

# Физическая аппаратура

УДК 621.385.624

## Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона

А. И. Тореев, В. К. Федоров

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

*Приведены конструкция, а также расчетные и экспериментальные характеристики пакетированного пятирезонаторного усилительного клистрона с распределенным взаимодействием, предназначенного для аппаратуры миллиметрового диапазона, в том числе мощных усилительных цепочек с маломощным входным твердотельным генератором. В экспериментальном макете клистрона средневолновой части миллиметрового диапазона при ускоряющем напряжении 18 кВ и токе пучка 0,5 А обеспечивается усиление до 50 дБ, выходная импульсная мощность около 2 кВт, полоса усиления 0,25—0,35 %. Рассмотрены возможности расширения полосы частот.*

### Введение

Многорезонаторные клистроны, в том числе клистроны с распределенным взаимодействием, находят широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники в качестве эффективных усилителей и генераторов миллиметрового диапазона длин волн. При практической реализации приборов приходится учитывать различные требования, вытекающие из их назначения. В работе приведены результаты разработки и экспериментального исследования 5-резонаторного импульсного клистрона с распределенным взаимодействием (КРВ) с большим коэффициентом усиления, перспективного для применения в радиотехнических устройствах средневолновой части миллиметрового диапазона.

### Конструкция прибора

Схематическое изображение экспериментального макета клистрона представлено на рис. 1. Электродинамическая система клистрона выполнена в виде пяти распределенных резонаторов, из которых входной и три промежуточных являются 2-зазорными резонаторами, а выходной — 3-зазорным. Связь между элементарными ячейками в резонаторах осуществляется через щели, расположенные в смежных стенках ячеек (рис. 2). В качестве рабочего вида колебаний был выбран синфазный ( $2\pi$ ) вид, имеющий ряд преимуществ перед другими видами. Он является наиболее низковольтным, что уменьшает опасность возбуждения на паразитных видах колебаний, особенно в импульсном режиме работы прибора, на фронтах импульса напряжения. Существенно также и то, что при синфазном режиме работы может быть

реализована равномерная нагрузка всех элементарных ячеек выходного резонатора и, следовательно, эффективный распределенный отбор высокочастотной (ВЧ) энергии.

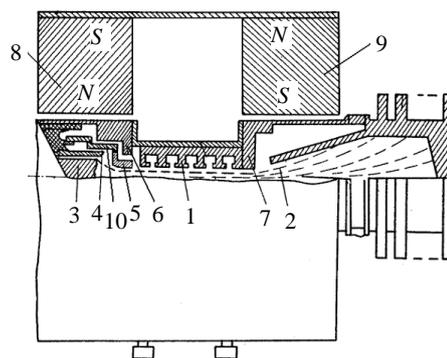


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального макета клистрона:

- 1 — электродинамическая система; 2 — электронный пучок;
- 3 — катод; 4 — фокусирующий электрод; 5 — анод;
- 6, 7 — пушечный и коллекторный полюсные наконечники;
- 8, 9 — пушечный и коллекторный кольцевые магниты;
- 10 — магнитный экран

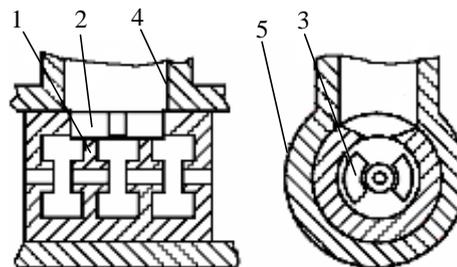


Рис. 2. Выходной распределенный резонатор с распределенным выводом энергии:

- 1 — смежные стенки резонансных ячеек; 2 — окна связи резонатора с выходным волноводом; 3 — щели связи между ячейками; 4 — выходной волновод; 5 — вакуумная оболочка

В экспериментальном макете прибора такой отбор энергии осуществлен с помощью устройства [1], в котором выходной распределенный резонатор выполнен как единое целое с распределенным выводом энергии. Как видно из рис. 2, окна связи распределенного резонатора с выходным волноводом расположены против смежных стенок резонансных ячеек так, что через каждое окно осуществляется одновременно связь с двумя соседними ячейками. Это обеспечивает более равномерную нагрузку всех ячеек распределенного резонатора. Кроме того, наличие дополнительной связи между резонансными ячейками через окна связи (помимо щелей связи) приводит к увеличению частотного интервала между рабочим (синфазным) и соседними видами колебаний и к повышению стабильности распределенно-резонансной системы.

Добротности  $Q$  входного, промежуточных и выходного резонаторов, период  $L$  в каждом распределенном резонаторе, длины дрейфа  $l$  между резонаторами, относительные частотные расстройки  $\Delta f/f_0$  распределенных резонаторов были выбраны на основе расчета схем взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов. В процессе расчетов находили такие значения параметров, при которых достигаются наиболее высокие величины коэффициента усиления при уровнях выходной ВЧ-мощности, КПД и полосы усиления, приемлемых для практического применения.

Расчет проводили при фиксированной общей длине распределенно-резонансной системы, которая ограничивалась заданной осевой протяженностью магнитного фокусирующего поля, создаваемого пакетированными магнитами. Использование кольцевых радиально-намагниченных постоянных магнитов дало возможность реализовать магнитное поле 0,6—0,65 Тл в межполюсном зазоре 25 мм (см. рис. 1). Последнее предопределило также выбор диаметра пролетного канала 0,5 мм, величины тока 0,5 А и ускоряющего напряжения 18 кВ электронного пучка.

### Расчет схемы взаимодействия

Расчет схемы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов клистрона был проведен с использованием разработанной одним из авторов программы расчета в рамках следующей физической модели:

при расчете взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями используется одновидовое приближение;

электронный пучок описывается с помощью дисковой модели, а поле пространственного заряда — суммой временных гармоник Фурье (от 1 до 10). Поперечное распределение ВЧ-поля не учитывается;

структура продольного ВЧ-поля в резонаторах описывается зависимостью  $E_z/W$  ( $E_z$  — продольная компонента напряженности ВЧ-поля на оси пролетного канала,  $W$  — запасенная энергия) от продольной координаты  $z$ , которая определялась экспериментально методом возмущений на крупномасштабных моделях электродинамических систем.

В соответствии с этой физической моделью был реализован алгоритм совместного решения:

уравнения движения:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{e}{m} \operatorname{Re} E_z e^{j\omega t} + E_{qz} ;$$

уравнения возбуждения резонаторов с заданным током [2] в приближении одного вида колебаний:

$$A = \frac{j}{2(\omega - \omega_0)} \frac{1}{N} \int \bar{j} \bar{E} dv$$

и уравнения первой гармоники сгруппированного тока:

$$I_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I e^{j\omega t} d(\omega t),$$

где  $z$  — продольная координата;

$A$  — комплексная амплитуда поля данного вида колебаний;

$\omega_0 = \omega'_0 + j \frac{\omega'_0}{2Q}$  — комплексная резонансная частота;

$Q$  — добротность резонатора;

$N = \frac{2W}{|A|^2}$  — норма данного колебания;

$E_{qz}$  — продольная компонента поля пространственного заряда;

$W$  — запасенная энергия.

Функция распределения продольной компоненты электрического поля на оси резонатора, как показали экспериментальные измерения на моделях, достаточно хорошо описывается суммой

$$\Psi_z = \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{9b_i^4 + 2,5b_i^2 + 1},$$

каждый член которой со-

ответствует полю в  $i$ -м зазоре, где  $a_i$  — относительная амплитуда поля в  $i$ -м зазоре резонатора, нормированная на максимальное значение;

$$b_i = \frac{2(z - z_i)}{l_e},$$

где  $Z_i$  — координата центра  $i$ -го

зазора,  $l_e$  — эффективная протяженность зазора взаимодействия.

Результаты расчета схемы взаимодействия с приведенными в табл. 1 параметрами распределенно-резонансной системы представлены на рис. 3, из которого видно, что при малых уровнях входного сигнала  $P_{in} < 0,02$  Вт коэффициент усиления достигает величины более 50 дБ.

Таблица 1

Параметры	Номер резонатора				
	1	2	3	4	5
Период системы $L$ , мм	1,540	1,503	1,503	1,503	1,100
Число зазоров в резонаторе	2	2	2	2	3
Добротность $Q$	100	600	600	600	170
Частотная расстройка $\Delta f/f$ , %	-0,07	0,03	-0,03	0,14	0,00
Длина дрейфа $l$ , мм	1,40	1,32	1,28	1,28	

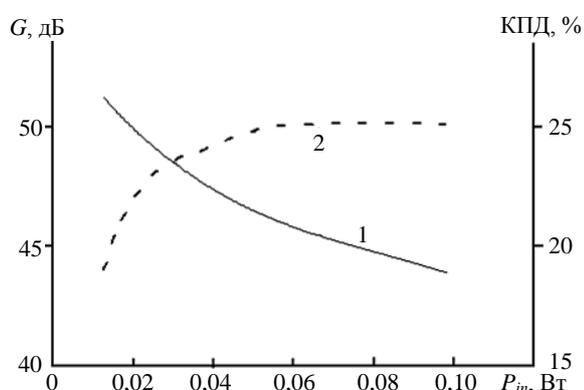


Рис. 3. Расчетные зависимости:

1 — коэффициента усиления  $G$ ; 2 — КПД 5-резонаторного КРВ от уровня входного сигнала  $P_{in}$  при ускоряющем напряжении 18 кВ и токе пучка 0,5 А

В режиме насыщения мощности усиление снижается до ~46 дБ, а КПД возрастает до 25 % уже при  $P_{in} \sim 0,05$  Вт.

Полоса усиливаемых частот, как показали расчеты, увеличивается с ростом входного сигнала, и в режиме насыщения достигает величины 0,3—0,35 %. При этом отмечалась невысокая критичность выходных параметров схемы к частотам настройки промежуточных резонаторов, что на практике имеет большое значение из-за возможных тепловых уходов частоты миниатюрных колебательных систем.

### Технологические особенности изготовления

Полученные результаты были взяты за основу при создании экспериментального макета КРВ. Изготовление макета прибора, его отдельных элементов и систем, а также реализация эксперимента были выполнены с учетом жестких требований, типичных для миллиметрового диапазона. В первую очередь это коснулось изготовления резонансных ячеек и распределенных резонаторов в

целом (см. рис. 2), так как в этом диапазоне их размеры становятся чрезвычайно малыми, а требования к точности исполнения очень высокими. Это потребовало применения высокопрецизионного оборудования, а также отказа от механического контроля размеров в пользу более точного электрического, основанного на измерении собственных резонансных частот элементарных резонаторов.

При разработке прибора большое значение имела тщательная отработка основных элементов и их соосности в электронно-оптической системе (ЭОС), поскольку удельная плотность мощности электронного пучка достигает десятков МВт/см<sup>2</sup>. Попадание даже небольшой доли пучка на миниатюрные элементы резонаторов может привести к их разрушению.

Ввиду очень малого зазора между пучком и пролетным каналом в резонаторах в целях предотвращения заметного токооседания были использованы устройство и способ сборки электронной пушки [3], позволяющие обеспечить соосность пучка с пролетным каналом в пределах 0,02 мм. Возмущающее действие на пучок поперечных компонент магнитного поля в достаточной мере снижалось выбором азимутального положения пушечного и коллекторного постоянных кольцевых магнитов (см. рис. 1). Кроме того, необходимо было по возможности уменьшить влияние и другого фактора, приводящего к возмущению пучка, поскольку в ЭОС разрабатываемого КРВ компрессия пучка достигает ~100 (что обуславливалось практически допустимой величиной плотности токоотбора с катода ~10 А/см<sup>2</sup>), а значение микропервеанса составляет ~0,2. При такой высокой компрессии и малой величине первеанса проявляется влияние начальных поперечных тепловых скоростей электронов, приводящее к образованию теплового ореола пучка и ухудшению его прохождения в пролетном канале. В связи с этим по аналогии с [4] была рассчитана и сконструирована электронная пушка, в которой катод пронизывается оптимальным магнитным потоком, что приводит к заметной нейтрализации возмущающего действия тепловых скоростей электронов и уменьшению распыливания теплового пучка в пролетном канале.

В разработанной пушке (катод имеет диаметр 2,8 и радиус кривизны 3,9 мм) требуемый уровень магнитного поля на катоде составляет 0,005 Тл, при величине магнитного фокусирующего поля 0,65 Тл. Распределение магнитного поля от катода до рабочей области ЭОС (см. рис. 1) было реализовано выбором конфигурации магнитных экранов в соответствии с данными работы [5]. В ЭОС с такой электронной пушкой при токе пучка 0,5 А и ускоряющем напряжении 18 кВ обеспечивались

формирование и транспортировка теплового электронного пучка с расчетным радиусом в пучностях 0,2 мм (при величине токосодержания 99 % в пределах этого радиуса).

### Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования ЭОС показали, что в статическом режиме обеспечивается токопрохождение ~99 % через пролетный канал диаметром 0,5 мм.

Динамические испытания экспериментального макета КРВ проводили в схеме автогенератора с внешней обратной связью в импульсном режиме, при длительностях импульса в интервале 3—10 мкс. В приборе была предусмотрена отдельная регулировка напряжения на аноде электронной пушки и резонансной системе, что позволяло изменять ток и первеанс пучка. В табл. 2 приведены измеренные значения коэффициента усиления  $G$ , полосы усиления  $\Delta f/f_0$  в КРВ с параметрами распределенно-резонансной системы, представленными в табл. 1.

Таблица 2

Уровень входного сигнала $P_{in}$ , Вт	$G$ , дБ	$\Delta f/f_0$ , %	$G$ , дБ	$\Delta f/f_0$ , %
	18 кВ; 0,5 А		18 кВ; 0,25 А	
0,01	50,5	0,18	38,0	0,16
0,02	48,5	0,19	34,5	0,17
0,03	47,0	0,21	32,0	0,18
0,05	45,0	0,25	29,0	0,18
0,10	42,0	0,30	26,0	0,17
0,20	39,5	0,35	25,0	0,17
0,40	36,5	0,25	23,0	0,17

Из табл. 2 видно, что при ускоряющем напряжении 18 кВ и токе 0,5 А достигается коэффициент усиления около 50 дБ при уровне входного сигнала  $P_{in} = 0,01$  Вт и уменьшается до 45 дБ — при 0,05 Вт, а при  $P_{in} = 0,2$  Вт — до 39,5 дБ. В этом интервале изменения величины входного сигнала выходная мощность увеличивается от 1,1 до 1,7 кВт, а полоса усиления (по уровню 3 дБ) возрастает с 0,18 до 0,35 %.

Уменьшение полосы усиления, наблюдаемое при величине входного сигнала более 0,2 Вт, сопровождается появлением изрезанности амплитудно-частотной характеристики, что, по-видимому, связано с разгруппировкой пучка. Экспериментальные измерения показали достаточно высокую устойчивость характеристик прибора к изменению условий динамических испытаний: в широком интервале ускоряющих напряжений, тока пучка, длительностей импульса, уровня входного сигнала не наблюдалось резких изменений выходных характеристик, а также возникновения самовозбуждения. Достигнутые эксперименталь-

ные значения коэффициента усиления, КПД и выходной мощности позволяют считать разработанный КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона перспективным для использования в качестве мощного усилителя, с выходной импульсной мощностью более киловатта при входном сигнале 15—20 мВт от маломощного твердотельного генератора.

Также были рассмотрены возможности расширения полосы усиления. Как известно, величина первеанса электронного пучка оказывает существенное влияние на ширину полосы усиления. Так, в разработанном клистроне уменьшение первеанса в два раза (ток пучка уменьшался от 0,5 до 0,25 А) привело к уменьшению полосы усиления от 0,35 до 0,17 % (см. табл. 2). Если предположить такую зависимость, то можно ожидать значительное расширение полосы усиления за счет увеличения в этой ЭОС тока пучка.

Опыт разработки ЭОС, используемой в этом КРВ, и предварительные испытания в статическом режиме показали, что при тех же ускоряющих напряжениях и магнитном фокусирующем поле 0,75 Тл может быть обеспечено формирование электронного пучка с током 0,6—0,7 А, что должно привести к расширению полосы усиления при тех же энергетических характеристиках КРВ. Однако решение такой задачи в значительной мере затрудняется нарастающим влиянием динамической расфокусировки при увеличении тока пучка. Так, например, в рассмотренном эксперименте (см. табл. 2) при токе пучка 0,25 А динамическая расфокусировка приводит к увеличению токооседания до 3—4 % (по сравнению с 1 % в статическом режиме), а при токе пучка 0,5 А, соответственно, — к увеличению токооседания до 15 % и более.

Снижения уровня токооседания в динамическом режиме, по-видимому, можно добиться не только простым увеличением магнитного фокусирующего поля, но и за счет снижения влияния различных возмущающих факторов, таких как неоднородности магнитного поля, несоосности, тепловые скорости электронов, условия взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями и т. д.

### Заключение

Полученные экспериментальные результаты подтвердили теоретические исследования по возможности создания и практической реализации пакетированного усилительного КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона с коэффициентом усиления до 50 дБ, полосой усиления до 0,35 % и выходной импульсной мощностью до 2,0 кВт при ускоряющем напряжении 18 кВ и токе пучка 0,5 А.

Разработанный КРВ перспективен для использования в усилительной цепочке в качестве как выходного каскада с входным маломощным (сотые доли Вт) генератором, так и самостоятельного миллиметрового генератора с внешней обратной связью.

Были рассмотрены возможности расширения рабочей полосы усиления без ухудшения энергетических характеристик прибора.

#### Л и т е р а т у р а

1. А. с. 1529995 РФ. Резонаторная система с распределенным взаимодействием СВЧ-прибора "О" типа/ Андрушке-

вич В. С., Тореев А. И., Федоров В. К., Собянина Е. В.// Б. И. 1993. № 47. 48. С. 189.

2. *Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Советское радио, 1973.

3. А. с. 1561741 РФ. Электронная пушка/ Тореев А. И., Собянина Е. В., Патрушева Е. В., Фалькенгоф А. Е.// Б. И. 1993. № 47. 48. С. 189—190.

4. *Гамаюнов Ю. Г., Тореев А. И., Патрушева Е. В.* Влияние прикатодных условий на возмущение и предельное сжатие интенсивных электронных пучков при наличии начальных тепловых скоростей электронов// Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 5. С. 593—595.

5. А. с. 1426331 РФ. Магнитная фокусирующая система для СВЧ-прибора/ Тореев А. И., Явчуновский В. Я., Шемчик С. В. и др.// Б. И. 1993. № 41, 42. С. 218.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2008 г.

## Millimeter-wave extended interaction amplifier klystron

A. I. Toreev, V. K. Fedorov  
Saratov State University, Saratov, Russia

*Design, and also calculated and experimental characteristics of the packaged five-resonator pulsed extended interaction klystron amplifier, targeted for use in the millimeter wave apparatus including – in power amplifier chains with input low-power solid oscillator, are presented. In the experimental model of V-band klystron, the gain value to 50 dB, pulsed power about 2 kW and relative bandwidths (3 dB) of 0.25—0.35 % at the beam voltage 18 kV and beam current 0.5 A are provided. Possibilities of the klystron bandwidth widening are considered.*

УДК 621.385.833

## Компьютерный анализ характеристик электронно-оптической системы широкоформатного электронно-оптического преобразователя с электростатической фокусировкой и быстрой разверткой изображения

И. В. Балашов, А. Б. Костин, Ю. К. Славнов  
ФГУП "НИИ импульсной техники", Москва, Россия

В. И. Креопалов, Ю. В. Куликов  
Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет), Москва, Россия

*Приведены результаты компьютерного анализа характеристик электронно-оптической системы (ЭОС) с электростатической фокусировкой, предназначенной для использования в широкоформатном электронно-оптическом преобразователе (ЭОП) с временным разрешением порядка 1 пс по всему рабочему полю вдоль пространственной оси. Полученные результаты могут быть полезными при создании систем высокоскоростной фотохронографии.*

#### Введение

Одним из основных элементов систем высокоскоростной фотохронографии, определяющим их пространственно-временные характеристики (вре-

менное разрешение, информационную емкость изображения и т. д.), является ЭОП.

Наряду с задачей повышения временного разрешения систем высокоскоростной фотохронографии не менее актуальным является существен-