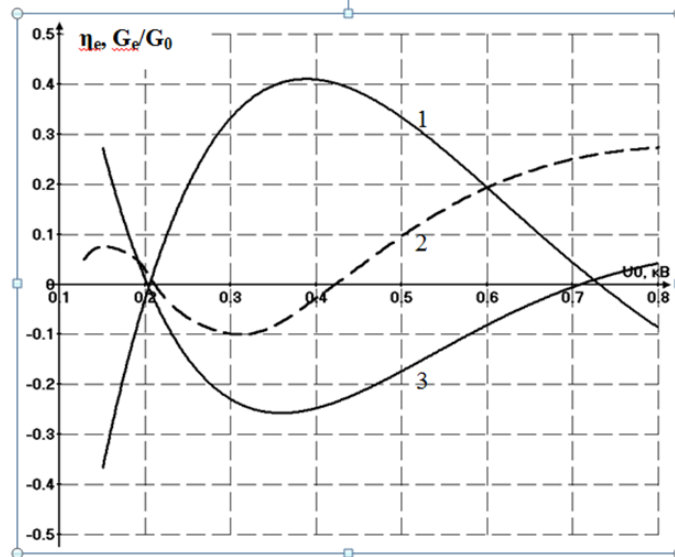


Рис. 3. Зависимости относительной активной компоненты электронной проводимости (G_e/G_0) и электронного КПД (η_e) от ускоряющего напряжения U_0 : 1 – электронный КПД; 2 – G_e/G_0 – линейный режим; 3 – G_e/G_0 – нелинейный режим.

На рисунке 4 представлена зависимость электронной добротности от ускоряющего напряжения для исследуемой резонансной системы. Значение $1/Q_{эл}$ определяет стабильность взаимодействия в резонаторе.

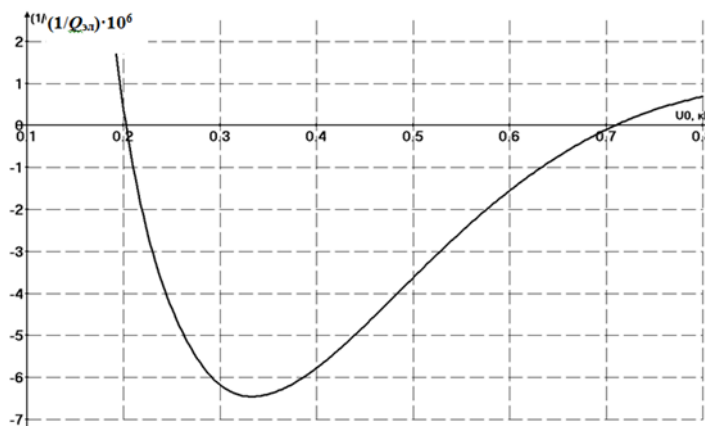


Рис. 4. Зависимость электронной добротности от ускоряющего напряжения

Результаты расчета показывают, что оптимальный режим работы монотронного генератора, при котором электронный КПД достигает своих максимальных значений лежит в диапазоне 0,35- 0,45 кВ.

Выходную мощность прибора можно рассчитать по известной формуле

$$P_{вых} = \eta_{\varepsilon} \eta_{\kappa} p_{\mu 1} N (10^{-6}) U_0^{5/2}, \quad (3)$$

где η_{κ} – контурный КПД, $\eta_{\kappa}=0,95$.

Для одной секции многолучевого монотрона с трехззорным резонатором, возбуждаемым на π -виде колебаний на частоте 7486 МГц, выходная мощность составляет около 7 Вт. Для эффективной работы подобных генераторов и получения большей выходной мощности интересен вариант кластерного включения приборов, при котором единичные генераторы 1 связаны через щели связи 2 с общим волноводом 3 и работают на общую нагрузку (см. рисунок 5).

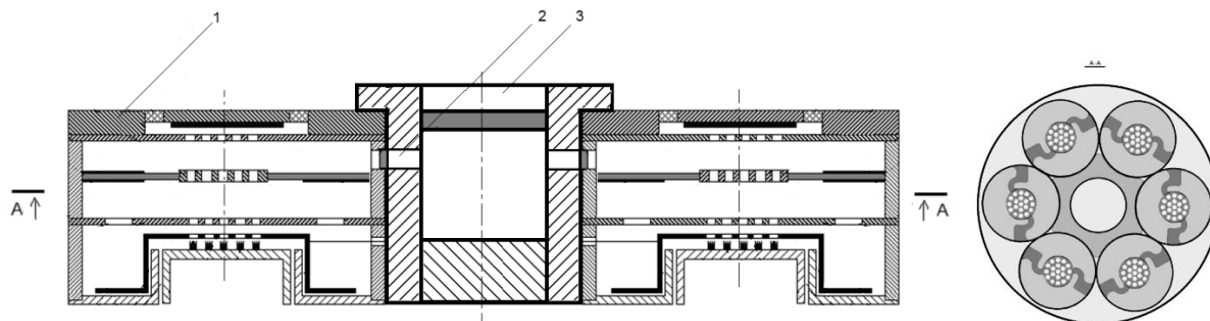


Рис. 5. Кластерное включение генераторов.

Таким образом, предложена новая конструкция микроволнового генератора с гибридным механизмом работы - монотрона и отражательного клистрона. Использование в приборе последовательно соединенных одноззорного и двухззорного резонаторов позволяет получить распределенную трехззорную систему с нарастающим высокочастотным электрическим полем, с малой амплитудой в одноззорном резонаторе и большой в двухззорном, а использование ленточных полосковых проводников, образующих полуволновую и четвертьволновую резонансную систему позволяет получить более неоднородное распределение высокочастотного электрического поля на противофазном виде колебаний и синфазном виде колебаний, и в свою очередь, более высокий КПД, при уменьшенных массогабаритных характеристиках.

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках гранта РФФИ № 16-07-00048.

Библиографический список

1. Patent US 3339149 A. Reflector augmented monotron oscillator for microwave generator / C.E. Ward, D.R. Zangrando. Prior. 01.12.1965. Publ. 29.08.1967.
2. Patent WO 2007/142419 A1. Klystron oscillator using cold cathode electron gun, and oscillation method / Jeon Seok Gy [et al.]. Prior. 02.06.2006. Publ. 13.12.2007.
3. Григорьев А.Д. Многоззорные резонаторы для мощных усилительных клистронов миллиметрового диапазона длин волн / А.Д. Григорьев // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. 2014. С. 131-135.
4. Хайков А.З. Клистронные усилители / А.З. Хайков. М.: Связь, 1974. 392 с.
5. Патент № 2474914. РФ, МПК7 H01J25/74. Мощный СВЧ-генератор монотронного типа / В.А. Царев, Н.А. Акафьева, А.Ю. Мирошниченко. Заявл. 11.08.2011; опубл. 10.02.2013.
6. Mode stability analysis in the beam-wave interaction process for a three-gap Hughes-type coupled cavity chain / Luo Ji-Run, Cui Jian, Zhu Min, and Guo Wei // Chinese Physics B. 2013. Vol. 22. № 6. P. 067803. URL: <http://cpb.iphy.ac.cn/fileup/PDF/2013-6-067803.pdf>.
7. The Beam-wave Interaction for Defferent Modes in Three-gap Coupled Cavity Output Circuit / Jian Cui, Jirun Luo, Wenkai Liu et al. // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Guangzhou, China, 2014. P. 279-281.
8. Chodorow M. A high-efficiency klystron with distributed interaction /M. Chodorow, T. Wessel-Berg // IRE Transactions on electron devices. 1961. Vol. 8. № 1. P. 44-55.
9. Патент № 2607462. РФ, МПК7 H01J25/20. Монотронный микроволновый генератор с матричным автоэмиссионным катодом / В.А. Царев, А.Ю. Мирошниченко, Н.А. Акафьева. Заявка 2015127176. Заявл. 06.07.2015; опубл. 10.01.2017.
10. Мучкаев В.Ю., Царев В.А. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011611748 от 24.02.2011 г.