

На правах рукописи



Манжосин Михаил Алексеевич

**УЛУЧШЕНИЕ РЕЖИМОВ МНОГОМОДОВОГО УСИЛЕНИЯ В
НИЗКОВОЛЬТНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНАХ Ku И K-
ДИАПАЗОНОВ**

2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2024

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Алмаз» (АО «НПП «Алмаз») г. Саратов.

Научный руководитель:	Царев Владислав Алексеевич , доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов
Официальные оппоненты:	Григорьев Андрей Дмитриевич , доктор технических наук, профессор кафедры микроволновой электроники - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург Парамонов Юрий Николаевич , кандидат технических наук, заместитель генерального директора – директор по научной работе Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Торий», г. Москва
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г. Москва

Защита диссертации состоится «11» февраля 2025 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «__»_____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.02
доктор физико-технических наук,

доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности.

Исследования, направленные на изучение многомодовых режимов работы импульсных низковольтных многолучевых клистронов (НМЛК), являются перспективными для улучшения комплекса выходных параметров при работе этих приборов в коротковолновой части СВЧ диапазона. При величине ускоряющего напряжения от 2,5 до 3,5 кВ реализуемая ширина полосы рабочих частот НМЛК в Ку-диапазоне обычно составляет 100-200 МГц при коэффициенте усиления около 30-40 дБ, выходной мощности не менее 400 Вт и КПД порядка 20-30%.

Значительный вклад в исследование и разработку малогабаритных НМЛК, не имеющих в настоящее время зарубежных аналогов, внесли отечественные ученые: А.Н. Королев, Э.А. Гельвич, А.Д. Закурдаев, Е.В. Жарый, С.С. Зырин, В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков, М.С. Востров и другие.

Продвижение приборов данного класса в диапазоны частот выше 18 ГГц затруднено по ряду причин, связанных с уменьшением размеров резонаторов и, соответственно, количества электронных пучков. При этом уменьшается импеданс взаимодействия, что приводит к значительному ухудшению выходных параметров НМЛК. Для решения этой проблемы становятся актуальными теоретические и экспериментальные исследования, направленные на создание и разработку многомодовых резонаторов, которые могут использоваться, как для повышения КПД и формирования широкой полосы пропускания, так и для создания многофункциональных устройств, работающих одновременно в нескольких частотных диапазонах. Однако многомодовые режимы взаимодействия в НМЛК мало исследованы, а их оптимизация при использовании 3D численного моделирования чрезвычайно трудоемка.

Результаты диссертационной работы направлены на поиск нетрадиционных механизмов группирования и отбора энергии от модулированных многолучевых электронных потоков, связанных с использованием для этих целей многомодового усиления и разработкой новых конструкций широкополосных активных и пассивных резонансных систем, включая системы с использованием металлокерамических резонаторов.

Целью диссертационной работы является улучшение комплекса параметров процесса многомодового взаимодействия многолучевого потока с электромагнитным полем в НМЛК Ку и К - диапазонов для расширения полосы усиления до 300 МГц при выходной мощности не менее 400 Вт и повышения КПД до 40-50%, без увеличения их габаритов и массы.

Основные задачи диссертационного исследования.

1) Проведение аналитического обзора научно-технической литературы по современному состоянию и проблемам дальнейшего развития широкополосных

многолучевых клистронов с использованием режимов многомодового взаимодействия.

2) Разработка методики проектирования НМЛК с улучшенным комплексом выходных параметров на основе пакета прикладных программ разного уровня.

3) Определение на основе проведенных расчетов оптимальной схемы группирователя, обеспечивающей высокий электронный КПД прибора при сохранении широкой полосы усиления и массогабаритных параметров в Ku и K - диапазонах.

4) Теоретические и экспериментальные исследования, направленные на определение оптимальных режимов взаимодействия для эффективного отбора энергии и управления формой АЧХ в НМЛК, содержащего на входе и выходе систему двух связанных активных однозачерных резонаторов и гибридную фильтровую многомодовую систему, образованную металлокерамическим выводом энергии и пассивным резонатором в волноводе вывода энергии.

5) Теоретические и экспериментальные исследования режимов самовозбуждения в многорезонаторных НМЛК, работающих в Ku и K - диапазонах, и выработка рекомендаций для устранения этих режимов в широкополосных усилительных приборах.

Научная новизна работы.

1) На основе результатов трехмерного численного моделирования, полученных с использованием программы «CST Studio Suit», найдено приближенное аналитическое выражение, позволяющее (с погрешностью не более 1,5%) пересчитать размеры, полученные для случая сеточных зазоров с разными длинами на эквивалентные размеры бессеточных зазоров при условии равенства коэффициентов взаимодействия для каждого сеточного зазора и усредненных по радиусу луча коэффициентов взаимодействия соответствующих бессеточных зазоров резонаторов.

2) С помощью теории подобия предложена уточненная (имеющая погрешность не более 3%) методика приближенного расчета основных электродинамических параметров призматических многоканальных резонаторов, позволяющая при численном моделировании ускорить процесс выбора оптимальной конструкции путем перехода от трудоемкой 3D модели исходного резонатора к более простой двумерной модели эквивалентного цилиндрического резонатора с одинаковыми волновым сопротивлением и торцевой емкостью.

3) Теоретически и экспериментально обоснованы преимущества использования на выходе НМЛК двухзачерных призматических резонаторов с неравными длинами зазоров, возбуждаемых во второй зоне усиления, которая характеризуется увеличенными (примерно в два раза), по сравнению с традиционно используемыми, углами пролета между центрами зазоров, что обеспечивает

дополнительные возможности для увеличения КПД (примерно на 3-5%) и повышения устойчивости к тепловым нагрузкам.

4) Подтверждена возможность повышения электронного КПД в шестирезонаторном 19-ти лучевом НМЛК Ku - диапазона, примерно на 15-16%, за счет использования удлиненной трубы между 4 и 5 резонатором, инверсии частот этих резонаторов, оптимального выбора параметра пространственного заряда и применения двухззорной выходной резонансной системы с неравными длинами зазоров, уменьшающимися по ходу электронного потока.

5) Определены частотные расстройки многомодовой выходной резонаторной системы, установленной на выходе шестирезонаторного НМЛК, требуемые для реализации широкополосного усиления (с полосой около 300 МГц) в Ku и K - диапазонах.

6) Показано, что благодаря выбору оптимального угла наклона уголкового пассивного резонатора, установленного в волноводе вывода энергии, можно обеспечить эффективную передачу энергии электромагнитных волн из выходного активного резонатора в выходной СВЧ тракт с заданным коэффициентом передачи во всем рабочем диапазоне НМЛК.

7) Установлено, что наибольшая вероятность паразитного самовозбуждения при использовании системы двух связанных через щель призматических резонаторов, возбуждаемых в двухмодовом режиме, имеет π - вид колебаний. На основании проведенных экспериментов с двумя моделями НМЛК K - диапазона, получены аппроксимационные соотношения для расчета углов пролета между центрами зазоров, при которых возможно возникновение монотронных колебаний на первой и второй зонах возбуждения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1) Впервые теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность эффективного взаимодействия с многолучевым электронным потоком противофазного (основная мода) и синфазного (высшая мода) видов колебаний металлокерамического резонатора вывода энергии, что позволяет активно управлять формой АЧХ с помощью настроечных стержней, расположенных вне вакуумной части выходного волновода, без изменения массы и габаритов НМЛК и нарушения вакуума.

2) Практическая значимость заключается в расширении функциональных возможностей аппаратуры радиосвязи, в которой используются миниатюрные многолучевые клистроны. Практическую значимость подтверждают также разработанные автором рекомендации для модернизации резонаторной системы и вывода энергии низковольтного МЛК Ku и K-диапазонов, реализация которых позволяет существенно расширить полосу усиления без увеличения массы и габаритов, с сохранением выходной мощности на уровне 300-500 Вт, что обеспечивает повышение энергоэффективности систем радиосвязи.

3) На производственных мощностях АО "НПП "Алмаз" разработаны перспективные экспериментальные образцы НМЛК К-диапазона, которые могут быть использованы в качестве научного задела при проведении научно-исследовательских работ по освоению приборами этого класса новых частотных диапазонов (акт внедрения). Результаты, полученные в диссертационной работе, были использованы при выполнении гранта в рамках Всероссийского инновационного конкурса «УМНИК-2017», победителем которого является автор.

4) Разработанные макеты резонаторных систем могут использоваться в качестве учебного пособия при прохождении производственной практики студентами кафедры «Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А., а также при выполнении практических работ по дисциплине «Проектирование и технология электронной компонентной базы», изучаемой в рамках направления «11.03.04 Электроника и нанoeлектроника» (акт об использовании).

Методы исследования и достоверность результатов.

Поставленные в работе задачи были решены с использованием комплекса современных программ, включая программы трехмерного и двухмерного электродинамического моделирования «CST Studio Suit», «Азимут», а также одномерных программ моделирования процесса взаимодействия в клистроне, основанных на дисковых моделях, таких как «AJDISK». Достоверность теоретических результатов обеспечивалась корректным использованием математического аппарата, основанного на уравнениях электровакуумной СВЧ электроники и законах электродинамики; а также сравнением с известными расчетными и экспериментальными данными, приведенными в отечественных и зарубежных публикациях по многолучевым клистроном. Достоверность результатов эксперимента обеспечивалась использованием современного измерительного и испытательного оборудования, имеющегося на предприятии АО «НПП «Алмаз» г. Саратов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Повышение электронного КПД в 1,36 раза (с 43,3% до 59,2%) в НМЛК Ку-диапазона достигается формированием в выходном резонаторе слетающего электронного сгустка с минимальным разбросом скоростей, при выборе отстройки резонансных частот резонаторов Δf_m относительно центральной рабочей частоты f_0 из следующих приближенных соотношений:

$$\frac{\Delta f_m}{\Delta f_0} = K_m,$$

где $m=1..6$ – номер резонатора, $K_1=-0,01$, $K_2=-0,59$, $K_3=1,57$, $K_4=1,91$, $K_5=0,806$, $K_6=0$; $\Delta f_0 = \frac{f_0}{2Q_n}$ – полуширина полосы пропускания, измеренная по уровню половинной мощности; Q_n – нагруженная добротность выходного резонатора.

2) Применение на входе и выходе НМЛК четырехзвенной гибридной многомодовой фильтровой системы позволяет расширить полосу рабочих частот в 2,6 раза (со 120 МГц до 310 МГц) или же осуществлять его работу в двух близко расположенных полосах усиления с возможностью активного управления формой АЧХ без изменения массогабаритных параметров.

3) Для исключения самовозбуждения в НМЛК Ку-диапазона, имеющего на входе колебательную систему, состоящую из двух связанных через щель однозачорных резонаторов, возбуждаемых одновременно на π и 2π -виде колебаний, следует избегать режимов, при которых угол пролета между центрами зазоров на π -виде колебаний имеет следующие экспериментально определенные значения:

$$\theta_s = 2\pi (m + 0,2),$$

где $m=1$ – номер первой зоны генерации.

Личный вклад автора. Представленные результаты расчетов и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно под контролем научного руководителя работы. В работах, выполненных с соавторами, ему принадлежат: результаты проведенных расчетов на ЭВМ, результаты «холодных» измерений резонансных систем и результаты динамических испытаний НМЛК. Автор принимал непосредственное участие в обработке и интерпретации теоретических и экспериментальных данных, формулировке научных положений и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 научно-технических конференциях, 2-х семинарах и 1 конкурсе: Юбилейной научно-технической конференции «Электронные приборы и устройства СВЧ», посвященной празднованию 60-летия АО «НПП «Исток» (Фрязино, 2013); Юбилейной научно-технической конференции «Электронные приборы и устройства СВЧ», посвященной празднованию 60-летия АО «НПП «Алмаз» (Саратов, 2017); XXX международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-30» (Саратов, 2017); XVII международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ (Саратов, 2018); Юбилейной научно-технической конференции «Мощные вакуумные СВЧ приборы - 2019», посвященной празднованию 60-летия АО «НПП «Торий» (Москва, 2019); XIV международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, 2020); Всероссийском инновационном конкурсе «УМНИК-2017» (Саратов, 2017); XXI координационном научно-техническом семинаре по СВЧ технике, 60-лет АО «НПП «Салют», (Нижегородская область п. Хахалы, 2021); Юбилейной научно-технической конференции «Электронные приборы и устройства СВЧ», посвященной празднованию 65-летия АО «НПП «Алмаз» (Саратов, 2022); XIII

Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2024).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, из них 3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 работы в единой реферативной базе данных Scopus и Web of Science и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и собственных работ автора. Материалы диссертации изложены на 138 страницах, содержат 86 рисунков, 17 таблиц, 3 приложения и список использованной информации из 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность диссертационной работы, определены степень разработанности, цели, задачи и методологическая основа исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также отмечен личный вклад автора, приведены данные об апробации и внедрении результатов работы, сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе приведены результаты обзора научно-технической литературы по современному состоянию и проблемам дальнейшего развития низковольтных многолучевых клистронов. Рассмотрены особенности их конструкции, принцип действия, режимы работы, схемы настройки, основные достигнутые в настоящее время параметры и технические характеристики. Отмечено, что одним из путей дальнейшего улучшения выходных параметров НМЛК (расширение полосы и увеличение коэффициента усиления) при сохранении неизменными массогабаритных характеристик является применение многозвенных фильтровых систем на входе и выходе прибора. Для создания данной системы не исключается и такой радикальный путь, как использование новых механизмов генерации и усиления электромагнитных волн электронными потоками, связанных с использованием для этих целей многомодовых режимов взаимодействия с использованием металлокерамических резонаторов. Однако вопросы многомодового взаимодействия, также, как и вопросы возникновения паразитных автоколебаний в этих системах, в настоящее время практически не изучены.

Вторая глава посвящена разработке усовершенствованных математических моделей и методик расчета комплекса электронных и электродинамических параметров резонаторов и выходных параметров НМЛК.

На основе результатов численного 3D решения задачи определения эффективности процесса взаимодействия многолучевого электронного потока с

СВЧ полем были найдены простые аналитические выражения, позволяющие с погрешностью не более 1,5% (рисунки 1а и 1б), определить, при равных коэффициентах эффективности взаимодействия M , условия перехода от резонатора с идеальным сеточным зазором с длиной d_s к реальной конструкции этого резонатора с относительной длиной бессеточного зазора d/a и коэффициентом заполнения канала пучком b/a .

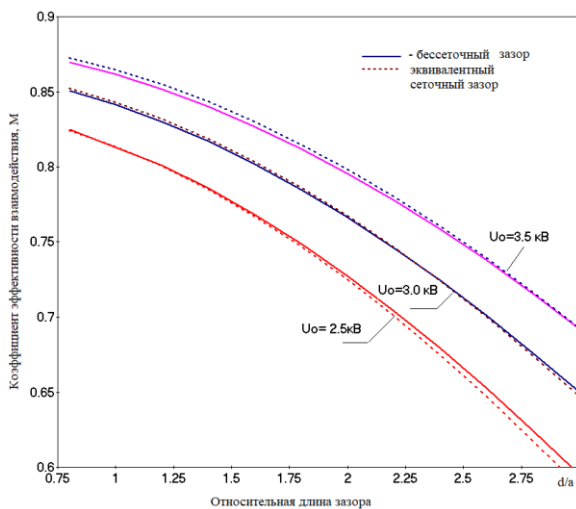
Универсальная зависимость, описывающая связь между длинами сеточного и бессеточного зазоров имеет следующий вид:

$$\gamma d_s \cong \frac{b}{a \sqrt{\left[1 + \left(3.6 + 0.1 (d/a) / \left(\frac{d}{a}\right)^2\right)\right]}} \quad (1)$$

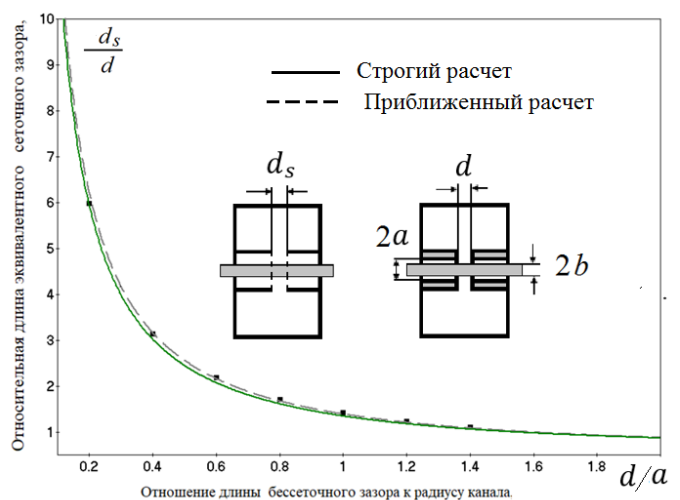
С помощью этого приближенного соотношения по известным формулам определены условия перехода от эквивалентного двойного сеточного зазора к резонатору с бессеточными зазорами разной длины. В результате проведенных расчетов было показано, что для получения максимальной эффективности преобразования энергии в выходном двухмодовом двухзазорном бессеточном резонаторе, целесообразно переходить к режиму взаимодействия во второй зоне усиления (рисунок 1в). Эта зона определяется величиной угла пролета между центрами двух несимметричных зазоров, который для основного 2π -вида колебаний примерно в два раза превышает угол пролета для первой зоны усиления, которая обычно используется на практике:

$$\theta_s = \gamma S / 2\pi = 1,98 \div 2, \quad (2)$$

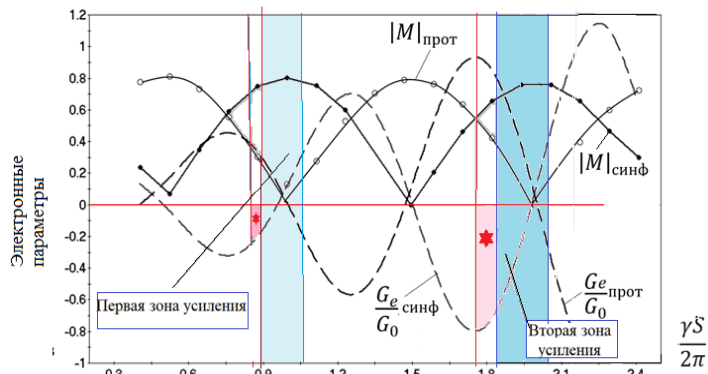
где γ — постоянная распространения пучка.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – а) Зависимости коэффициента взаимодействия M бессеточного зазора от относительной длины зазора для разных величин ускоряющего напряжения; б) Универсальная зависимость, описывающая связь между длинами сеточного и бессеточного зазоров при $\frac{b}{a} = 0.62$; в) Зависимости электронных параметров двухзазорного резонатора (M и Ge/G_0) от нормированного угла пролета между центрами зазоров $\theta_s = \gamma S / 2\pi$ для противофазного и синфазного видов колебаний

В качестве основного рабочего вида колебаний необходимо выбрать 2π -моду, а в качестве дополнительного резонатора для расширения полосы следует использовать резонанс на π -моду. При этом длины двух несимметричных зазоров должны быть выбраны так, чтобы угол пролета второго зазора γd_2 был бы в 1,15-1,2 раза меньше, чем угол пролета первого зазора $\gamma d_1 = 1,12$ рад. При этом необходимо, чтобы работа клистрона была стабильна ($Ge/G_{0\text{ прот}} > 0$ для противофазного вида колебаний) по всему рабочему диапазону частот (рисунок 1в).

Так как эффективность клистрона зависит не только от оптимального выбора выходной резонансной системы, но и от характеристик группирователя, то в настоящей работе был осуществлен поиск оптимальной схемы настройки резонансных частот группирователя 6-ти резонаторного НМЛК, работающего в коротковолновой части СВЧ диапазона. В результате расчета с помощью одномерной программы «DISKLY» и дальнейшего экспериментального подтверждения установлено, что для повышения электронного КПД в 1,36 раза (с 43,3% до 59,2%) можно сформировать в выходном резонаторе слетающийся электронный сгусток с минимальным разбросом скоростей. Для этого необходимо выбирать отстройки резонансных частот резонаторов Δf_m относительно центральной рабочей частоты f_0 , исходя из следующих приближенных соотношений:

$$\frac{\Delta f_m}{\Delta f_0} = K_m, \quad (3)$$

где $m=1...6$ – номер резонатора, $K_1=-0,01$, $K_2=-0,59$, $K_3=1,57$, $K_4=1,91$, $K_5=0,806$, $K_6=0$; $\Delta f_0 = \frac{f_0}{2Q_H}$ – полуширина полосы пропускания, измеренная по уровню половинной мощности; Q_H – нагруженная добротность выходного резонатора.

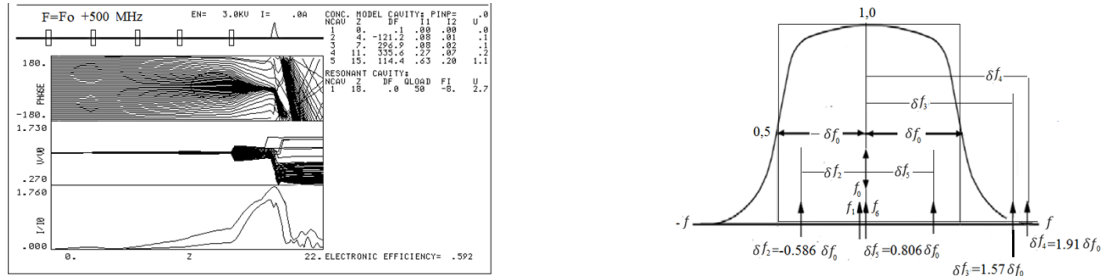


Рисунок 2 – Результаты расчета по программе "DISKLY"

На рисунке 2 приведен пример расчета НМЛК по программе DISKLY и оптимальная схема настройки резонаторов. В результате расчетов были определены физические факторы, необходимые для повышения электронного КПД. Экспериментально подтверждено, что при работе на второй зоне усиления с найденными оптимальными параметрами несимметричного двойного зазора и при правильной частотной расстройке резонаторов предельное значение электронного КПД возросло в 1,36 раза или на 15,9% с 43,3% до 59,2%.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию многомодового режима усиления работы НМЛК модернизированных конструкций K_u и K - диапазонов, изготовленных в АО «НПП «Алмаз» г. Саратов. Дано подробное описание установок для измерения параметров экспериментальных образцов НМЛК, приведена структурная схема, описан принцип работы НМЛК модернизированной конструкции, приведены параметры режима, представлены результаты расчетов и экспериментального исследования режимов нелинейного взаимодействия НМЛК, работающего в K_u -диапазоне частот.

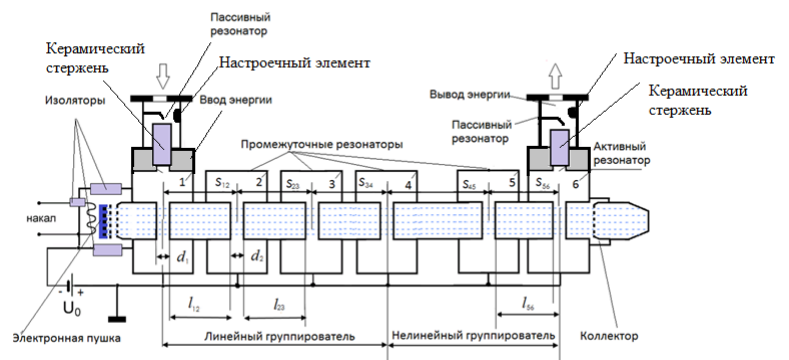


Рисунок 3 – Лабораторный образец НМЛК и его структурная схема

Для выравнивания нагруженных добротностей фильтровой системы, состоящей из связанных между собой выходного 1 и предвыходного 2 резонаторов, в диафрагме 3, разделяющей между собой эти резонаторы и волновод вывода энергии 4, выполнены две резонансные щели связи, максимальные размеры которых примерно равны диаметру диэлектрического стержня (рисунок 4). При этом щель связи 5 с большей площадью поперечного сечения, примыкающая к центру зазора предвыходного резонатора, имеет форму эллипса, большая ось которого ориентирована в перпендикулярном направлении по отношению к линии, проходящей через центры зазоров.

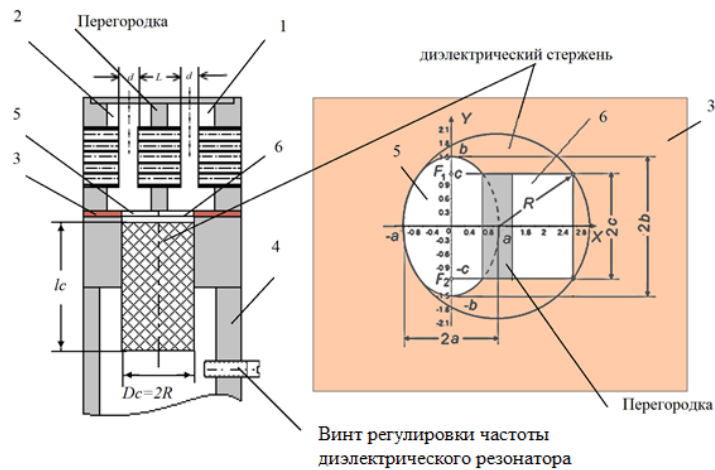


Рисунок 4 – Внешний вид выходной резонансной системы и форма поперечного сечения щелей связи

Щель связи 6, с меньшей площадью, примыкающая к центру зазора выходного резонатора, имеет форму прямоугольника, причем размеры этих щелей выбраны из следующих соотношений, определенных экспериментальным путем:

$$\frac{b}{R} = 0.75 \div 0.76; \frac{a}{R} = 0.5 \div 0.52; \frac{c}{R} = 0.565 \div 0.57; 0.878 \leq \frac{L_{max}}{2R} \leq 0.925, \quad (4)$$

где b - большая полуось эллипса, a - малая полуось, c - половина фокусного расстояния, L_{max} - продольный размер щели, R - радиус диэлектрического стержня.

Изменяя в небольших пределах размеры этих щелей можно выравнивать нагруженные добротности системы связанных резонаторов и, тем самым, уменьшать неравномерность АЧХ в полосе усиления. Благодаря оптимальной форме и размерам щели связи, а также уголкового пассивного резонатора, подобранным экспериментальным путем, происходит эффективная передача электромагнитных волн из выходного активного резонатора через узел вывода энергии в выходной СВЧ-тракт с заданным коэффициентом передачи во всем рабочем диапазоне НМЛК.

На рисунке 5 показаны, полученные помощью программы CST, картины распределения электрического поля в гибридной выходной фильтровой системе,

построенной по схеме: [(активный резонатор на 2π -виде + активный резонатор на π -виде) + (активный керамический резонатор на π -виде)].

На рисунке 6а представлены амплитудно-частотные характеристики НМЛК Ку-диапазона. В первом варианте настройки выходной фильтровой системы резонансная частота диэлектрического стержня в выводе энергии f_c , с помощью настроечного винта, показанного на рисунке 4, механически (или электрически) может быть настроена на любую рабочую частоту, находящуюся в полосе усиления. В этом случае возможен режим работы клистрона в двух, близко расположенных полосах усиления 93,4 МГц и 131 МГц. При другом варианте настройки (рисунок 6б) частота пассивного резонатора f_n установлена на нижней границе полосы усиления. В этом случае реализуется однополосный режим усиления с широкой полосой усиливаемых частот 314 МГц. Двухполосный режим работы НМЛК был детально экспериментально обследован. В этом режиме были получены следующие результаты: контурный КПД - 85,4%, электронный КПД - 35% и полный КПД - около 29%. Выходная импульсная мощность при этом составляет 524,7 Вт.

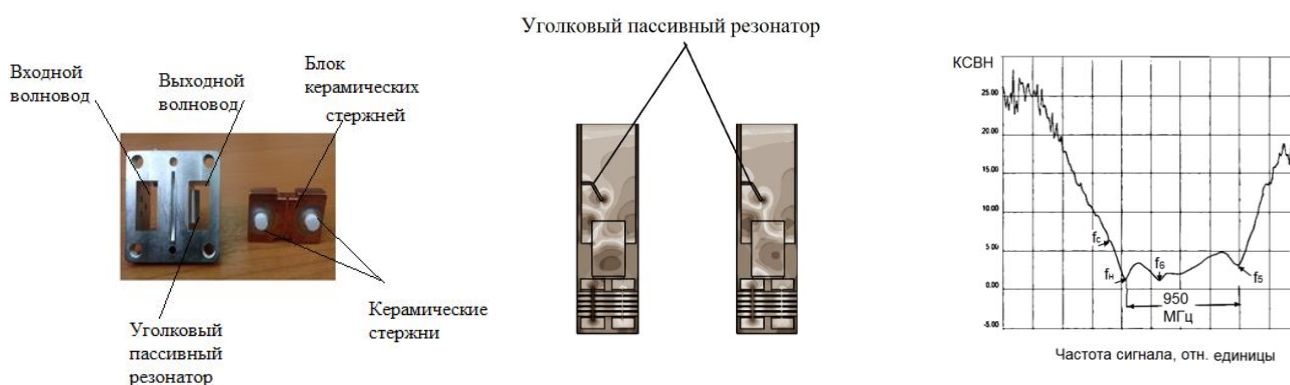


Рисунок 5 – Конструкция ввода и вывода энергии, распределение электрического поля разных мод колебаний в гибридной выходной фильтровой системе: π -мода (керамика $-f_c/f_0=0,991$, $Q_0=2380$); 2π -мода двухзачорного активного резонатора (рабочая $-f_6/f_0=1$, $Q_0=1795$); и настройка фильтровой системы на "холодных" испытаниях

Для модернизированного НМЛК, работающего в К-диапазоне частот (рисунок 7а), были изменены размеры труб дрейфа, с тем чтобы повысить коэффициент усиления прибора на нижней границе полосы усиления. Кроме того, были изменены размеры керамического резонатора для обеспечения возбуждения керамического резонатора на высшем (синфазном виде) колебаний.

Установлено, что в НМЛК К-диапазона с модернизированной фильтровой системой можно также, как и в Ку-диапазоне, осуществить эффективное взаимодействие керамического резонатора с многолучевым электронным потоком. При этом можно управлять формой АЧХ за счет настройки высшего (синфазного) вида колебаний керамического резонатора на правый склон АЧХ.

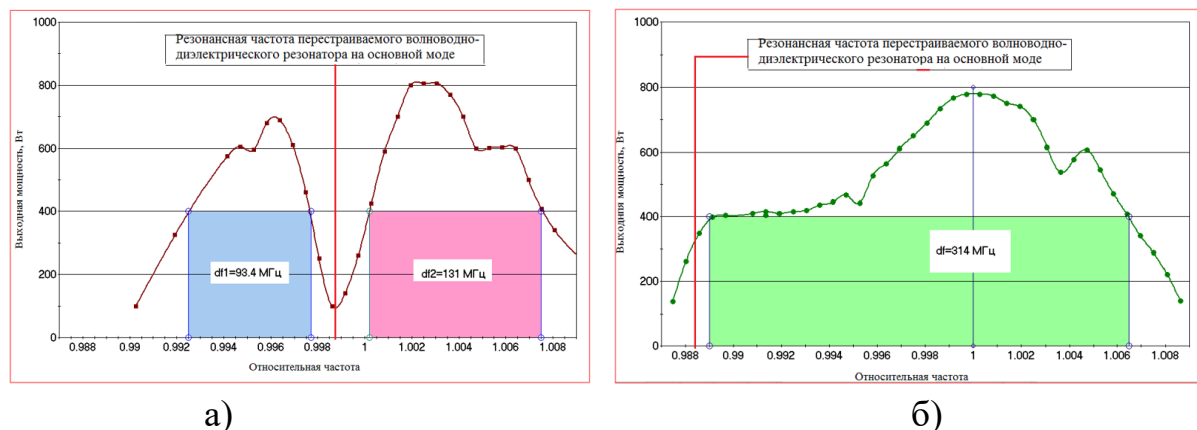


Рисунок 6 – АЧХ НМЛК Ku-диапазона: а) двухполосный режим, f_c находится в центре АЧХ; б) широкополосный режим, f_c настроена на левый склон АЧХ

Начальная рабочая частота этого вида зависит от длины и диаметра керамического стержня и может управляться с помощью настроечных винтов, расположенных в волноводе вывода энергии. При этом удастся расширить полосу частот прибора в сторону высоких частот до 270 МГц при $P_{\text{вых}}$ не менее 400 Вт.

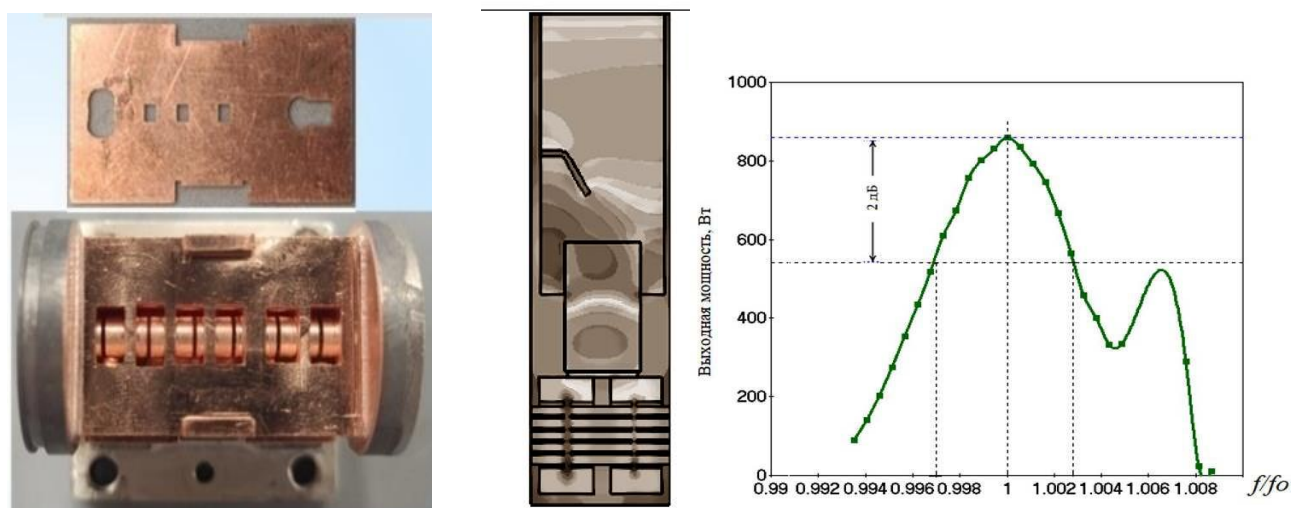


Рисунок 7 –Модернизированная резонансная система прибора К-диапазона, распределение электрического поля в зазорах резонатора для гибридной выходной фильтровой системы (2π -мода (керамика) - $f/f_0=1,04$, $Q_0=4279$) и АЧХ модернизированной конструкции НМЛК К-диапазона

Таким образом впервые показано, что применение на входе и выходе НМЛК четырехзвенной гибридной многомодовой фильтровой системы, состоящей из уголкового пассивного резонатора, установленного в выходном волноводе, двухзазорного активного резонатора, в котором для расширения полосы, при работе на основной 2π -моды, используется резонанс на π -моды, а также резонансы первой или второй резонансных мод керамического стержня в выводе энергии, позволяет расширить полосу рабочих частот в 2,6 раза (с 120 МГц до 310 МГц) или

осуществлять его работу в двух близкорасположенных полосах усиления с возможностью активного управления формой АЧХ без изменения массогабаритных параметров.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования работы НМЛК в режиме самовозбуждения. Исследованы конструкции НМЛК Ку-диапазона с шестью и десятью резонаторами, представленные на рисунке 8. Оба прибора имеют одинаковую полную длину пространства взаимодействия. В 10-ти резонаторном приборе первый и второй, третий и четвертый, пятый и шестой, седьмой и восьмой, девятый и десятый резонаторы попарно связаны между собой через диафрагму. Проведенные эксперименты показали, что при использовании двухзазорных резонаторов с неравными длинами зазоров наиболее вероятно самовозбуждение входной резонансной системы, состоящей из связанных первого и второго резонаторов на противофазном виде колебаний. Возникающая в таком автогенераторе СВЧ мощность поступает через металлокерамический ввод энергии и прямоугольный волновод в согласованную нагрузку, которой является возбудитель прибора. Это может привести не только к нарушению усилительного режима работы, но и к выходу НМЛК из строя за счет потери им герметичности. Поэтому при конструировании многорезонаторной системы многолучевых клистронов Ку и К-диапазонов, следует избегать рабочих режимов, при которых наиболее вероятно возбуждение паразитных колебаний π -вида на первой или второй зонах генерации.



Рисунок 8 – 6-ти и 10-ти резонаторные системы исследуемых моделей НМЛК

Экспериментально установлено, что необходимое для возникновения автогенерации условие баланса амплитуд выполняется при токе катода около 0,12 А, а условие баланса фаз выполняется, если угол пролета между центрами зазоров имеет следующие экспериментально определенные значения при разных зонах генерации:

$$\theta_{sn} = 2\pi (m + 1/5), \quad (5)$$

где $n=6$ - общее число резонаторов в клистроне; $m=2$ - номер зоны генерации.

$$\theta_{sn} = 2\pi (m + 1/6,45), \quad (6)$$

где $n=10$ - общее число резонаторов в клистроне; $m=1$ - номер зоны генерации.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что для исключения самовозбуждения в НМЛК Ку-диапазона, имеющего на входе колебательную систему, состоящую из двух связанных через щель однозачорных резонаторов, возбуждаемых одновременно на π и 2π -виде колебаний, следует избегать режимов, при которых угол пролета между центрами зазоров на π -виде колебаний имеет следующие экспериментально определенные значения:

$$\theta_s = 2\pi (m+0,2), \quad (7)$$

где $m=1$ – номер первой зоны генерации.

Эффективность механизма автогенерации на первой зоне при 10-резонаторной схеме может быть достаточно высокой. Она может достигать при оптимально подобранных длинах зазоров резонатора, величине ускоряющего напряжения (2,6 кВ) и парциального микропервеанса луча (0,35 мкА/В^{3/2}) значений электронного КПД около 35% (рисунок 9а). На рисунке 9б показана зависимость электронной перестройки частоты от величины ускоряющего напряжения. На этом рисунке обозначены: 1 - зависимость нормированной выходной мощности от напряжения; 2 - зависимость коэффициента взаимодействия на противофазном виде колебаний от ускоряющего напряжения; 3 - зависимость ухода частоты от ускоряющего напряжения; 4 - зависимость относительной активной составляющей электронной проводимости от ускоряющего напряжения; 5 - зависимость относительной реактивной составляющей проводимости от ускоряющего напряжения.

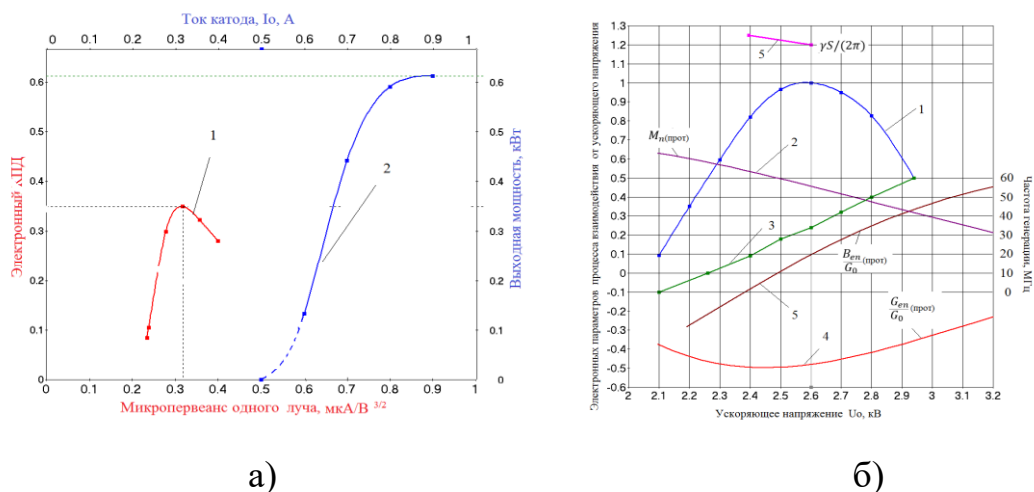


Рисунок 9 – Результаты экспериментального исследования автогенератора на основе входной резонансной системы, состоящей из связанных первого и второго резонаторов, возбуждаемой на противофазном виде

Такой автогенератор при изменении ускоряющего напряжения в пределах от 2 до 3 кВ обладает электронной перестройкой частоты около 3,5%. Результаты работы могут быть использованы для устранения паразитного самовозбуждения компактных низковольтных усилителей, работающих в коротковолновой части СВЧ диапазона частот. Кроме того, они могут быть полезны при разработке

высокоэффективных и простых по конструкции автогенераторов с электронной перестройкой частоты и повышенным уровнем выходной мощности.

В приложениях представлены акты внедрения результатов кандидатской диссертации и патент на изобретение.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1) Проведен поиск путей улучшения комплекса электронных и электродинамических параметров приборов на основе численных расчетов на ЭВМ. Определены схемы группирователя, обеспечивающие максимальный электронный КПД прибора при сохранении широкой полосы усиления в Ку и К-диапазонах.

2) Исследованы условия эффективного отбора энергии и управления формой АЧХ в НМЛК, содержащего на входе и выходе систему двух связанных активных однозачерных резонаторов и гибридную фильтровую многомодовую систему, образованную металлокерамическим выводом энергии и пассивным резонатором в волноводе вывода энергии. На основе компьютерного моделирования проведен синтез и исследование многочерных фильтровых систем нового типа без изменения размеров резонаторного блока базовой конструкции, разработана и исследована конструкция десятирезонаторной системы низковольтного многолучевого клистрона Ку-диапазона частот.

3) Экспериментально доказана возможность расширения «холодной» полосы на выходе прибора до 940 МГц за счет использования фильтровой системы. Созданы экспериментальные образцы низковольтных многолучевых клистронов, работающих в Ку-диапазоне частот. Они обеспечивают выходную мощность не менее 300 Вт в полосе 340 МГц. Исследована возможность работы прибора в двухполосном режиме за счет настройки выходной фильтровой системы, при которой резонансная частота диэлектрического стержня f_c с помощью первого настроечного штыря, механически настраивается на любую рабочую частоту, находящуюся в полосе усиления.

4) Экспериментально исследованы режимы самовозбуждения в многорезонаторных НМЛК, работающих в Ку и К-диапазонах, а также выработаны рекомендации для устранения этих режимов в широкополосных усилительных приборах.

5) Получены новые знания о ранее не исследованных физических процессах многомодового взаимодействия в НМЛК с металлокерамическими фильтровыми системами. Выработаны практические рекомендации для выбора оптимальных параметров электронного потока и конструкции резонаторной системы, необходимых для успешного решения поставленных задач в новых частотных диапазонах, в режиме управления формой АЧХ в одной или двух полосах усиления.

6) Разработаны рекомендации для модернизации резонаторной системы и вывода энергии НМЛК Ку и К-диапазонов, реализация которых позволяет существенно расширить полосу усиления без увеличения массы и габаритов, с

сохранением выходной мощности на уровне 300-500 Вт, что обеспечивает повышение энергоэффективности бортовых систем радиосвязи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК РФ:

1. Золотых Д.Н. Разработка 19-лучевого клистрона Ku-диапазона / Д.Н. Золотых, Л.В. Кузнецова, М.А. Манжосин [и др.] // Электронная техника. Серия 1, "СВЧ-техника". - Ч.1. - 2013. - №3(518). - с. 107-109.

2. Царев В.А. Исследование и оптимизация параметров резонаторной системы многолучевого малогабаритного клистрона Ku-диапазона длин волн / В.А. Царев, П.Д. Шалаев, Д.Л. Симонов, Я.Т. Молчанов, Л.М. Щеголева, Л.В. Кузнецова, А.А. Николаев, М.А. Манжосин // Электронная техника. Серия 1, "СВЧ-техника". - Ч.1. - 2013. - №4(519). - с. 94-103.

3. Журавлев С.Д. 400-ваттный многолучевой импульсный клистрон Ku диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита / С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, М.А. Манжосин, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. -2020. - Вып. 4(547). С. 58-63.

Патенты РФ:

1. Патент № 2714508 Российская Федерация, МПК⁵¹ Н 01 J 25/10. Миниатюрный многолучевой клистрон / Царев В.А., Манжосин М.А.; заявитель и патентообладатель АО "НПП "Алмаз". - № 2019121595; заявл. 09.07.2019; опубликовано 18.02.2020, Бюл. № 20. - 20 с.: ил.

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. Tsarev V. A., Muchkaev V. Y., Manzhosin M. A. Mathematical modeling of a low-voltage multibeam klystron of millimeter range. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2020, vol. 28, iss. 5, pp. 513-523. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-5-513-523.

2. Zhuravlev S.D. Study of miniature Ku-band multiple - beam klystron with built-in shadow grid of high-density pyrolytic graphite / S.D. Zhuravlev, M.A. Manzhosin, V.I. Shesterkin, P.D. Shalaev, D.I. Kirichenko // Conference Proceedings - 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020. – Saratov, 2020. – P. 65-67.

Публикации в других изданиях:

1. Манжосин М.А. Исследование возможности расширения рабочей полосы усиления миниатюрных многолучевых клистронов Ku-диапазона / М.А. Манжосин, В.А. Царев, И.О. Чигуров // Электронные приборы и устройства СВЧ: материалы юбил. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию АО "НПП "Алмаз", г. Саратов, 18-19 сент. 2017г. -Саратов, 2017.-С.48-52.

2. Чигуров, И.О. Исследование двухмодового режима работы двухазорных резонаторов многолучевого клистрона / И.О. Чигуров, М.А. Манжосин, В.А. Царев // Электронные приборы и устройства СВЧ: материалы юбил. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию АО "НПП "Алмаз", г. Саратов, 18-19 сент. 2017г. -Саратов, 2017.- С.176-180.

3. Манжосин М.А. Разработка нового принципа построения фильтровой системы для миниатюрного многолучевого клистрона Ку-диапазона / М.А. Манжосин, В.А. Царев // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-30: сб. тр. XXX междунар. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 30 мая - 2 июня 2017г., г. Саратов, 10-12 октября 2017г., г. Минск (Беларусь) : в 12 т. -СПб, 2017. т. 12, ч. 3.-С.104-106.

4. Царев В.А. Математическое моделирование низковольтного многолучевого клистрона миллиметрового диапазона / В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев, М.А. Манжосин // XVII международная зимняя школа-семинар: материалы школы-семинара, г. Саратов, 5-10 февр. 2018г. - Саратов, 2018.-С.20-21.

5. Манжосин М.А. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование выходного каскада миниатюрного многолучевого клистрона со связанными резонаторами / М.А. Манжосин, И.О.Чигуров, В.А. Царев. - <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/index.html> // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). - 2018. - № 8. - С. 4.

6. Манжосин М.А. Миниатюрный многолучевой клистрон Ку-диапазона с перестраиваемой полосой усиления / М.А. Манжосин, В.А. Царев, И.О. Чигуров // Тезисы конференции мощные вакуумные СВЧ-приборы - 2019: материалы юбил. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию АО "НПП "Торий", г. Москва, 22 мая 2019г. - М., 2019. - С.17.

7. Царев В.А. Низковольтные многолучевые клистроны Ку и К диапазонов с гибридными многозвенными фильтровыми системами / В.А. Царев, М.А. Манжосин // Материалы XXI координационного научно-технического семинара по СВЧ технике 60-лет АО «НПП «Салют», Нижегородская область п. Хахалы, 7-9 сентября 2021 г. – Нижний Новгород, 2021 – С.14-16.

8. Манжосин М.А. Новые пути улучшения комплекса выходных параметров и характеристик низковольтных многолучевых клистронов, работающих в коротковолновой части СВЧ-диапазона / М.А. Манжосин, В.А. Царев // 65 лет на рынке СВЧ-электроники: итоги и современные тенденции: материалы юбил. науч.-техн. конф., посвящ. 65-летию АО "НПП "Алмаз", г. Саратов, 8-9 сент. 2022г. - Саратов, 2022.-С.168-173.

Манжосин Михаил Алексеевич

**УЛУЧШЕНИЕ РЕЖИМОВ МНОГОМОДОВОГО УСИЛЕНИЯ В
НИЗКОВОЛЬТНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНАХ Ku И K-
ДИАПАЗОНОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2024 г. Формат А5. Бумага офсетная.

Гарнитура Times. Уч.-изд.л.1,0.

Тираж100. Заказ №_____.

Издательство «Техно-Декор»,
Саратов, Московская, 160, тел.: 77-08-48, sar-print.ru