

Электронные и ионные пучки

УДК 621.385

Моделирование распределенно-резонансных систем клистронов с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона

В. П. Ерёмин, А. И. Тореев, В. К. Фёдоров

Проведено моделирование распределенно-резонансных систем клистронов с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона. Выполнены расчеты схем взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов. Найдены схемы взаимодействия клистронов трехмиллиметрового диапазона, в которых обеспечивается выходная ВЧ-мощность 120—190 Вт, усиление 25—32 дБ и полоса частот 150—210 МГц при анодном напряжении 14 кВ и токе пучка 0,16—0,20 А. Показана возможность расширения полосы частот до 310 МГц.

PACS: 41.2.-q; 41.75-i

Ключевые слова: клистрон, миллиметровый диапазон, мощность, моделирование, расчет, электронный пучок.

Введение

Клистрон с распределенным взаимодействием (КРВ) является одним из перспективных приборов О-типа миллиметрового диапазона. Приборы типа КРВ являются предпочтительными перед лампами бегущей волны (ЛБВ), особенно там, где не требуется чрезвычайно высокая полоса частот.

Основные трудности при создании клистронов усилителей миллиметрового диапазона так же, как и приборов О-типа, связаны с тем, что при укорочении длины волны значительно уменьшаются геометрические размеры электродинамической системы. Это приводит к резкому увеличению тепловой нагрузки, влиянию случайных неоднородностей и т. д. Кроме того, уменьшение поперечных размеров пролетного канала вынуждает снижать первеанс электронного пучка, что приводит к уменьшению эффективности энергообмена электронов пучка с ВЧ-полем классических однозакорных резонаторов. Эти недостатки в

значительной мере устраняются в клистронах, использующих многозакорные резонаторы с распределенным взаимодействием, в которых удается существенно повысить характеристический импеданс системы и, следовательно, обеспечить высокую величину электронной нагрузки.

Авторами проведено моделирование распределенно-резонансной системы, найдены основные геометрические размеры распределенных резонаторов, выполнен расчет эффективных схем взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов КРВ трехмиллиметрового диапазона.

Выбор геометрических размеров распределенных резонаторов

Рассматриваемая конструкция распределенно-резонансной системы (рис. 1) представляет собой цепочку индуктивно связанных тороидальных резонаторов. Период резонатора L определяется заданием величины ускоряющего напряжения U_0 , частоты ω_0 и сдвига фазы поля на период

$\beta_f L = \frac{\omega}{v_f} L$. Если рабочим видом колебаний является синфазный, то $\beta_f L = 2\pi$. С другой стороны, исходя из заданного значения угла пролета электронов $\beta_e L = \frac{\omega}{v_e} L = \varphi$ и известного соотношения

$\frac{c}{v_e} = \frac{505}{\sqrt{U_0}}$, величину периода системы можно определить из выражения

Ерёмин Валерий Павлович, начальник отдела.
ОАО "Тантал".

Россия, 410040, г. Саратов, пр. 50 лет Октября, 110а.
Тел. (845-2) 47-63-57. E-mail: Eremintant@mail.ru.

Тореев Александр Иванович, стар. науч. сотрудник.
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского.

Россия, 410071, г. Саратов, ул. Б. Казачья, 112а.
Тел. (845-2) 72-11-96.

Фёдоров Виталий Константинович, доцент.
Саратовская государственная академия права.
Россия, 410056, г. Саратов, ул. Чернышевского, 104.
Тел. (845-2) 29-92-37.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2009 г.

$$L = \frac{\lambda \varphi \sqrt{U_0}}{2\pi 505},$$

где v_e — скорость электронов;
 c — скорость света;
 v_f — фазовая скорость ВЧ-волны;
 λ — длина волны.

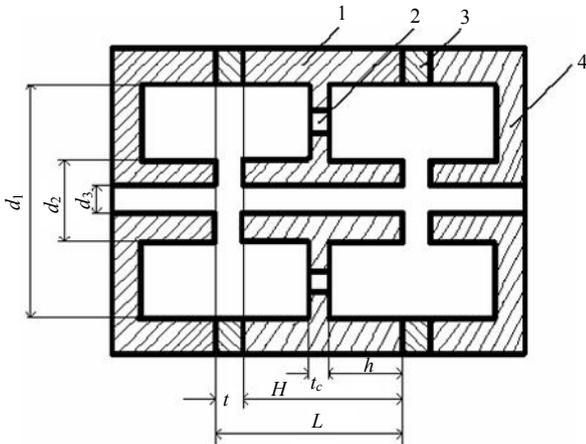


Рис. 1. Распределенный двухзазорный резонатор:

1 — диафрагма; 2 — щели связи между ячейками;
 3 — кольцо емкостного зазора; 4 — торцевые элементы резонансных ячеек

Известно, что соотношение между $\beta_f L$ и $\beta_e L$ определяет величину и характер проводимости резонатора и в конечном счете энергообмен между ВЧ-полем и сгруппированным током.

В группирующих распределенных резонаторах наиболее целесообразно использовать условие $\beta_f L \approx \beta_e L = 2\pi$. В этом случае многорезонаторный группирователь обеспечивает максимальную амплитуду сгруппированного тока и минимальный разброс скоростей. Как показывает теоретический анализ в нелинейном режиме, в выходном резонаторе наиболее эффективный отбор энергии происходит при $\beta_e L \approx 1,6\pi - 1,7\pi$. Ввиду этого период резонаторов группирователя определялся по соотношению $L = \frac{\lambda \sqrt{U_0}}{505}$, а выходного резонатора —

$$L = \frac{0,8\lambda \sqrt{U_0}}{505}.$$

Основные размеры других элементов распределенного резонатора (см. рис. 1): внутренний диаметр d_1 резонансной полости, зазор взаимодействия t , внешний диаметр трубки дрейфа d_2 , а также диаметр пролетного канала d_3 определялись резонансной частотой синфазного вида и результатами экспериментальных измерений осевого распределения электрической компоненты

ВЧ-поля $\frac{E_z}{\sqrt{W}}$ на разборных макетах крупномасштабных моделей резонаторов в сантиметровом диапазоне.

Указанная методика была апробирована при создании КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона [1] и позволила разработать конструкцию распределенно-резонансной системы. Полученные результаты дают возможность провести разработку распределенных резонаторов трехмиллиметрового диапазона на основе моделирования геометрии резонаторов пятимиллиметрового диапазона с учетом пропорционального уменьшения всех линейных размеров (см. рис. 1), а также изменения ускоряющего напряжения.

В табл. 1 приведены геометрические размеры входного, промежуточных и выходного распределенных резонаторов мощного КРВ пятимиллиметрового диапазона [1], а также размеры распределенного резонатора КРВ трехмиллиметрового диапазона, полученные моделированием для трех значений ускоряющего напряжения — 16,5; 14 и 13 кВ. Из табл. 1 видно, что выбор ускоряющего напряжения существенно ограничивается уменьшением продольных размеров элементов распределенного резонатора. В особенности это относится к толщине стенки t_c , разделяющей смежные резонансные ячейки входного и промежуточного резонаторов, которая, например, в промежуточном резонаторе становится менее 0,03 мм при ускоряющем напряжении 13 кВ, что нежелательно как с точки зрения механической прочности, так и теплорассеивающей способности.

Таблица 1

Резонаторы	f , ГГц	U , кВ	L , мм	t , мм	H , мм	h , мм	t_c , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм
Входной и промежуточные	57,5	18	1,54	0,465	1,08	0,4	0,28	3,05	0,7	0,5
	93,5	16,5	0,91	0,286	0,624	0,246	0,132	1,89	0,431	0,308
	93,5	14	0,835	0,286	0,549	0,246	0,057	1,89	0,431	0,308
	93,5	13	0,805	0,286	0,519	0,246	0,027	1,89	0,431	0,308
Выходной	57,5	18	1,18	0,3	0,88	0,3	0,28	3,05	0,7	0,5
	93,5	16,5	0,695	0,185	0,510	0,185	0,14	1,89	0,43	0,308
	93,5	14	0,640	0,185	0,455	0,185	0,085	1,89	0,431	0,308
	93,5	13	0,617	0,185	0,432	0,185	0,062	1,89	0,431	0,308

Не менее сложные задачи возникают по созданию электронно-оптических систем КРВ при переходе от средневолновой к коротковолновой части миллиметрового диапазона, связанные с резким уменьшением диаметра пролетного канала распределенных резонаторов, возрастанием уровня магнитного фокусирующего поля, а также массы и габаритных размеров пакетированных магнитов. Требуемый для фокусировки уровень магнитного поля можно получить по соотношениям:

$$B_{br}^2 = 6,9 \cdot 10^{-7} \frac{I_0}{r_n^2 \sqrt{U_0}}; \quad 2r_{beam} = 0,6d_3; \quad B_{co} = 1,5B_{br},$$

где B_{br} — бриллюэновское магнитное поле;

U_0 — ускоряющее напряжение;

I_0 — ток пучка;

r_{beam} — радиус пучка;

B_{co} — рабочее фокусирующее поле.

В табл. 2 приведены значения магнитного поля для значений $U_0 = 14$ кВ, $I_0 \leq 0,165$ А и $d_3 \geq 0,308$ мм.

Таблица 2

U_0 , кВ	I_0 , А	d_3 , мм	$2r_{beam}$, мм	B_{br} , Тл	B_{co} , Тл
14	0,165	0,308	0,183	0,345	0,518
14	0,165	0,32	0,192	0,324	0,486
14	0,165	0,38	0,228	0,272	0,409
14	0,165	0,4	0,24	0,259	0,388
14	0,150	0,4	0,24	0,247	0,371

Из табл. 2 видно, что полученный при моделировании распределенного резонатора (при переходе от $f = 57,5$ к $f = 93,5$ ГГц) диаметр пролетного канала $d_3 = 0,308$ мм потребует для транспортировки электронного пучка с напряжением 14 кВ и током 0,165 А использовать магнитное фокусирующее поле $B_{co} \approx 0,52$ Тл.

Опыт разработки мощного КРВ пятимиллиметрового диапазона [1] показал, что такой уровень поля в рабочем пространстве ~ 25 мм может быть обеспечен постоянным магнитом массой ~ 7 кг, что для прибора с уровнем выходной мощности порядка 100 Вт нерационально. Более того, при такой малой величине первеанса пучка ($P_\mu \approx 0,12$) из-за влияния тепловых скоростей электронов [2] происходит значительное расплывание пучка в

пролетном канале. (В нашем случае расплывание достигает диаметра $\sim 0,32$ мм.) Это приведет к значительному токоперехвату пучка даже в статическом режиме работы. С этой точки зрения выбор диаметра пролетного канала $d_3 = 0,32$ мм также нежелателен. При величине диаметра пролетного канала $d_3 = 0,38$ мм, как видно из табл. 2, требуемый уровень магнитного фокусирующего поля составляет $\sim 0,4$ Тл. Такая величина магнитного поля в СВЧ-приборах О-типа с протяженным взаимодействием обычно обеспечивается малогабаритными магнитными системами типа МПФС. В случае фокусировки униполярным магнитным полем, по-видимому, можно также обеспечить величину поля 0,4 Тл при относительно небольшой массе постоянного магнита. Как показано в работе [3], при выборе диаметра пролетного канала 0,38 мм между "тепловым" пучком и каналом будет зазор 0,03 мм. Заметим, что увеличение диаметра пролетного канала от 0,308 мм (полученного моделированием) до 0,38 мм приведет к некоторому снижению эффективности взаимодействия пучка с ВЧ-полем резонатора. Как показал опыт разработки КРВ пятимиллиметрового диапазона, подобное увеличение пролетного канала приводит к уменьшению параметра $\frac{E_z}{\sqrt{W}}$ в среднем на 8—10 %.

Из табл. 1 и 2 видно, что для КРВ трехмиллиметрового диапазона (93,5 ГГц), работающих при ускоряющем напряжении 14 кВ и токе пучка 0,165 А и фокусировке магнитным фокусирующим полем $\sim 0,4$ Тл, наиболее предпочтительной является распределенно-резонансная система с размерами, представленными в табл. 3.

Исследования схем взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенно-резонансных систем

Для описания процессов взаимодействия ВЧ-полей с электронным пучком в КРВ использован приведенный в работе [1] метод самосогласованного поля в предположении возбуждения одного вида колебаний. В рамках такой физической модели проводится совместное решение трех уравнений: движения, возбуждения резонаторов с заданным током [4] и первой гармоники сгруппированного тока.

Таблица 3

Резонаторы	L , мм	t , мм	H , мм	h , мм	t_c , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	$(d_1 - d_3)/2$, мм
Входной и промежуточные	0,835	0,286	0,549	0,246	0,057	1,89	$\sim 0,48$	0,38	$\sim 0,05$
Выходной	0,640	0,185	0,455	0,185	0,085	1,89	$\sim 0,48$	0,38	$\sim 0,05$

Программа расчета выходных характеристик КРВ, использованная в [1], была модифицирована в целях расширения возможностей расчета более сложных схем КРВ и ускорения сходимости итерационного процесса.

Расчет вариаций схем взаимодействия выполнялся для распределенно-резонансной системы, состоящей из шести распределенных резонаторов, поскольку с пятирезонаторной системой, как показали предварительные расчеты, в отличие от КРВ пятимиллиметрового диапазона [1] не удается получить достаточной величины усиления.

Исследования проводили на частоте 93,5 ГГц при использовании электронного пучка с ускоряющим напряжением 14 кВ и током пучка 0,165 и 0,2 А. Для таких значений частоты и ускоряющего напряжения были выбраны геометрические размеры распределенных резонаторов: диаметр пролетного канала 0,38 мм, период входного и промежуточных резонаторов 0,835 мм, выходного резонатора — 0,640 мм. Величина геометрического емкостного зазора в резонансных ячейках входного и промежуточных резонаторов составляла 0,286 мм, а выходного резонатора — 0,185 мм.

Все указанные параметры, кроме геометрического зазора, в программе расчета непосредственно вводились в качестве исходных данных. Геометрический зазор вводили в виде отношения эффективной протяженности зазора к периоду резонатора. При этом эффективная протяженность зазора ввиду "провисания" электрического поля внутри трубок дрейфа, как показали измерения на масштабных моделях, в два—три раза превышала величину геометрического зазора. При расчетах использовалась постоянная величина отношения зазора к периоду, равная 0,68.

Изменения уровня выходной ВЧ-мощности, КПД, усиления и полосы усиливаемых частот при расчете обеспечивались варьированием исходных данных: относительных частотных расстройек, длин дрейфа между распределенными резонаторами, а также выбором значений нагруженных добротностей входного и выходного резонаторов.

Расчеты, проведенные с заданными частотными расстройками и длинами дрейфа, близкими к таковым в КРВ пятимиллиметрового диапазона, показали, что в интервале входных мощностей 0,080—0,160 Вт выходная мощность составляет 60—90 Вт, коэффициент усиления 24—27 дБ, полоса усиления 140—160 МГц.

Недостаточная эффективность схемы взаимодействия ВЧ-полей резонаторных систем с электронным пучком в трехмиллиметровом диапазоне

по сравнению с пятимиллиметровым обусловлена значительным уменьшением импеданса системы и малым первеансом пучка и, следовательно, малой величиной параметра усиления. Возможность увеличения эффективности взаимодействия была найдена в процессе расчета по программе при рассмотрении поведения группирования электронного пучка по мере последовательного прохождения его через распределенные резонаторы. Оказалось, что при такой малой величине параметра усиления ($C \sim 0,02$) слишком медленно увеличивается группировка электронов пучка. Для устранения этого недостатка величины длин дрейфа между резонаторами были значительно увеличены и изменена схема их расположения. Вместо схемы 1,6; 1,6; 1,5; 1,5; 1,8 была применена схема 5,3; 3,7; 2,7; 2,5; 1,7.

Как показали расчеты, это изменение при прочих равных условиях существенно улучшило амплитудно-частотные характеристики КРВ. При той же входной мощности 0,160 Вт полоса частот увеличилась до ~190 МГц и усиление в этом интервале частот до 28—29 дБ. При входной мощности 0,080 Вт выходная мощность увеличилась до 120 Вт, а ширина полосы до 160 МГц. Даже при малом входном сигнале 0,040 Вт появилась возможность получать приемлемые для практического применения значения: выходной мощности 80 Вт, усиления 30 дБ, и мгновенной полосы усиления ~130 МГц. Дальнейшее улучшение выходных характеристик было получено за счет замены входного двухззорного распределенного резонатора на трехззорный.

В результате оптимизации длин дрейфа и числа зазоров, а также выбора оптимальных значений частотных расстроек резонаторов и их добротностей, представленных в табл. 4, были получены частотные зависимости выходной мощности (рис. 2, а) при взаимодействии электронного пучка с током 0,165 А и напряжением 14 кВ с ВЧ-полями шестирезонаторной распределенной системы (где входной и выходной трехззорные и четыре промежуточных двухззорных) для четырех значений входной мощности. Изображенные на рис. 2, а амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) можно представить в виде таблицы значений параметров: входная и выходная мощности, усиление, полоса частот (табл. 5). Из табл. 5 видно, что схема взаимодействия с исходными параметрами, приведенными в табл. 4, позволяет получить выходную мощность в пределах 60—130 Вт, коэффициент усиления 26—35 дБ и полосу частот 130—215 МГц.

Таблица 4

Параметры	Номер резонатора					
	1	2	3	4	5	6
Добротность собственная	400	400	400	400	400	400
Добротность нагруженная	100	400	400	400	400	200
Число зазоров в резонаторе	3	2	2	2	2	3
Частотная расстройка $\Delta f/f$, %	-0,05	-0,03	0,03	0,02	0,05	0,0
Период резонатора L , мм	0,835	0,835	0,835	0,835	0,835	0,640
Зазор/период	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Диаметр канала d , мм	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Длины дрейфа l , мм	5,3	3,7	2,7	2,5	1,7	—

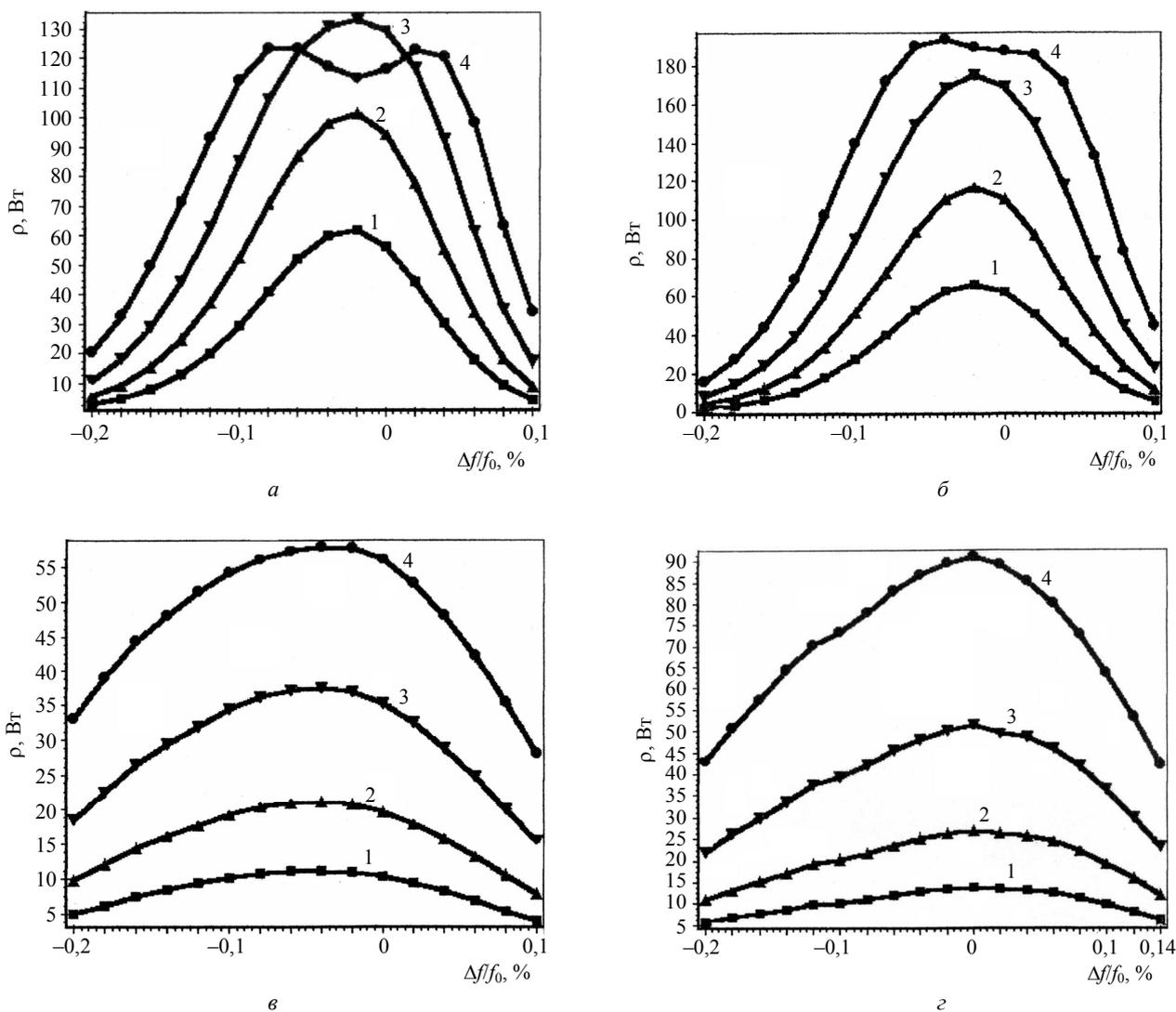


Рис. 2. Частотные зависимости выходной ВЧ-мощности (кривые 1—4):

- a* — при уровнях входного сигнала 0,020; 0,040; 0,080; 0,160 Вт, ускоряющем напряжении 14 кВ, токе пучка 0,165 А и заданных в табл. 4 значениях параметров схемы взаимодействия КРВ;
- б* — при уровнях входного сигнала 0,010; 0,020; 0,040; 0,080 Вт, ускоряющем напряжении 14 кВ, токе пучка 0,2 А и заданных в табл. 4 значениях параметров схемы взаимодействия КРВ;
- в* — при уровнях входного сигнала 0,030; 0,060; 0,120; 0,240 Вт, ускоряющем напряжении 14 кВ, токе пучка 0,165 А и заданных в табл. 4 значениях нагруженных добротностей (100; 400; 400; 400; 400; 200) и частотных расстроек резонаторов (-0,18; 0,05; -0,18; 0,15; 0,15; -0,15) схемы взаимодействия КРВ;
- з* — при уровнях входного сигнала: 0,030; 0,060; 0,120; 0,240 Вт, ускоряющем напряжении 14 кВ, токе пучка 0,2 А и заданных в табл. 4 значениях: нагруженных добротностей (130; 400; 400; 400; 400; 130) и частотных расстроек резонаторов (-0,22; -0,22; 0,10; 0,22; 0,22; -0,19) схемы взаимодействия КРВ

Таблица 5

Входная мощность, Вт	Выходная мощность, Вт	Усиление, дБ	Мгновенная полоса, МГц
0,160	123	26—28	215
0,080	130	29—32	164
0,040	101	30—34	140
0,020	62	31—35	130

Следует отметить, что относительно небольшое увеличение тока электронного пучка позволяет заметно улучшить выходные параметры. Например, увеличение тока от 0,165 до 0,2 А при входной мощности 0,080 Вт (см. рис. 2, б) приводит к увеличению выходной мощности до 195 Вт.

Влияние отклонений в значениях входных параметров на АЧХ схем взаимодействия

Численный анализ позволил выяснить влияние отклонений входных параметров (от приведенных в табл. 4) на характеристики схем взаимодействия.

Увеличение собственной добротности резонаторов от 400 до 450 при малых входных сигналах (0,020—0,040 Вт) приводит к увеличению выходной мощности в ~1,5 раза, а при больших входных сигналах — к увеличению полосы частот на ~0,03 %.

Уменьшение собственной добротности резонаторов до 350 ведет к значительному снижению уровня выходной мощности (на 50 % в режиме до насыщения) и уменьшению полосы частот на 0,02 %.

Увеличение отношения зазора к периоду 0,68—0,8, уменьшение до 0,58, а также увеличение диаметра пролетного канала до 0,4 мм не приводит к значительным изменениям АЧХ.

Рост коэффициента заполнения пролетного канала электронным пучком (от 0,75 до 0,85) приводит к увеличению выходной мощности (от 60—100 до 90—130 Вт) при малых величинах (0,020—0,040 Вт) входного сигнала, а также к увеличению полосы частот (от 160—215 до 190—240 МГц) при больших (0,080—0,160 Вт) входных сигналах.

Изменение относительных частотных расстроек резонаторов в небольших пределах не приводит к существенному изменению АЧХ.

Исследование возможности расширения полосы усиливаемых частот

Проведенный анализ показал, что наиболее трудной задачей является обеспечение широкополосности прибора. Оказалось, что при различных вариациях исходных данных (добротности резонаторов, числа зазоров, длин дрейфа и т. д.) не удается существенно превысить полосу частот более 200 МГц. Это связано с тем, что при частотной

настройке резонаторов в сравнительно небольшом диапазоне (0,03—0,07 %) АЧХ имеет четко выраженный колоколообразный вид с довольно крутым спадом по краям. Поднять величину выходной мощности на краях диапазона за счет заметного смещения частоты отдельных резонаторов не представляется возможным из-за слабой эффективности взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полем. Эту задачу удалось решить путем синхронной настройки (или близкой к синхронной) одной группы из трех распределенных резонаторов на длинноволновом краю частотного диапазона, а другой группы резонаторов — на коротковолновом краю диапазона. В качестве примера на рис. 2, в приведены АЧХ КРВ с частотной настройкой шести резонаторов по схеме: –0,18; 0,05; –0,18; 0,15; 0,15; –0,15 %. Как видно из этого рисунка, ширина полосы частот при входной мощности 0,240 Вт составляет 280 МГц вместо полосы 215 МГц (см. рис. 2, а), которая получалась при частотной настройке (см. табл. 4): –0,05; –0,03; 0,03; 0,02; 0,05; 0,0 %. Естественно, это расширение полосы частот сопровождается уменьшением выходной мощности от 120 до 60 Вт (см. рис. 2, а и в).

Выходную мощность можно увеличить без снижения полосы частот за счет увеличения тока электронного пучка. Так, при увеличении тока пучка от 0,165 до 0,2 А выходная мощность возрастает до 100 Вт при входной мощности 0,240 и до 66 Вт — при 0,120 Вт. При этом ширина полосы частот сохраняется 280 и 245 МГц, соответственно. Более того, проведенная по описанной методике оптимизация схемы взаимодействия (вместо указанных в табл. 4 введены величины: добротностей входного и выходного резонаторов 130 и частотных расстроек резонаторов по схеме –0,22; –0,22; 0,1; 0,22; 0,22; –0,19 %) позволила при токе пучка 0,2 А достичь величины полосы усиливаемых частот до 310 МГц при входной мощности 0,240 Вт и до 260 МГц — при 0,120 Вт (см. рис. 2, з). При таком расширении полосы частот происходит небольшое снижение выходной мощности — до 90 Вт (при входной мощности 0,240 Вт) и до 50 Вт (при входной мощности 0,120 Вт). Коэффициент усиления в полосе частот сохраняется в пределах 22—26 дБ.

Заключение

В результате моделирования определены основные параметры распределенно-резонансной системы для КРВ трехмиллиметрового диапазона, состоящей из шести распределенных резонаторов: входного и выходного трехзачорных и четырех промежуточных двухзачорных резонаторов.

Проведенный оптимизационный расчет схемы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов показал возможность обеспечения на частоте 93,5 ГГц выходной ВЧ-мощности 120—130 Вт, коэффициента усиления 26—32 дБ, полосы частот 160—215 МГц при ускоряющем напряжении 14 кВ и токе пучка 0,165 А и уровне входного сигнала 0,80—0,160 Вт.

Увеличение тока пучка до 0,2 А приводит к возрастанию уровня выходной ВЧ-мощности до 195 Вт. Расширение полосы усиливаемых частот до 280—310 МГц достигнуто путем синхронной настройки одной группы распределенных резонаторов вблизи длинноволновой границы, а другой

группы — также синхронной (или частично синхронной) настройкой частоты ближе к коротковолновой границе полосы пропускания.

Результаты моделирования и оптимизации схемы взаимодействия могут быть полезны при разработке КРВ коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Литература

1. *Тореев А. И., Федоров В. К.* Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона // Прикладная физика 2008. № 5. С. 117—121.
2. *Gamayunov Y. G., Toreev A. I., Patruscheva E. V.* The Forming Peculiarities of Intensive Electron Beams of the Millimeter Wave Radiations Sources: Proc. Of the IEEE IVEC/IVESC 2006, Monterey, California, USA, April 25—27, 2006. P. 167—168.
3. *Тореев А. И., Гамаюнов Ю. Г., Патрушева Е. В.* Низковольтное управление током пучка в электронно-оптических системах источников излучения О-типа миллиметрового диапазона // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 79—84.
4. *Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Советское радио, 1973.

Modelling of the extended resonance systems of shortwave millimeter wave extended interaction klystrons

V. P. Eremin

Joint-Stock Company "Tantal", 110a 50-years of October av., Saratov, 410040, Russia
E-mail: Eremin-tawt@mail.ru

A. I. Toreev

Saratov State University, 112a B. Kazachya str., Saratov, 410071, Russia

V. K. Fedorov

Informatics Department at the Saratov State Law Academy, 104, Chernyshevsky str., Saratov, 410056, Russia

Extended resonance systems modelling of the shortwave millimeter wave extended interaction klystrons have been conducted. Numerical simulations of the interaction schemes of the electron beam with high frequency fields of the extended resonators have been executed. There were found the W-band klystron interaction schemes, that provide the output power of 120—190 W, gain of 25—32 dB and bandwidth of 150—210 MHz at the anode voltage of 14 kV and beam current of 0,16—0,20 A. Possibility of the bandwidth widening up to 310 MHz have been showed.

PACS: 41.2.-q; 41.75-i

Keywords: klystron, mm-range, power, simulation, calculation, electron beam.

Bibliography — 4 references.

Received 29 September 2009