

УДК 621.385.624

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВУХ СВЯЗАННЫХ ЧЕРЕЗ ЩЕЛЬ РЕЗОНАТОРОВ МИНИАТЮРНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА В РЕЖИМЕ НАСТРОЙКИ НА КРАТНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ

И.О. Чигуров¹, В.А. Царев², А.В. Ливчина^{1,2}¹АО «НПП «Алмаз», 410033, г. Саратов, ул. Панфилова, д. 1²СГТУ им. Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты трехмерного электромагнитного моделирования двух связанных через щель связи ступенчато-неоднородных резонаторов для миниатюрного многолучевого клистрона, работающие на двух кратных частотах. Исследовано распределение электрического поля на рабочих видах колебаний, рассчитаны основные электронные и электродинамические параметры. Показана возможность дальнейшего повышения комплекса энергетических и массогабаритных параметров миниатюрных многолучевых клистронов.

Ключевые слова: низковольтный многолучевой клистрон, связанные ступенчато-неоднородные резонаторы, электронный КПД, синфазный и противофазный виды колебаний, Ку-диапазон

Abstract. The paper presents the results of a three-dimensional electromagnetic modeling of two connected through the gap coupling stepwise-inhomogeneous cavities, operating at double frequencies (f_0 and $2f_0$) and an estimation of the possibility of their application in MMLK with an improved complex of output parameters. This cavity was designed for application in low-voltage dual-frequency klystrons. Such a klystron can be used in on-board transmitters of radio systems for various purposes (radar, transponders, navigation, communications). The parameters of the coupled resonator system were calculated using the Ansoft HFSS program. The distribution of the electric field on the working modes of oscillations is investigated. The main electrodynamic and electronic parameters of various modes are investigated (characteristic wave impedance $\rho=R/Q$, coupling coefficient M , relative

active electron conductance $Ge/G0$, quality Q and accelerating potential $U0 = 3$ kV). The characteristic resistance in different transit channels is calculated. Found operating conditions, which provide effective interaction of multi-electron beam with a high-frequency electromagnetic field. The possibility of further enhancing the complex of energy and mass-dimensional parameters of low voltage miniature multi-beam Ku-band klystrons is shown. This cavity will increase the efficiency of microwave power devices. With further investigation of coupled stepwise inhomogeneous resonators, attention must be paid to the search for ways to eliminate the uneven distribution of the electric field and the characteristic resistance in the interaction region.

Key words: low voltage miniature multi-beam klystrons, connected step-inhomogeneous resonators, electronic efficiency, anti-phase and in-phase modes, Ku-band.

Введение

Миниатюрные многолучевые клистроны (ММЛК) находят в настоящее время широкое применение в бортовых передатчиках радиосистем различного назначения (РЛС, ответчики, навигация, связь), работающих в Ku- и Ka-диапазонах. Число лучей ММЛК обычно выбирается равным 18 или 19. Ширина полосы рабочих частот составляет 50-70 МГц (на уровне -2дБ) при высоком коэффициенте усиления (35-45 дБ) и уровне выходной импульсной мощности до 1 кВт. Достоинством ММЛК являются низкие рабочие напряжения (2,5-3 кВ) и большая удельная мощность (до 500 Вт/кг) [1-3].

Научный прогресс требует поиска путей дальнейшего повышения выходной мощности и КПД этих приборов при сохранении их массы и габаритов [4]. Одним из таких путей является использование режима несинусоидальной скоростной модуляции, реализуемого за счёт использования в группирователе клистрона резонаторов, возбуждаемых на двух кратных частотах одновременно [5, 6]. Однако такие резонаторы могут быть использованы в ММЛК со сравнительно узкой полосой усиления.

Для широкополосных приборов целесообразно использование более широкополосной резонансной системы, состоящей из двух, связанных через щель, резонаторов, настроенных одновременно на две кратные рабочие частоты. Ранее возможность создания таких резонансных систем для ММЛК не исследовалась.

Целью работы является исследование с помощью трехмерного электромагнитного моделирования электронных и электродинамических параметров новых типов двухчастотных резонаторных систем и оценка возможности их применения в ММЛК с улучшенным комплексом выходных параметров.

Конструкция резонансной системы и результаты моделирования

Конструкция резонансной системы представляет собой два связанных через щель связи (1) однозачорных ступенчато-неоднородных резонаторов (рис. 1).

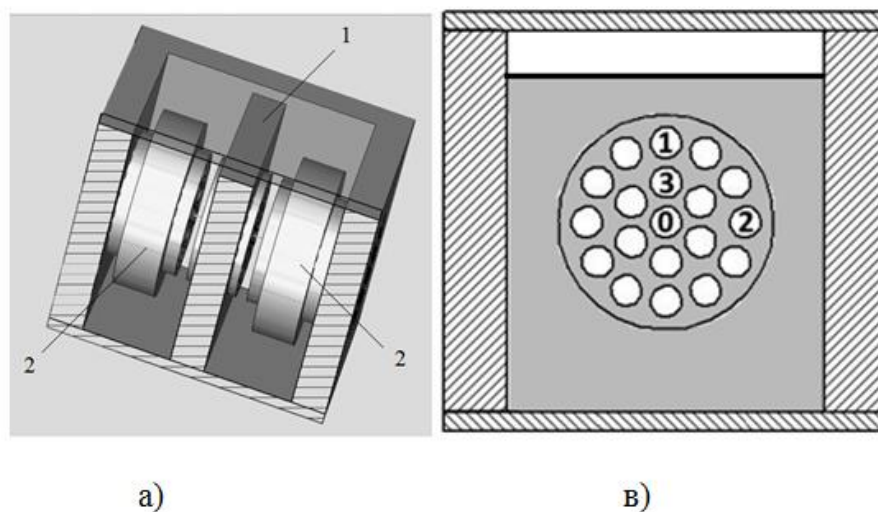


Рис.1. а)- 3D модель исследуемого резонатора, в)- вид резонатора в поперечном сечении (цифрами обозначены номера пролетных каналов)

Расчет параметров связанной системы резонаторов проводился с помощью программы Ansoft HFSS [7]. Эта программа позволяет определять численные значения всех компонент электромагнитного поля резонатора любой геометрической формы, а, следовательно, и вычислять все, интересующие разработчика параметры бессеточных резонаторов [8]:

- характеристическое сопротивление

$$\rho = \frac{R}{Q_0} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} |E_z| dz \right)^2}{2\omega W_s}, \quad (1)$$

- коэффициент эффективности взаимодействия

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

- относительную активную составляющую электронной проводимости G_e/G_0

$$\frac{G_e}{G_0} = -\frac{\beta_e}{2} M \frac{\partial M}{\partial \beta_e} = -\frac{\beta_e}{4} M \frac{\partial |M|^2}{\partial \beta_e}, \quad (3)$$

где β_e - электронная постоянная распространения, R - резонансное сопротивление эквивалентного параллельного контура; Q_0 - собственная добротность резонатора; $\omega = 2\pi f_0$ - круговая частота колебаний электромагнитного поля; W_s - энергия электромагнитного поля, запасенная в резонаторе; E_z - продольная компонента напряженности электрического поля.

В результате проведенной оптимизации удалось добиться кратности рабочих частот 2π -вида с помощью изменения размеров подстроечных колец (2) и размеров зазоров.

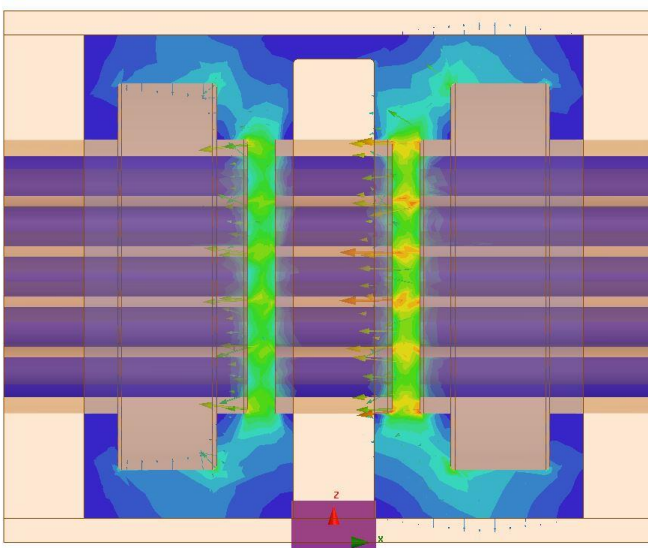


Рис. 2 Картина распределения поля в связанных резонаторах на частоте f_0 .

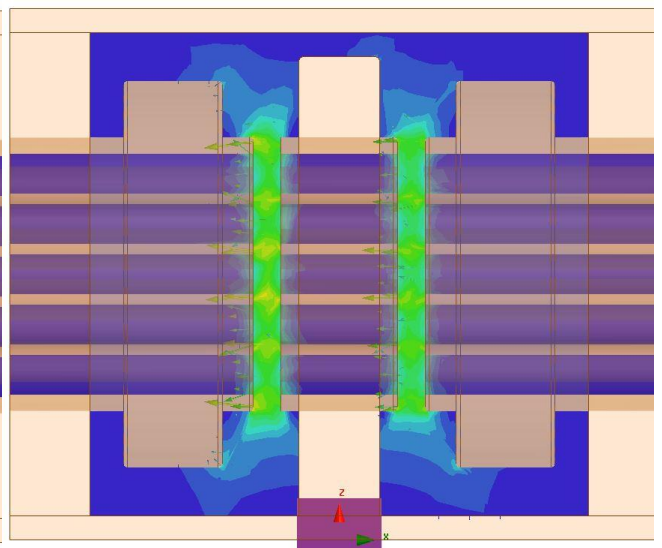


Рис. 3 Картина распределения поля в связанных резонаторах на частоте $2f_0$.

На рисунках 2 и 3 изображены картины электрического поля 2π - вида колебаний в зазорах связанных резонаторов, настроенных на кратные частоты f_0 и $2f_0$.

Результаты расчёта параметров, характеризующих взаимодействие на разных модах колебаний при ускоряющем напряжении $U_0 = 3$ кВ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта параметров

F, ГГц	Вид	M	ρ , Ом	G_e/G_0	Q_0	ρM^2 , Ом
$0,98f_0$	π	0,105	44,846	0,135	733	0,494
f_0	2π	0,831	43,929	0,020	743	30,335
$2f_0$	2π	0,510	15,750	0,001	1230	4,096
$2,03f_0$	2π	0,109	12,162	0,074	1260	0,144

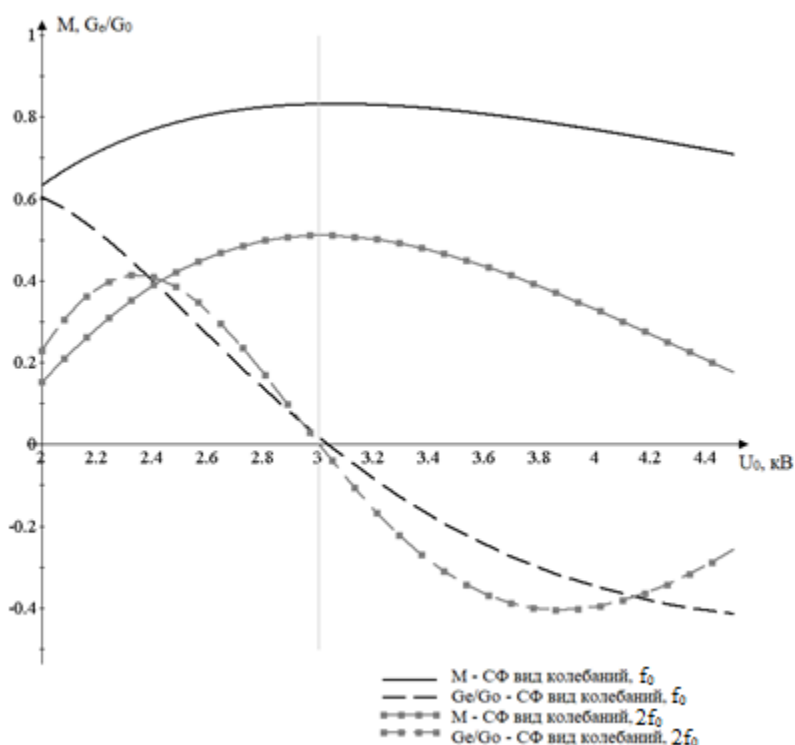


Рис.4. Зависимости коэффициента взаимодействия M и относительной активной составляющей электронной проводимости G_e/G_0 от ускоряющего напряжения U_0 .

Из таблицы 1 видно, что в качестве рабочего вида необходимо принять синфазный вид (2π) колебаний, поскольку он имеет на двух кратных частотах наивысшее произведение ρM^2 . При заданной величине ускоряющего напряжения 3 кВ величина относительной активной электронной проводимости G_e/G_0 для противофазных (π -видов) колебаний находится в положительной области значений. Следовательно, данные виды колебаний не будут приводить к самовозбуждению резонансной системы (рис. 4).

Результаты расчета характеристического сопротивления на рабочих видах колебаний в различных пролетных каналах, рассчитанные по методике [5], представлены в таблице 2.

Таблица 2. Изменение величины характеристического сопротивления в различных пролетных каналах.

№ пролетного канала	Характеристическое сопротивление, ρ , Ом	
	f_0	$2f_0$
0	43,929	15,750
1	40,010	13,631
2	37,386	6,188
3	42,937	15,211

Из таблицы видно, что разница между значениями характеристического сопротивления ρ в различных пролетных каналах на первом рабочем виде колебаний составляет 15%. На втором рабочем виде колебаний разница между значениями характеристического сопротивления ρ в различных пролетных каналах составляет 60%. Резкое падение характеристического сопротивления на втором виде колебаний во 2 пролетном канале связано с особенностями конструкции резонатора, а именно с близостью подстроечного кольца к длинным стенкам резонатора.

Заключение

1. Показана возможность дальнейшего повышения комплекса

энергетических и массогабаритных параметров ММЛК Ку-диапазона за счет применения системы двух связанных ступенчато-неоднородных резонаторов, возбуждаемых одновременно на двух кратных резонансных частотах, соответствующих синфазному (2π) виду колебаний.

2. Исследованная конструкция резонансных систем и способы их настройки на бигармонические режимы работы могут быть использованы также для создания двухрежимных миниатюрных клистронов перспективных для применения в бортовых системах связи и радиолокации.

3. При дальнейшем исследовании связанных ступенчато-неоднородных резонаторов необходимо уделить внимание поиску путей устранения неравномерности распределения электрического поля и характеристического сопротивления в области взаимодействия.

Литература

1. Гельвич, Э.А. Многолучевые клистроны. Тенденции развития. / Э.А. Гельвич, Е.В. Жарый, А.Д. Закурдаев, В.И. Пугнин // Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. Н. Новгород. - 2002. С. 54
2. Bandyopadhyay A.K., Pal D., Saini A., Kant D., Saha S., Joshi L.M. Design of a Ku band miniature multiple beam klystron. AIP Conference Proceedings. Vol. 1715 (1). 2016.
3. Царев В.А. Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ку-диапазона длин волн / В.А. Царев, И.О. Чигуров, П.Д. Шалаев // Радиотехника. 2015. №7. С. 41 - 44.
4. Быстров Р.П. Функциональные устройства и элементная база радиолокационных систем. / Р.П. Быстров, А.А. Потапов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2009. Том 1. №1-2. С. 43-58.
5. Царев В.А. Исследование различных способов настройки многоканальных однозачорных резонаторов на кратные резонансные частоты / В. А. Сенчуков, В. А. Царев // Журнал радиоэлектроники. - 2011. - N 9. - С. 12.

6. Патент №2390870 С1, РФ. МПК H01J25/02. СВЧ - прибор клистронного типа (варианты). / А.Н. Королев, В.М. Лямзин, А.В. Мамонтов, К.Г. Симонов. Заявка: № 2009104517/09; заявл.10.02.2009, опубл. 27.05.2010.
7. ANSYS HFSS [Электронный ресурс] // ANSYS - Simulation Driven Product Development [Официальный сайт]. URL:
<http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
(дата обращения 07.06.18)
8. T. Wessel Berg, "A General Theory of Klystrons with Arbitrary Extended Interaction Fields", Technical Report, Stanford Microwave Laboratory Report No. 376, March, 1957.

Для цитирования:

И.О. Чигуров, В.А. Царев, А.В. Ливчина. Исследование системы двух связанных через щель резонаторов миниатюрного многолучевого клистрона в режиме настройки на кратные резонансные частоты. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.1