

Многозачорные резонаторы для мощных усилительных клицтронов миллиметрового диапазона длин волн

Представлены результаты разработки и компьютерного моделирования нескольких типов многозачорных выходных резонаторов для мощных усилительных клицтронов миллиметрового диапазона длин волн. Рассмотрены также устройства связи таких резонаторов с выходным волноводом. Показано, что возможно получить нагруженную добротность резонаторов менее 50 без существенного уменьшения волнового сопротивления резонатора. Предложен также диэлектрический элемент связи, служащий одновременно пассивным резонатором.

Ключевые слова: усилительный клицтрон, миллиметровый диапазон длин волн, многозачорные резонаторы

Активное освоение миллиметрового диапазона длин волн требует разработки мощных эффективных усилителей и генераторов этого диапазона, в частности, мощных усилительных клицтронов. В последнее время такие разработки интенсивно ведутся в США, Канаде, Китае и в ряде других стран [1]. При разработке мощных усилительных клицтронов миллиметрового диапазона длин волн необходимо учитывать технологические ограничения, которые препятствуют использованию электронных потоков с малым сопротивлением по постоянному току. Отсюда следует, что для получения высокого КПД выходной резонатор клицтрона должен иметь высокое эквивалентное сопротивление $R_e = \rho Q_n$, где ρ – волновое сопротивление резонатора, Q_n – его нагруженная добротность. Это требование практически невозможно выполнить, используя обычные тороидальные резонаторы при требуемой относительной ширине полосы усиливаемых частот более 1.5...2 %. Выходом из этого затруднения может служить использование выходных резонаторов с повышенным волновым сопротивлением, в частности, многозачорных [2]. Возможно также использование связанных колебательных систем, состоящих из активного и одного или нескольких пассивных резонаторов. В данной работе рассматривается несколько конструкций многозачорных резонаторов для клицтронов миллиметрового диапазона, проводится сравнение их параметров и способов связи с нагрузкой. Для определенности рассматривается однолучевой клицтрон 8-мм диапазона длин волн с ускоряющим напряжением $U_0 = 15$ кВ и током луча $I_0 = 1.5$ А. Диаметр пролетного канала a принят равным 0,65 мм, а длина зазора $d = 0,4$ мм, что соответствует значениям $\gamma a = 0.89$, $\beta_e d = 1.17$. Статический коэффициент взаимодействия зазора $M = 0,944$. В этих выражениях $\beta_e = \omega l / v_e$ – электронная постоянная распространения, $\gamma = \sqrt{\beta_e^2 - k^2}$ – радиальное волновое число, $k = \omega / c$ – волновое число, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Из конструктивных соображений необходимо, чтобы длина выходного резонатора не превышала 4.3 мм. В связи с этим был выбран резонатор, работающий на противофазном виде колебаний и имеющий три зазора. Расстояние между центрами зазоров l в этом случае должно выбираться исходя из условия $\beta_e l = \pi$, откуда $l = 1,07$ мм. Учитывая, что в процессе взаимодействия с полем выходного резонатора сгусток тормозится, было принято значение $l = 0,95$ мм.

Оценим, каким должно быть минимальное значение волнового сопротивления резонатора, чтобы обеспечить максимальный КПД отбора энергии. Исходя из условия, что эффективное напряжение на резонаторе должно быть равно ускоряющему напряжению, найдем

$$\rho M^2 = \frac{R_0}{\kappa Q_n},$$

где $\kappa = I_{k1} / I_0$ – отношение амплитуды первой гармоники конвекционного тока к постоянной составляющей тока луча, $Q_n = f_0 / \Delta f$ – нагруженная добротность резонатора. Задаваясь величиной $\kappa = 1$ и шириной полосы усиливаемых частот $\Delta f = 600$ МГц, нагруженную добротность $Q_n = 57$ и $\rho_{\min} = 200$ Ом. Такое значение волнового сопротивления невозможно получить с помощью обычного тороидального резонатора. Поэтому рассматривалась возможность использования многозазорных резонаторов (резонаторов с распределенным взаимодействием).

Рассматривались две конструкции резонатора – на основе замедляющей системы (ЗС) типа «встречные штыри» и типа «гребенка». Модель резонатора на встречных штырях, созданная в программе RFS [3], показана на рис. 1. По результатам моделирования собственная частота резонатора без элементов связи составляет 35,775 ГГц, волновое сопротивление – 210 Ом. Собственная частота резонатора подобрана так, чтобы при наличии элемента связи амплитудно-частотная характеристика выходной системы имела центральную частоту 34 ГГц.

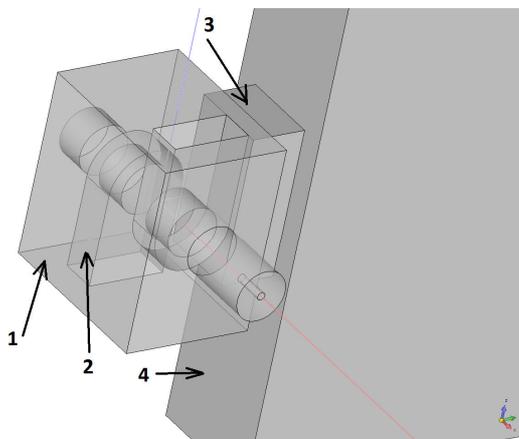


Рисунок 1. Резонатор на встречных штырях. 1 - резонатор, 2 - элемент связи, 3 - волновод, 4 - штыри, 5 - возбуждающий штырь

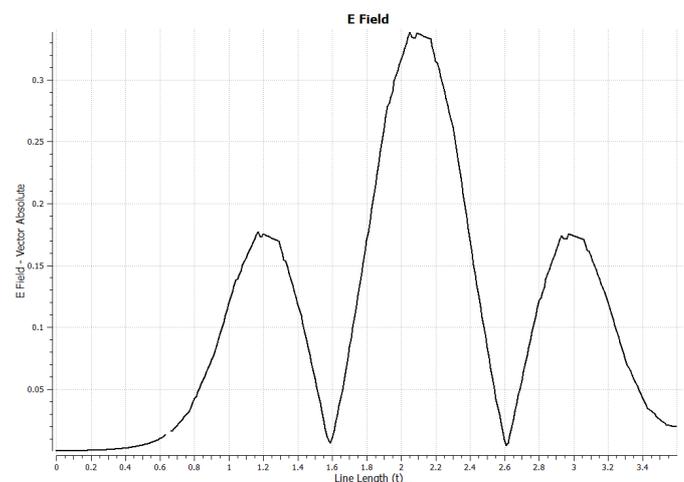


Рисунок 2

Как видно, амплитуда поля в среднем зазоре резонатора почти в 2 раза превышает амплитуду поля в крайних зазорах, что отрицательно сказывается на значении волнового сопротивления. Кроме того, возникли трудности с обеспечением достаточно сильной связи резонатора с волноводом.

Модель резонатора, выполненного на основе гребенчатой ЗС, показана на рис. 3, а распределение поля по оси пролетного канала – на рис. 4.

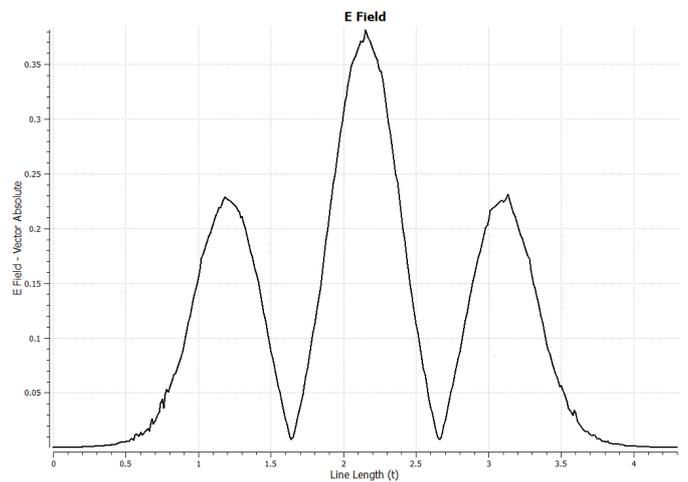
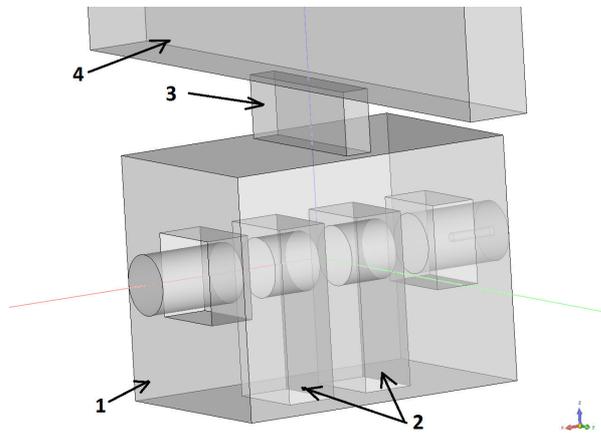


Рисунок 3. Резонатор на гребенчатой ЗС с торцевой связью. 1 – резонатор, 2 – гребенка, 3 – элемент связи, 4 – выходной волновод.

Рисунок 4

Этот резонатор на собственной частоте 33,95 ГГц имеет волновое сопротивление $\rho = 246$ Ом, т. е. существенно больше, чем резонатор на встречно-штыревой ЗС. Отметим, что у него отсутствуют фаски на торцах стержней, что несколько снижает волновое сопротивление, зато упрощает технологию изготовления резонатора. Поле в среднем зазоре этого резонатора также существенно больше, чем в крайних зазорах. Для получения нужной степени связи резонатора с волноводом также необходимо принимать специальные меры.

С целью выровнять распределение поля в зазорах резонатора и облегчить решение задачи вывода энергии была предложена конструкция резонатора с неравной длиной пазов в центральном и крайнем зазорах (рис. 5). Как видно на рис. 6, распределение поля в зазорах этого резонатора значительно более равномерное.

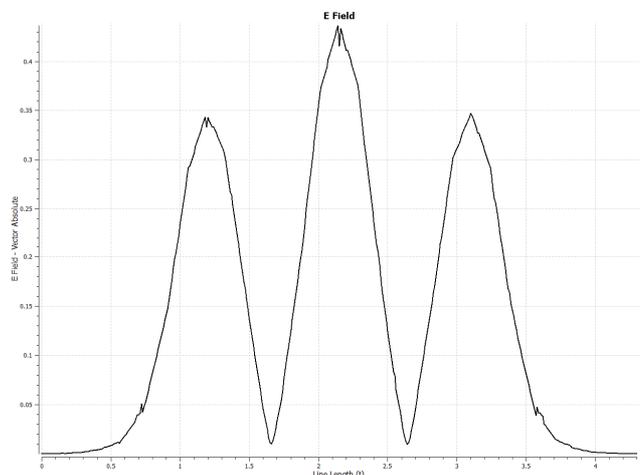
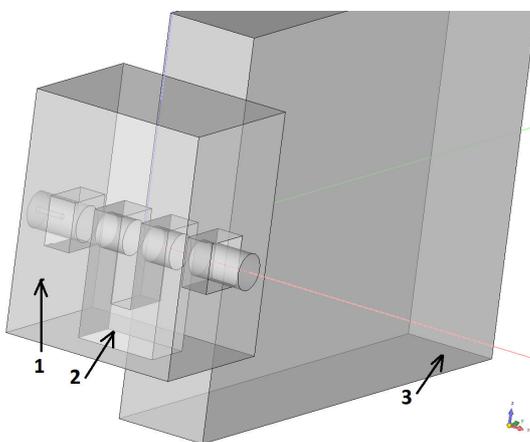


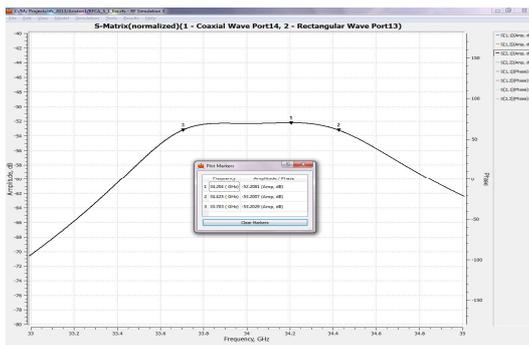
Рисунок 5. Резонатор с неравной длиной пазов. 1 - резонатор, 2 - гребни, 3 - выходной волновод

Рисунок 6

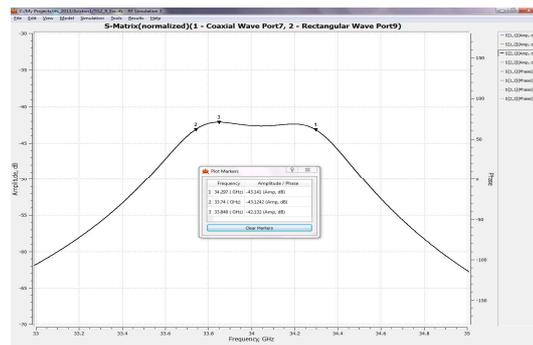
За счет более равномерного распределения поля этот резонатор на собственной частоте 34.5 ГГц имеет волновое сопротивление $\rho = 261$ Ом. Кроме того, такой резонатор оказалось возможным нагрузить до нужной добротности, не используя специальных элементов связи.

Для получения требуемой ширины полосы усиливаемых частот выходной резонатор должен иметь амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), соответствующей формы. Для этого необходимо обеспечить требуемую степень связи резонатора с выходным волноводом. Обычная щель, прорезанная в боковой стенке резонатора и соединенная с волноводом, не обеспечивает необходимую степень связи резонаторов первого и второго типов с волноводом сечением $7,2 \times 1,7$ мм², используемым для вывода энергии. В связи с этим был предложен специальный элемент связи в виде отрезка волновода, заполненного керамикой. Такой элемент связи одновременно служит пассивным резонатором, расширяющим АЧХ, а также может использоваться как вакуумное окно.

На рис. 7 и 8 показаны АЧХ резонаторов, изображенных на рис. 1 и 3, с такими элементами связи. В первом случае получена полоса пропускания шириной 720 МГц, а во

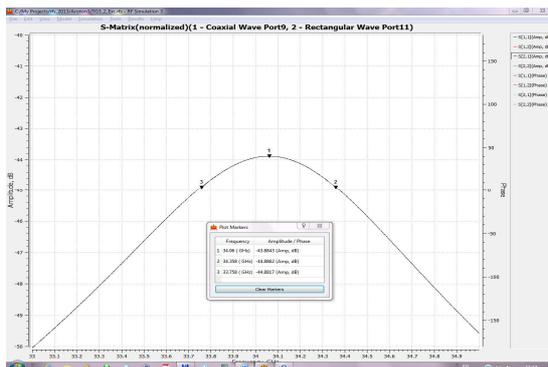


Рисунк 7



Рисунк 8

втором – шириной 557 МГц по уровню -1 дБ от максимума. Расчет проводился при возбуждении резонатора штырем, введенным в пролетный канал. Приемный порт располагался в выходном волноводе. Длина штыря выбиралась таким образом, чтобы внести минимальные искажения в поле резонатора, при этом минимальное значение затухания $|s_{21}|_{\min}$ составляло менее -45 дБ. Полученная ширина полосы пропускания удовлетворяет требованиям ТЗ ($\Delta f \geq 500$ МГц) с учетом допусков на изготовление деталей прибора, однако допуски на изготовление керамического резонатора оказываются



Рисунк 9

слишком жесткими. Кроме того, существует разброс в значениях диэлектрической проницаемости керамики, что также необходимо учитывать. Эти факторы усложняют изготовление резонатора и могут снизить процент выхода годных приборов.

Резонатор на гребенчатой ЗС с неравной глубиной пазов, изображенный на рис. 5, не

только имеет увеличенное волновое сопротивление, но и за счет более равномерного распределения электрического поля в зазорах позволяет увеличить степень связи с выходным волноводом. Используя вывод энергии через отверстие, прорезанное в боковой стенке резонатора, удалось обеспечить требуемое значение нагруженной добротности без использования керамического элемента связи (рис. 7). При этом расстояние от стенки до штырей оказалось достаточно большим, чтобы не уменьшить существенно волновое сопротивление. АЧХ этого резонатора с элементом связи показано на рис. 9. Ввиду отсутствия пассивного резонатора АЧХ имеет «одногорбую» форму и ширину полосы пропускания $\Delta f = 600$ МГц по уровню - 1 дБ. Такая ширина полосы пропускания выходного резонатора в сочетании с высоким волновым сопротивлением $\rho = 260$ Ом обеспечивает получение требуемой ширины полосы усиливаемых частот 500 МГц при наличии широкополосного группирователя. В настоящее время ведется разработка такого группирователя. Проектируются также макеты предложенных конструкций резонаторов в масштабе 10 : 1.

В работе представлены три конструкции многозазорных выходных резонаторов для мощного усилительного клистрона 8-мм диапазона длин волн. Резонаторы имеют увеличенное по сравнению с обычным тороидальным резонатором волновое сопротивление.

Предложен новый способ связи резонатора с выходным волноводом с помощью отрезка волновода, заполненного керамикой. Такой отрезок может одновременно служить пассивным резонатором и вакуумным окном. Однако, изготовление такого элемента связи связано с существенными технологическими трудностями.

Предложена также конструкция резонатора, не требующая использования керамического элемента связи. Показано, что можно получить требуемую степень связи такого резонатора с волноводом с помощью отверстия в боковой стенке резонатора.

Библиографический список

1. S. Azam and Q. Wahab (2010). The Present and Future Trends in High Power Microwave and Millimeter Wave Technologies, Advanced Microwave and Millimeter Wave Technologies Semiconductor Devices Circuits and Systems, Moumita Mukherjee (Ed.), ISBN: 978-953-307-031-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advanced-microwave-and-millimeter-wave-technologies-semiconductordevices-circuits-and-systems/the-present-and-future-trends-in-high-power-microwave-and-millimeter-wavetechnologies/>.
2. Extended interaction klystron technology at millimeter and sub-millimeter wavelengths. www.cpii.com/docs/related/40/EIK%20Technology/
3. Григорьев А.Д., Салимов Р.В., Тихонов Р.И. Моделирование антенн сотовых телефонов методом векторных конечных элементов. – РиЭ, 2012, т. 57, № 3, с. 261-270.