

Исследование трехзачорного многоканального клистронного резонатора, настроенного на две кратные резонансные частоты

Представлены результаты численного расчета комплекса электродинамических и электронных параметров и характеристик 3-D модели трехзачорного резонатора 7-лучевого клистрона при настройке частот основного (противофазного) и высшего (синфазного) видов колебаний на две кратные частоты ($f_0 = 18.57$ ГГц, $f_2 = 37.14$ ГГц). Настройка осуществлялась путем изменения объема резонатора, размеров щелей связи, и ширины зазоров.

Ключевые слова: трехзачорный резонатор, противофазный и синфазный виды колебаний, многолучевой клистрон, численное моделирование.

Одной из актуальных проблем современной вакуумной микроволновой электроники является создание высокоэффективных приборов клистронного типа (монотронов, пролетных и отражательных клистронов), работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн [1,2]. Увеличение КПД таких приборов может быть достигнуто за счет использования в их конструкции резонаторов, у которых частота одного из высших видов колебаний кратна частоте основного вида колебаний. Подобные колебательные системы могут применяться и в клистронных умножителях частоты [3] с выходным резонатором, настроенным на одну из гармоник сигнала.

Большинство известных конструкций двухчастотных колебательных систем, применяемых в многолучевых клистропах (МЛК) были предложены для длинноволновой части и средневолновой частях СВЧ диапазона [4].

При работе в составе МЛК в миллиметровом диапазоне длин волн на высшем виде колебаний такие резонаторы имеют низкое эффективное характеристическое сопротивление $\rho_{эф} = \rho M^2$, где ρ - характеристическое сопротивление и M - коэффициент взаимодействия, усредненные по радиусу электронного потока и разным пролетным каналам (метод расчета указанных величин детально рассмотрен в [5]).

Устранить этот недостаток можно за счет применения многозачорных резонаторов, возбуждаемых одновременно на основной (π -вид) и высшей (2π -вид) резонансных модах с кратными частотами. В настоящее время были исследованы только двухзачорные двухчастотные резонаторы [6,7].

В связи с этим большой интерес представляют работы, направленные на создание трехзачорных двухчастотных резонаторов (ТДР), имеющих повышенное эффективное характеристическое сопротивление при взаимодействии с электронным потоком на двух кратных частотах, соответствующих синфазному и противофазному видам колебаний с кратностью частот $K_f = f_2/f_1 = 2$.

На рис.1 представлена схема исследуемого резонатора. Он образован электромагнитно связанными через две П-образные щели связи 1 и 2 призматическими резонансными полостями 3, 4 и 5. Семь пролетных каналов 6 упакованы в общей пролетной

трубе 7, радиус которой r_1 . Радиус каждого канала $r_2=0.2\text{мм}$. Значения параметров $h_1=h_2=h_3=1\text{мм}$ и r_2 в ходе численных расчетов не менялись.

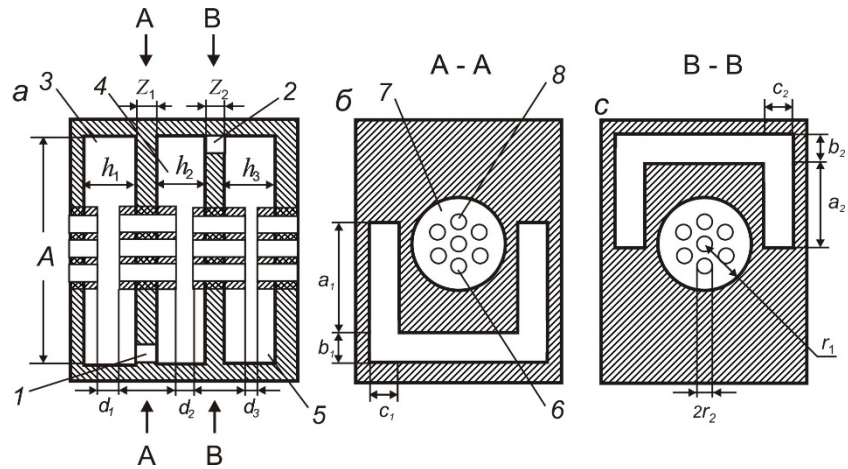


Рис.1. Схематическое изображение исследуемого трехзорного резонатора: *а* - продольное сечение резонатора, *б* и *в* – поперечные сечения резонатора.

Численные расчеты исследуемого резонатора были проведены с помощью трехмерной программы REZON [8], в основе которой лежит решение уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области с прямоугольной пространственной сеткой разбиения. На рис.2 показаны картины распределения продольного электрического поля E_z основного и второго высшего видов колебаний в центральном пролетном канале вдоль длины резонатора. Как следует из графиков, напряжение на смежных зазорах на основном виде колебаний противофазно, на второй высшем виде – синфазно.

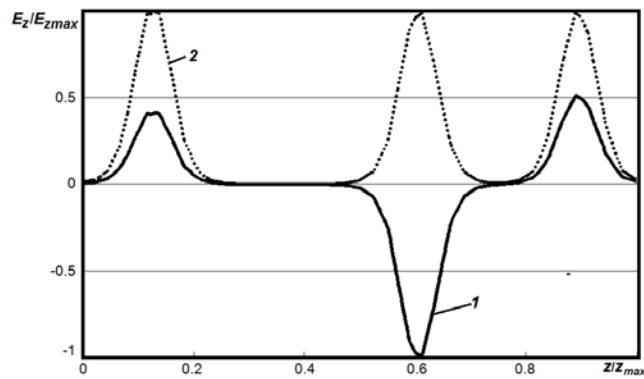


Рис.2. Распределение продольной компоненты электрического поля E_z в центральном пролетном канале вдоль длины резонатора основного (кривая 1) и второго (кривая 2) высшего видов колебаний.

Настройка частот противофазного и синфазного видов колебаний на две кратные частоты $f_0 = 18.57\text{ГГц}$ и $f_2 = 37.14\text{ГГц}$ осуществлялась путем изменения параметров a_1 и a_2 щелей связи (везде в расчетах $a_1 = a_2$), и ширины зазоров d_1, d_2, d_3 . Возможность такой настройки обусловлена тем, что увеличение значений a_1 и a_2 приводит к снижению частоты противофазного вида, при этом частота синфазного вида колебаний практически не меняется (рис.3). Остальные геометрические параметры имели следующие значения: $r_1 = 0.8\text{мм}$, $b_1 = b_2 = 0.42\text{мм}$, $c_1 = c_2 = 0.35\text{мм}$, $Z_1 = Z_2 = 0.33\text{мм}$.

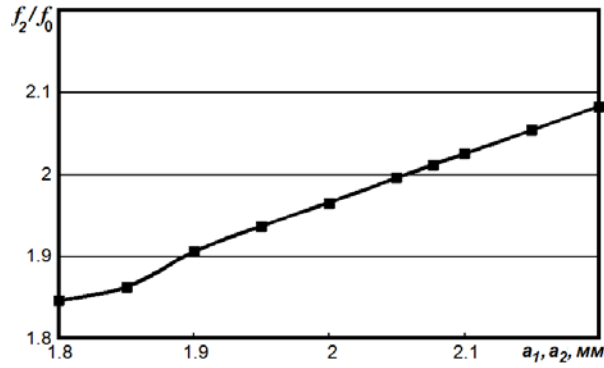


Рис.3. Зависимости соотношения частот f_2/f_0 от параметров a_1 и a_2 щелей связи при $d_1 = d_2 = d_3 = 0.295$ мм.

Для расчета ρ исследуемого резонатора использовалась следующая формула [9]:

$$\rho = \frac{R_{\text{э}}}{Q_0} = \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} |E_z(z)| dz)^2}{\omega W} \quad (1)$$

где $E_z(z)$ - функция распределения напряженности электрического поля в пространстве взаимодействия, усредненная по радиусу электронного потока, $\omega=2\pi f_0$ - круговая частота; W - энергия электромагнитного поля, запасенная в объеме исследуемого резонатора.

Расчет малосигнальных значений коэффициента взаимодействия и относительной электронной проводимости на двух кратных частотах от величины ускоряющего напряжения U_0 проводился по формулам, предложенных Вессельбергом [10]:

$$M = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z(z) e^{j\gamma_e z} dz \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_z(z)| dz} \quad (2)$$

$\gamma_e = \omega/U_0$ - постоянная распространения невозмущенного потока.

Интегралы, стоящие в выражениях (1,2) вычислялись численным интегрированием найденных ранее в узлах пространственной сетки значений электрического и магнитного полей. Шаг интегрирования определялся величиной шага пространственной сетки.

Проведенные вычисления подтвердили возможность получения высоких значений характеристического сопротивления одновременно на двух рабочих частотах: на противофазном виде колебаний ($f_0=18.57$ ГГц) оно составило 130Ом, а на синфазном виде ($f_2=37.14$ ГГц) -177Ом.

Результаты расчета M и G_e/G_0 представлены на рис.4. Из этого рисунка видно, что оптимальный угол пролета для высшего синфазного вида колебаний вдвое больше, чем для основного противофазного вида. Поэтому при выборе величины ускоряющего напряжения в пределах от 4 до 4.5кВ электронная проводимость G_e/G_0 положительна, как для одного, так и для другого вида колебаний, а коэффициенты взаимодействия M достигают максимальных значений. Этот режим можно рекомендовать для усилительных МЛК. Исследованный резонатор имеет отрицательную область электронной проводимости при выборе величин ускоряющего напряжения в пределах от 5 до 6кВ. Этот режим можно рекомендовать для автогенераторных приборов клистронного типа (монотронов и удвоителей частоты).

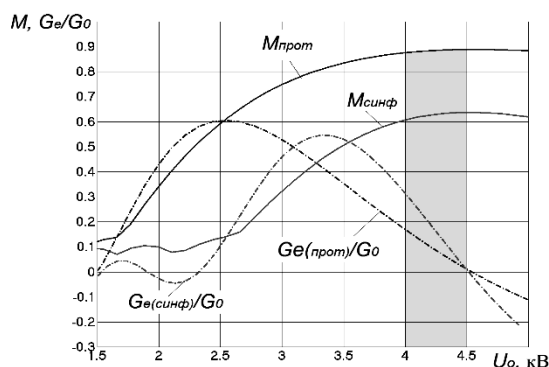


Рис.4. Зависимости относительной электронной проводимости G_e/G_0 и модуля коэффициента эффективности взаимодействия M от ускоряющего напряжения U_0 .

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №8.1065.2014/К и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №15-32-51055 и №16-32-00134.

Библиографический список

1. Velocity modulation microwave tube employing a harmonic prebuncher for improved efficiency: pat. №3811065 United States, Int. CL H 01J 25/10.
2. Канавец В.И., Лебединский С.В. и др. Мощные многорезонаторные клистроны с высоким КПД // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, 1976. - №11. С. 33-45.
3. Junjie Fan; Yong Wang "A 14 kW High-Power X-Band to Ka-Band Klystron Frequency Multiplier", Electron Devices, IEEE Transactions on, On page(s): 1854 - 1858 Volume: 61, Issue: 6, June 2014
4. Царев В.А., Сенчуров В.А. Исследование различных способов настройки многоканальных однозачорных резонаторов на кратные резонансные частоты / Журнал радиоэлектроники. (Электронная версия). – 2011. –№. 9.
5. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ Численные методы расчета и проектирования. – М.: Радио и связь, 1984.
6. СВЧ - прибор клистронного типа (варианты): пат. №2390870, МПК H01J25/02; заявл. 19.07.11; опубл. 27.01.13, Бюл. №3.
7. Двухзачорный выходной клистронный резонатор: пат. на ПМ №2558782 от 24.06.2015.
8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. №2011611748 / Мучкаев В.Ю., Царев В.А. 2011.
9. Caryotakis G. High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center, 2005.
10. Wessel-Berg, T. A General Theory of Klystrons with Arbitrary, Extended Interaction Fields // Technical Report, Stanford Microwave Laboratory Rep. №376, March 1957.