

УДК 621.385.624

МНОГОЛУЧЕВОЙ АВТОГЕНЕРАТОР W-ДИАПАЗОНА С РЕЗОНАТОРОМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯВ. А. Царев¹, О. А. Горлин², Д. А. Нестеров¹¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.²Рязанский государственный радиотехнический университет

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2015 г., после доработки – 16 декабря 2015 г.

Аннотация. Исследована возможность создания в W-диапазоне длин волн трехлучевого моноotronного автогенератора с четырехззорным резонатором, возбуждаемым на π -виде колебаний. Проведенное 3-D моделирование резонаторной системы и двумерный нелинейный анализ процессов взаимодействия показали возможность получения в таком приборе на частоте 91,3 ГГц выходной мощности около 2 кВт при КПД 38 %.

Ключевые слова: W-диапазон, многолучевой моноотрон, резонатор с распределенным взаимодействием, КПД, моделирование.

Abstract. We investigated the possibility of creating in the W-band three-beam oscillator with fore-gap resonator excited at the π -mode oscillations. 3-D simulation of cavity system and a two dimensional nonlinear analysis of interaction processes showed the possibility of obtaining such a device at a frequency of 91.3 Ghz output power about 2 kW at an efficiency of 38 %.

Key words: W-band, multi-beam monotron, the resonator with distributed interaction, efficiency, simulation.

Введение

В настоящее время все более активно начинается использование излучения W-диапазона (0,075-0,11 ТГц), субмиллиметрового (3-0,03 мм) или терагерцового диапазона (0,1-10 ТГц) в разных сферах и областях, например: в радиолокации, медицине, технологии изготовления материалов, ускорительной техники, народном хозяйстве и т.д. [1]. Источниками такого излучения могут

быть лампы бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ), полупроводниковые диоды, квантово-каскадные лазеры, но они обладают малой выходной мощностью, которая в настоящее время не превышает единиц мВт. Наиболее перспективными источниками более мощного излучения субмиллиметрового диапазона являются однолучевые усилительные и генераторные клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ) и клистроны с ленточными пучками. Значительные практические успехи в разработке КРВ для диапазона частот от 95 ГГц до 280 ГГц были достигнуты в США и Канаде [2,3]. Теоретические исследования КРВ коротковолновой части миллиметрового диапазона, проводятся также и во многих других странах, в том числе, в России и в Китае [4,5]. Особый интерес представляют исследования возможности создания клистронов W-диапазона с ленточным лучом, проведенные в Германии. В исследуемых моделях приборов предполагалось использование многозазорных резонаторов с ленточным пучком сечением 10×0.4 мм². Длины зазоров резонатора варьировались в зависимости от величины ускоряющего напряжения (0,4 мм – для 25 кВ, 0,55 мм – для 50 кВ и 0,6 мм – для 100 кВ). Результаты этих исследований показывают, что предельный электронный КПД в таких приборах меняется в диапазоне от 11 до 63%, в зависимости от величины ускоряющего напряжения и числа зазоров многозазорных резонаторов, возбуждаемых на π -виде колебаний. Однако недостатками приборов с ленточным лучом является трудность формирования ленточных потоков (они сворачиваются в "стримеры"), а также сложность изготовления.

Серьезную конкуренцию таким приборам могли бы составить многолучевые клистроны (МЛК), создание которых является признанным отечественным достижением. Однако следует отметить, что в настоящее время сведений о разработке в России многолучевых клистронов W-диапазона с резонаторами распределенного взаимодействия пока нет.

В данной работе проведены исследования процессов взаимодействия электронов с СВЧ полями в трехлучевом автогенераторе монотронного типа с четырехзазорным резонатором, возбуждаемым на π -виде колебаний с целью

исследования возможности создания прибора W-диапазона длин волн, который составил бы конкуренцию КРВ с ленточным пучком.

2. Выбор исходных параметров прибора

Рассмотрим вариант многолучевого автогенератора с четырехзворным резонатором, работающим на π -виде колебаний на частоте 91.24 ГГц ($\lambda=3.29$ мм). Из теории клистрона [6] известно, что для достижения на этой частоте приемлемой эффективности взаимодействия электронов с СВЧ полем необходимо выбрать радиус пролетного канала a из следующего условия:

$$\gamma a = (\beta_e^2 - k^2)^{1/2} \leq 1.3, \quad (1)$$

где $\beta_e = \omega / V_0$ – электронная постоянная распространения, $\gamma = (\beta_e^2 - k^2)^{1/2}$ – радиальное волновое число; $k = \omega / c$ – волновое число, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; $V_0 = 5.93 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$, м/сек – скорость электронов.

Выражение (1) можно привести к следующему виду:

$$U_0 \geq \frac{10^7}{39.5 + (\gamma a)^2 \cdot (\lambda / a)^2}. \quad (2)$$

Из уравнения (2), принимая из конструктивных соображений радиус пролетного канала равным $a = 0.2$ мм, получаем $U_0 \geq 20$ кВ.

Перейдем теперь к выбору типа катода. Для работы в мм диапазоне длин волн необходимо выбирать катоды с плотностью тока порядка 100 А/см². В работе [7] приводятся сведения о термоэмиссионных свойствах, так называемых, скандатных катодов, которые, обеспечивают получение на серийных образцах плотности тока до 100 А/см² (рис.1а). Примем, для определенности, плотность тока скандатного катода равной $J_k = 80$ А/см². Полагая коэффициент заполнения пучком пролетного канала $b/a = 0.8$, определим радиус пучка $b = 0.16$ мм и плотность тока в пучке для случая отсутствия компрессии $J_b = J_k = 80$ А/см². Таким образом, можно найти величину тока одного луча $I_{01} = J_b \cdot (\pi b^2) = 0.0648$ А и его микроперванс $p_{\mu 1} = I_{01} \cdot 10^6 / U_0^{3/2} = 0.0164$ мкА / В^{3/2}.

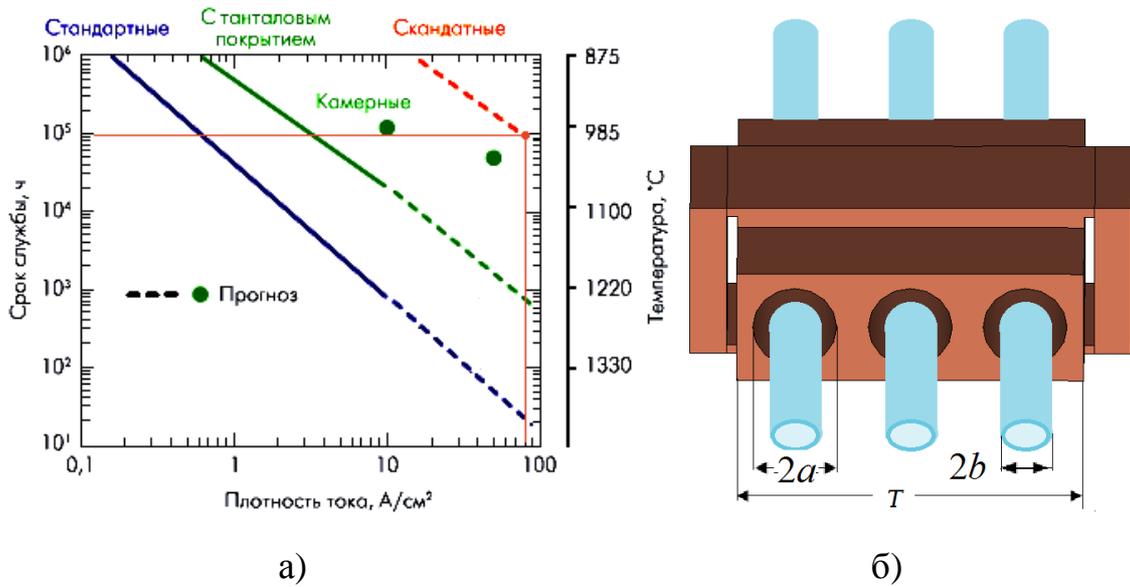


Рис.1. Зависимость срока службы различных типов катодов от плотности тока (а[7]) и внешний вид пролетной трубы (б)

Для определения размеров общей пролетной трубы T выберем однорядное расположение пролетных каналов в трубе, так как при многорядном расположении резко падает величина характеристического сопротивления резонатора. Максимальные размеры прямоугольной многоканальной пролетной трубы, определяемые числом лучей N , также ограничены. При увеличении числа каналов возрастает неравномерность распределения напряженности электрического поля E в пространстве взаимодействия, что приводит к падению характеристического сопротивления

$$\rho = \frac{R_3}{Q} = \frac{(\int |E| ds)^2}{2\omega W_s}, \text{ где } R_3 \text{ – параллельно включённое сопротивление}$$

эквивалентного резонансного контура; Q – добротность; W_s – запасенная энергия. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению выходной мощности $P_{\text{ВЫХ}}$ и электронного КПД $\eta_e = P_{\text{ВЫХ}} / (I_0 U_0)$. Поэтому в МЛК поперечный размер трубы обычно выбирают так, чтобы он не превышал половины длины волны $\lambda = 2\pi \cdot c / \omega$, где c – скорость света [8]. С учетом этого условия $T \leq \lambda / 2$, так что при плотной однорядной «упаковке» пролетных каналов в общей трубе можно разместить ограниченное число каналов $N=3$ (рис.1б). Тогда суммарные величины микроперванса и тока будут равны:

$$P_{\mu\Sigma} = P_{\mu 1} \cdot N = 0.0164 \cdot 3 = 0.0492 \text{ мкА} / B^{3/2}; I_{0\Sigma} = I_{01} \cdot N = 0.0648 \cdot 3 = 0.1944 \text{ А.}$$

3. Конструкция и электродинамические параметры резонатора

Конструкция резонатора исследуемого прибора представлена на рис.2. Корпус резонатора и пролетные трубы, в которых выполнены три пролетных канала, имеют прямоугольную форму.

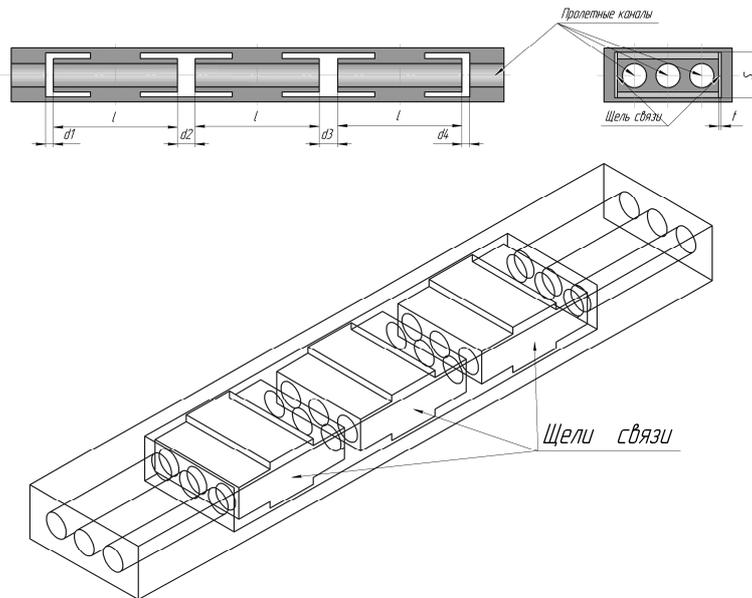


Рис. 2. Конструкция резонатора

Четыре парциальных резонатора имеют сильную электромагнитную связь за счет щелей связи, расположенных на боковых краях пролетных труб, что превращает эти резонаторы в единую колебательную систему. В результате 3-D моделирования по программе REZON [9], в основе которой лежит решение уравнений Максвелла во временной области, было определено, что в этой системе могут быть возбуждены различные резонансные моды с синфазным и противофазным распределением полей в зазорах. Однако на заданной частоте $f=91.264$ ГГц наивысшее резонансное сопротивление имеет π -вид колебаний.

Известно [10], что для реализации в монотроне с распределенным взаимодействием режима работы с наиболее высоким КПД необходимо чтобы максимальная величина напряженности электрического поля E_{zi} в зазорах увеличивалась в направлении оси z . Проведенные расчеты позволили определить для π -вида колебаний оптимальные длины зазоров ($d_1=0.135$ мм,

$d_2=0.2925$ мм, $d_3=0.308$ мм, $d_4=0.138$ мм) и пролетных труб ($l_1= l_2= l_3=2$ мм), при которых реализуется требуемое распределение электрического поля E_{zi} в пространстве взаимодействия (рис.3). При выбранных геометрических размерах резонатор имел следующие электродинамические параметры: характеристическое сопротивление $\rho \cong 70$ Ом, собственная добротность $Q=3646$.

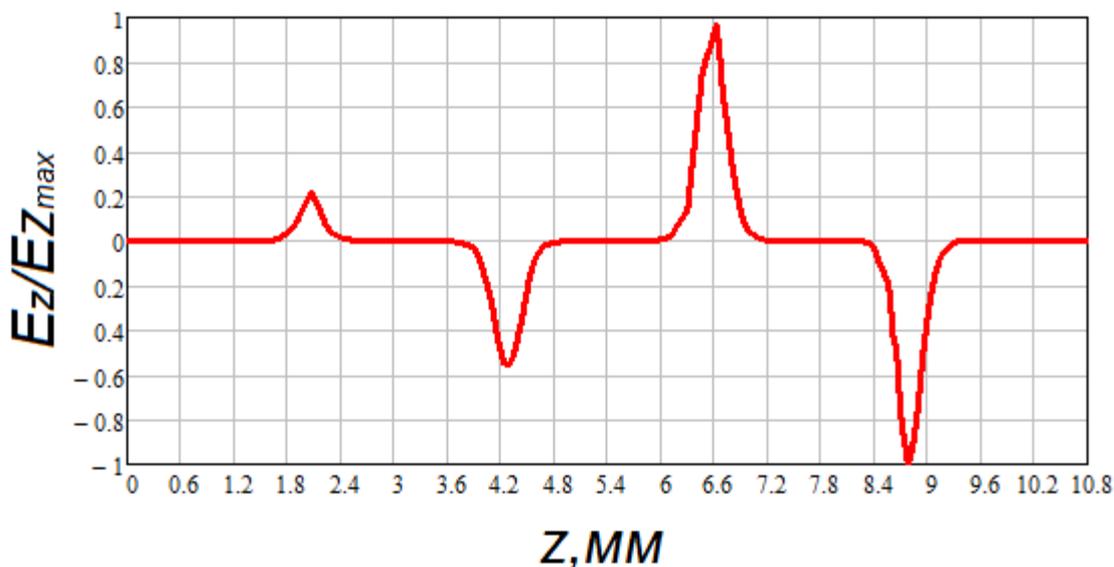


Рис.3. Распределение нормированной напряженности электрического поля вдоль пространства взаимодействия

4. Результаты расчетов параметров автогенератора

Для первоначального определения геометрических размеров резонатора монотронного генератора с распределенным взаимодействием проводился расчет электронных параметров (относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 и коэффициента эффективности взаимодействия M) в приближении малого сигнала. При этом полагалось, что зазоры имеют одинаковый угловой размер ($\pi/2$), а расстояние между центрами зазоров L выбиралось из фазового условия самовозбуждения для π -вида колебаний:

$$L = \frac{\pi}{2} + 2\pi n = 2\pi(0.25 + n), \quad (3)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ – номер зоны генерации.

При расчетах использовались следующие уравнения [11]:

$$M = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z e^{j\beta_e z} dz \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_z| dz}, \quad (4)$$

$$\frac{G_e}{G_0} = \frac{1}{8} \frac{\beta_e (M_-^2 - M_+^2)}{\beta_q}, \quad (5)$$

где β_q – постоянная распространения редуцированной плазменной волны.

Медленная волна пространственного заряда M_- и быстрая волна пространственного заряда M_+ , определялись как:

$$M_{\pm} = \sqrt{\frac{I_0(\gamma b) - I_1(\gamma b)}{I_0(\gamma a)} \frac{\int E_z(z) e^{-(\beta e \pm \beta q)z} dz}{\int |E_z(z)| dz}}. \quad (6)$$

На рис.4,а и 4,б показаны зависимости коэффициента взаимодействия M и относительной активной проводимости G_e/G_0 от ускоряющего напряжения.

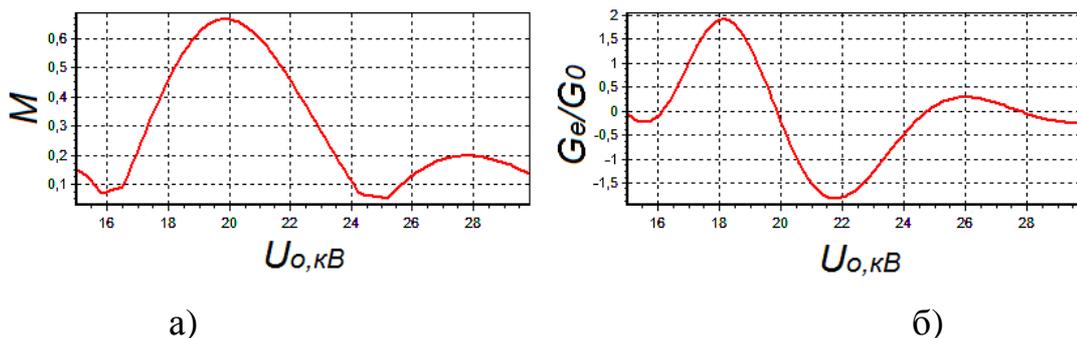


Рис.4. Зависимость коэффициента взаимодействия (а) и активной проводимости (б) от ускоряющего напряжения

Как видно из рисунка, в рассматриваемом диапазоне от 15 до 30 кВ наибольшую вероятность самовозбуждения моноотрона следует ожидать при ускоряющем напряжении порядка 22 кВ, так как при этом достигается максимальное значение отрицательной электронной проводимости ($G_e/G_0 = -1.6$). Учитывая, что сгусток электронов в моноотроне в процессе взаимодействия с полем резонатора сильно тормозится, можно ожидать, что оптимальное напряжение будет находиться в диапазоне 24-26 кВ. Это подтвердили дальнейшие расчеты по программе EXPRAN, разработанной в РГРТУ. Программа основана на нелинейной численно-аналитической модели процесса взаимодействия в многозачорных резонаторах. По этой программе были

проведены расчеты, направленные на получение максимального электронного КПД на π -виде колебаний. Оптимизация проводилась методом покоординатного спуска. В качестве функции цели была выбрана максимальная величина η_e , которая составила 47 % без учета пространственного заряда.

По программе [12] уточнен полученный результат с учетом пространственного заряда. Результаты расчета, приведенные на рис.5, показывают, что при отсутствии неоднородности взаимодействия в разных каналах возможно получение при напряжении 25 кВ электронного КПД около 45%. Учет изменения величины характеристического сопротивления в разных каналах позволил уточнить окончательную величину $\eta_{e\max} = 42\%$. При этом общий КПД в нагрузку оказался равным 38 %.

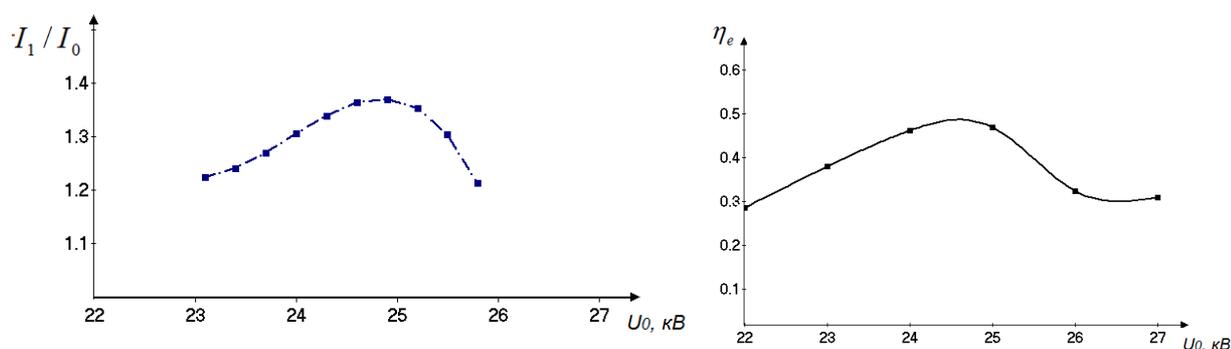


Рис.5 Зависимости нормированной величины первой гармоники конвекционного тока и электронного КПД от ускоряющего напряжения при нормированных величинах ВЧ напряжения на зазорах ($\xi_1=0.16$, $\xi_2=-0.23$, $\xi_3=0.43$ и $\xi_4=-0.47$) и микропервансе одного луча $p_{\mu 1} = 0.0164$ мкА/В^{3/2}

5. Заключение

Исследована возможность создания в W-диапазоне трехлучевого монотронного автогенератора с четырехзазорным резонатором, возбуждаемым на π -виде колебаний. Проведенное 3-D моделирование резонаторной системы и двумерный нелинейный анализ процессов взаимодействия показали возможность получения в таком приборе на частоте 91,3 ГГц выходной мощности около 2 кВт при КПД 38%.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-32-51046). Результаты 3-D моделирования были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 8.1065.2014/К.

Литература

1. Григорьев, А.Д. Мощные источники когерентного излучения терагерцового диапазона / А.Д. Григорьев // Матер. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014». 25 – 26 сентября 2014г. СГТУ. Саратов: Издательский Центр «Наука». – 2014. – С.11-18.
2. Steer, B. Extended interaction klystron technology at millimeter and submillimeterwavelengths [Электронный ресурс] / B. Steer, A. Roitman, P. Horoyski et al. Режим доступа: <http://www.cpii.com/product.cfm/7/40>.
3. Steer, B. Millimeter-wave extended interaction klystrons for high power ground, airborne and space radars / B. Steer, A. Roitman, P. Horoyski et al. // Proc. European Microwave Conference. Paris. – 2011. – P. 984 – 987.
4. Тореев, А.И. Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона / А.И. Тореев, В.К. Фёдоров // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С.109–114.
5. C. Zhang, C. Ruan, S. Wang, X. Yang, D. Zhao The Circuit Design and Particle-in-cell Simulation for W-band High-power Extended interaction klystron // IEEE Transactions on Electron Devices Journal Impact Factor & Information. 2013. P.62 – 63.
6. Кацман, Ю.А. Вопросы теории многорезонаторных клистронов / Ю.А. Кацман. – М.: Связьиздат. – 1958. – 176 с.
7. Levush B. High Aspect Ratio Electron Beam, High Efficiency Interaction Structure, and High Power Amplifier Design.– http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa07-49/pdf/Beam_Structure_Amplifier.pdf.

8. Пугнин, В.И. Проблемы создания мощных широкополосных многолучевых клистронов / В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков // Радиотехника. – 2004. – №2. – С.17 – 21.
9. Мучкаев, В.Ю. REZON. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / В.Ю. Мучкаев, В.А. Царев. – заявка №2011611748 от 24.02.2011.
10. Акафьева, Н.А. Численное моделирование режимов работы мощного многолучевого монотрона с четырехзазорным резонатором / Н.А. Акафьева, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев // Матер. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008». 24-26 сентября 2008. СГТУ. Издательский Центр «Наука». – 2008. С. 176 – 181.
11. Wessel-Berg, T., “A General Theory of Klystrons with Arbitrary, Extended Interaction Fields,” *Technical Report*, Stanford Microwave Laboratory Report No. 376, March, 1957.
12. Федяев, В.К. Программа анализа двумерных динамических процессов в клистронах / В.К. Федяев, В.И. Юркин // Вакуумная и плазменная электроника: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА. – 1986. – С. 101 – 105.