

На правах рукописи



ЧЕРНЫШЕВ Максим Алексеевич

**МНОГОМОДОВЫЕ МНОГОКАНАЛЬНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: *Мирошниченко Алексей Юрьевич*,  
доктор технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты: *Рыскин Никита Михайлович*,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Саратовский филиал федерального государственного  
бюджетного учреждения науки института  
радиотехники и электроники им.  
В.А. Котельникова Российской академии наук,  
г. Саратов, главный научный сотрудник

*Байкова Ольга Андреевна*,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ», г. Москва, доцент

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное  
предприятие «Алмаз», г. Саратов

Защита диссертации состоится «11» февраля 2025 г. в 13:30 часов 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 ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте [www.rsgeu.ru](http://www.rsgeu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.375.02  
д.ф.-м.н., доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень разработанности.**

Электроника сверхвысоких частот в последние годы получает новый импульс развития, являясь одной из самых наукоемких областей современной техники.

Совершенствование средств телекоммуникации, систем спутниковой связи, радиолокации и связи, систем радиопротиводействия требует, как разработки новых приборов, так и совершенствования существующих конструкций. Кроме того, увеличение информационных потоков ставит задачу повышения пропускной способности телекоммуникационных систем, что в свою очередь требует расширения частотных диапазонов в сторону более высоких частот.

Для подвижных и наземных средств связи, систем радиолокации, навигации и телекоммуникации перспективно использование многолучевых клистронов (МЛК). Такие приборы могут найти применение в качестве выходных усилителей и генераторов микроволнового диапазона. Также МЛК в качестве оконечного усилителя входят в состав комплексированных устройств, так называемых Small-Size Complex Microwave Devices (CMD), применяемых в бортовой аппаратуре. При разработке МЛК основные задачи стоят в увеличении выходной мощности, расширении частотных диапазонов, повышении КПД приборов, улучшении массогабаритных параметров.

Разработкой МЛК занимаются в России АО «НПП «Исток» имени Шокина, АО «НПП «Торий», АО «НПП «Алмаз», ЗАО «Светлана-Электронприбор», за рубежом это такие компании как CPI (США), Thomson-CSF (Франция), ведутся работы в институте электроники Китайской академии наук (Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, China).

При увеличении рабочей частоты МЛК наиболее эффективным решением является применение многоззорных резонаторов. Кроме того, одним из возможных путей миниатюризации подобных резонансных систем является применение резонансных отрезков планарных полосковых проводников, расположенных на подвешенной в корпусе резонатора диэлектрической подложке. В таких резонаторах удастся миниатюризировать резонансную систему в целом, получить возможность работы на новых резонансных частотах.

Таким образом, тема диссертационной работы, посвященная исследованию новых резонансных систем для приборов клистронного типа, является актуальной для современной сверхвысокочастотной электроники.

**Цель работы:** разработка и исследование новых типов многоканальных многочастотных многоззорных резонаторов для выработки научно-обоснованных рекомендаций по выбору режимов их работы.

Для достижения этой цели были поставлены и решены **следующие задачи:**

1. Проведен аналитический обзор современного состояния исследований в области разработок клистронов, в том числе миниатюрных многолучевых клистронов.

2. Разработана методика численно-аналитического моделирования электродинамических характеристик ряда новых конструкций многоканальных многозачорных резонансных систем для многолучевых низковольтных приборов клистронного типа.

3. Изучены электродинамические и электронные параметры резонансных систем.

4. Проведено исследование многочастотного режима работы резонаторов, определены условия настройки резонаторов на кратные резонансные частоты.

5. Изучено влияние параметров диэлектрика на электродинамические характеристики резонансных систем.

6. Разработаны рекомендации по выбору параметров и конструкции резонансных систем и параметров электронного потока, обеспечивающих максимальный электронный КПД микроволнового генератора в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана новая конструкция трехзачорного многолучевого прямоугольного двухчастотного клистронного резонатора с планарными полосковыми резонансными элементами на диэлектрической подложке. Для основных мод резонатора определены электродинамические параметры. Результаты расчета по дисковой модели клистрона показывают, что низковольтный многолучевой клистрон с предложенной конструкцией резонаторов при работе в одномодовом режиме работы на частоте 4,7 ГГц позволяет при напряжении 2,6 кВ получить КПД около 60% и уровень выходной мощности около 1 кВт.

2. Впервые исследован трехзачорный многоканальный резонатор с двумя парами полосковых проводников, размещенных на подвешенной диэлектрической подложке. Определены основные электродинамические параметры в диапазоне от 4 до 20 ГГц. Исследована возможность работы резонатора в бигармоническом режиме на кратных резонансных частотах.

3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования новой конструкции прямоугольного объемного четырехзачорного клистронного резонатора со свернутой полосковой линией. Разработан масштабный макет резонатора, работающий в дециметровом диапазоне длин волн. Экспериментально и теоретически исследованы основные электродинамические параметры резонатора для нескольких мод частотного диапазона. Получены результаты по перестройке частот резонатора путем изменения длины внутренней полосковой линии.

4. Исследована новая конструкция трехзачорного многолучевого призматического клистронного резонатора с тремя диэлектрическими подложками и планарными полосковыми резонансными элементами. Проведено исследование параметров резонатора при различной диэлектрической проницаемости и толщине подложки. Получены результаты по многочастотному режиму и режиму работы на кратных резонансных частотах.

5. Предложена новая конструкция четырехлучевого квазифрактального клистронного резонатора на базе Н-фрактала для

четырёхствольного клистрона. Исследованы варианты с четвертьволновой и полуволновой конструкцией опорного стержня на диэлектрической подложке. Изучен многочастотный режим резонатора и режим работы на кратных резонансных частотах, а также произведен расчет электронных параметров резонатора.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты, полученные в диссертации, развивают и дополняют теоретические представления о резонансных системах для приборов клистронного типа. Исследования новых типов резонансных систем позволяют получить рекомендации по выбору оптимальных параметров и режимов работы новых конструкций резонансных систем, обеспечивающих достижение оптимальных параметров прибора в целом. Результаты работы могут быть использованы при проектировании микроволновых приборов клистронного типа дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, на основе многоканальных многоззорных резонансных систем, работающих в одно- и многочастотном режимах.

Разработанные и исследованные конструкции многоканальных многоззорных резонаторов с кратными резонансными частотами и способы перестройки частот могут быть использованы при создании новых типов многорежимных МЛК.

Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Электронные приборы и устройства» ФГБОУ ВО СГТУ имени Гагарина Ю.А. при чтении лекций и проведении лабораторных работ по курсам «Электродинамика и микроволновая техника», «Мощные электровакуумные приборы СВЧ» при подготовке выпускных квалификационных работ по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника». Так же результаты работы использовались при выполнении научно-исследовательской работы СЧ НИР «Амур-М-РТИ» по модернизации многофункциональной РЛС, проводимой в АО РТИ имени А.Л. Минца и при проектировании резонансных систем для двухлучевого клистрона X-диапазона на предприятии АО «НПП «Контакт».

#### **Методология и методы исследования:**

В данной диссертационной работе исследовались методы позволяющие улучшить качественные характеристики резонансных систем для приборов клистронного типа. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями и математическим моделированием.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Трехззорный многоканальный малогабаритный клистронный резонатор с подвешенной в объеме диэлектрической подложкой и расположенными на ней резонансными полосковыми проводниками при работе одномодовом режиме на частоте 4,7 ГГц реализует высокое характеристическое сопротивление (210 Ом) и выходную мощность многолучевого клистрона около 1 кВт при КПД 60% и ускоряющем напряжении 2,6 кВ.

2. В многоканальном четырехззорном объемном резонаторе со свернутой полосковой линией обеспечивается управление частотными характеристиками без изменения внутреннего объема и формы корпуса

резонатора, путем изменения резонансной длины внутренней полосковой линии.

3. Результаты исследования многоканального призматического трехззорного клистронного резонатора с тремя диэлектрическими подложками и расположенными на них резонансными полосковыми проводниками, показывают способность его работы в многочастотном режиме и реализацию как усилительного, так и автоколебательного режимов работы клистрона.

4. В предложенных малогабаритных четырехканальных двухззорных клистронных резонаторах с Н-фракталом реализован многочастотный режим возбуждения низшей и высшей моды с кратностью  $K=2$  путем введения в объем резонатора поперечных пластин и режим возбуждения с кратностью  $K=3$  с помощью введения в объем резонатора стержня прямоугольного сечения, а также путем изменения длины полосковых резонансных проводников короткозамыкателем.

#### **Степень достоверности и апробация результатов:**

Достоверность полученных результатов обуславливается: применением обоснованных методов численного математического моделирования; использованием специальных программных продуктов и комплексов, которые учитывают взаимодействие электронов с СВЧ полем; сравнением результатов расчета с экспериментальными данными.

Результаты работы докладывались на конференциях: «2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications», 16-18 марта 2021, г. Москва; X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ», 31 мая - 4 июня 2021, г. Санкт-Петербург; «2021 International Conference Engineering And Telecommunication» (VIII Международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации»), 24 -25 ноября 2021, г. Долгопрудный, Московская обл.; «2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering» (15-я Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения»), 22-23 сентября 2022, г. Саратов; XII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Микроэлектроника СВЧ», 29 мая – 2 июня 2023, г. Санкт-Петербург.

#### **Личный вклад автора:**

Представленные в диссертации результаты расчетов получены автором самостоятельно, кроме того, в совместно опубликованных работах автор принимал непосредственное участие в анализе полученных результатов и формулировке выводов, составляющих основу публикации.

**Гранты.** Результаты диссертации получены в рамках выполнения гранта РФФИ (проект № 20-38-90191), тема «Исследование электродинамических характеристик многоканальных многоззорных резонансных систем микроволнового генератора с неоднородным распределением высокочастотного электрического поля».

**Публикации.** По результатам диссертации было опубликовано 13 работ: 4 в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК при Минобрнауки РФ, из них 2 в рецензируемых научных журналах по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника»; 5 в единой реферативной базе данных

Scopus; 3 в изданиях, включенных в библиографическую базу данных РИНЦ; получен 1 патент на изобретение № 2812270.

**Структура и объём работы.** Работа содержит введение, 4 главы, заключение и список литературы. Диссертация изложена на 126 страницах, включает 91 рисунок, 22 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

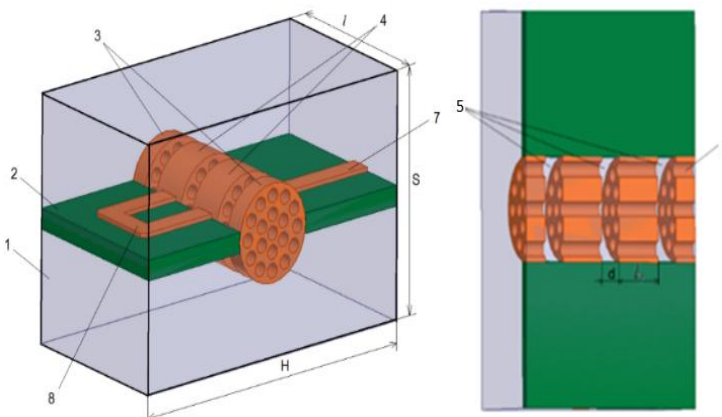
**Во введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность проведенных исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость. Представлены научные положения и результаты, выносимые на защиту автором.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы современного состояния в области разработок МЛК и резонансных систем, применяемых в клистронах. Показано, что за последние годы были созданы несколько десятков различных моделей МЛК, предназначенных для использования в радиолокационной технике, ускорителях, передатчиках космической и тропосферной связи, телевидении, установках РЭБ и других видах телекоммуникационной аппаратуры. Приведен обзор резонансных систем для приборов клистронного типа различных типов, в том числе резонансных систем на диэлектрических подложках и квазифрактальных резонансных систем.

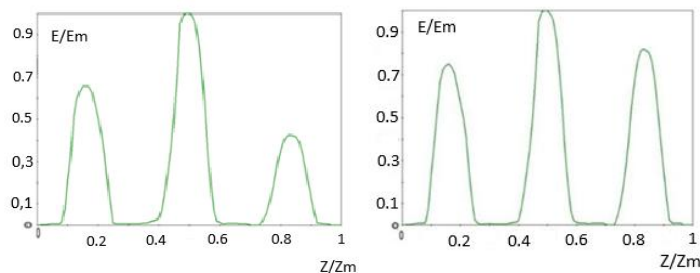
**Вторая глава** диссертационной работы посвящена исследованию малогабаритных трехзорных клистронных резонаторов с подвешенной в объеме диэлектрической подложкой. Первая конструкция, представленная на рисунке 1 это трехзорный 19-канальный объемный резонатор с одиночной полосковой линией на алмазной диэлектрической подложке.

Рисунок 1 - Конструкция резонансной системы:

- 1 – объёмный резонатор;
- 2- диэлектрическая подложка;
- 3- боковые электроды;
- 4 – центральные электроды;
- 5 – высокочастотные зазоры;
- 6 – пролетные каналы;
- 7, 8 - полосковые линии



Три высокочастотных зазора резонатора образованы между двумя боковыми электродами и двумя центральными электродами. На диэлектрической подложке размещены с двух сторон две полосковые линии, которые имеют электрический контакт с центральными электродами и корпусом резонатора. Полосковые линии совместно с центральными электродами, нагруженными на емкость высокочастотных зазоров, образуют резонансную систему. На рисунке 2 приведены зависимости распределения высокочастотного электрического поля вдоль пространства взаимодействия. Результаты расчета для первых двух мод резонатора приведены в таблице 1.



а) б)

Рисунок 2 - Зависимость распределения высокочастотного поля для противофазного (а) и синфазного (б) типов колебаний

Таблица 1 - Результаты расчета

№ моды	1	2
Тип моды	$\pi$	$2\pi$
Частота, ГГц	4,7	9,67
Собственная добротность, $Q_0$	1177	7692
Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом	210	53

Показано, что для  $\pi$ -моды поле в зазорах неравномерно, амплитуда поля в среднем зазоре резонатора в 1,5 раза превышает амплитуду поля в первом зазоре и в 2,5 раза в третьем зазоре. На  $2\pi$ -моды распределение поля более равномерно, в центральном зазоре поле в 1,3 раза превышает амплитуду в первом зазоре и в 1,2 раза амплитуду поля в третьем зазоре. Неоднородность поля может быть скомпенсирована за счет изменения длин зазоров.

Результаты расчета электронных параметров для резонатора, проведенные по методике, изложенной в [Chodorow M., Wessel-Berg T. A High-Efficiency Klystron with Distributed Interaction // IRE Transactions on Electron Devices 1961. Vol. 8. P. 44-55.] показывают, что на кратных частотах  $\pi$  и  $2\pi$  видов колебаний  $f_1/f_2=0,5$  удастся получить оптимальные параметры взаимодействия с электронным потоком при низком ускоряющем напряжении (2,6 кВ). При этом для  $\pi$ -моды коэффициент взаимодействия  $M=0,92$ , для  $2\pi$ -моды  $M=0,67$  (см. рисунок 3). Относительная электронная проводимость  $G_e/G_0$  для обеих мод положительна, что может говорить об отсутствии самовозбуждения прибора.

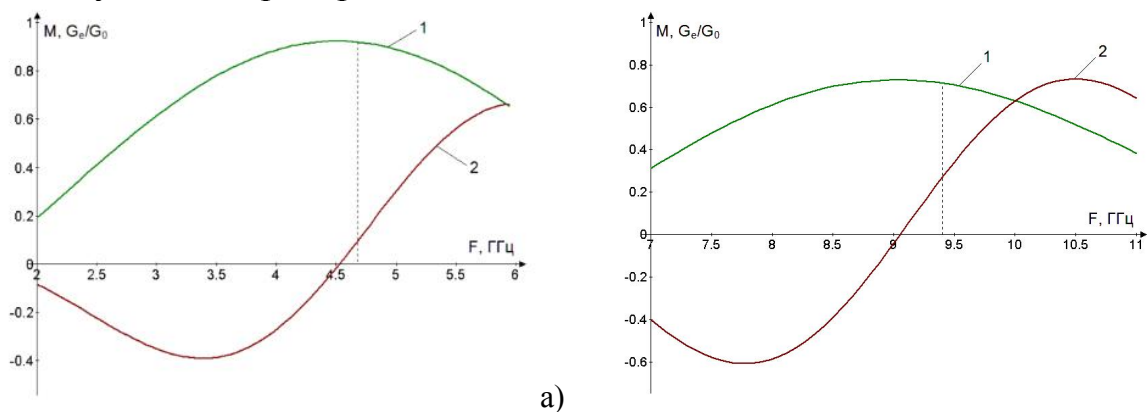


Рисунок 3 - Зависимости коэффициента взаимодействия  $M$  (1) и относительной электронной проводимости  $G_e/G_0$  (2) от частоты для противофазного (а) и синфазного (б) типов колебаний

Результаты расчета по программе, основанной на дисковой модели клистрона показывают, что низковольтный многолучевой клистрон с предложенной конструкцией резонаторов при работе в одномодовом режиме



работы на частоте 4,7 ГГц позволяет при напряжении 2,6 кВ получить около КПД около 60% и уровень выходной мощности около 1 кВт.

Так же в главе приведены результаты моделирования трехзворного клистронного резонатора с призматическими втулками и двумя двухсторонними полосковыми линиями на диэлектрической подложке (алмаз). Конструкция резонатора показана на рисунке 4. Две двухсторонние полосковые линии, представляют собой двухпроводную систему, один конец которой закреплен на крышке объемного резонатора, а другой соединен с центральными пролетными трубами.

Исследования проводились в диапазоне от 4 до 20 ГГц. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

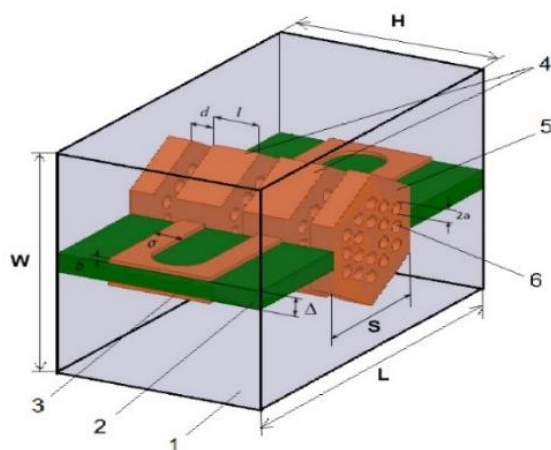


Рисунок 4 - Конструкция резонатора: 1 - прямоугольный объемный резонатор; 2 - диэлектрическая подложка; 3 - полосковые линии; 4 - центральные пролетные трубы; 5 - боковые пролетные трубы; 6- пролетный канал

Таблица 2 - Результаты моделирования резонатора

№ моды, $n$	Тип моды	$F_{0n}$ , ГГц	$Q_{0n}$	$\rho_n$ , Ом
1	$\pi$	4,439	1130	272
2	$\pi/2$	5,021	2092	107
3	$2\pi$	9,547	6291	116
4	$\pi$	18,193	2395	22
5	$\pi/2$	19,029	5176	31

Результаты расчета показывают, что в диапазоне до 20 ГГц в резонаторе возбуждаются пять мод с высокочастотными электрическими полями в зазорах

резонатора. Наибольшее характеристическое сопротивление на низшей  $\pi$ -моды и синфазной  $2\pi$ -моды №3. В то же время характеристическое сопротивление на высших частотах уменьшается. На рисунке 5,а приведены спектральные характеристики резонатора для выбранных мод, а также показаны значения импеданса  $R_{0n} = \rho_n Q_{0n}$ . Максимальное значение  $\rho Q_0$  наблюдается для моды №3. Исследована возможность перестройки основных рабочих частот резонатора с помощью короткозамыкателя. Оценена возможность настройки резонатора на кратные частоты. Результаты исследований приведены на рисунке 5,б.

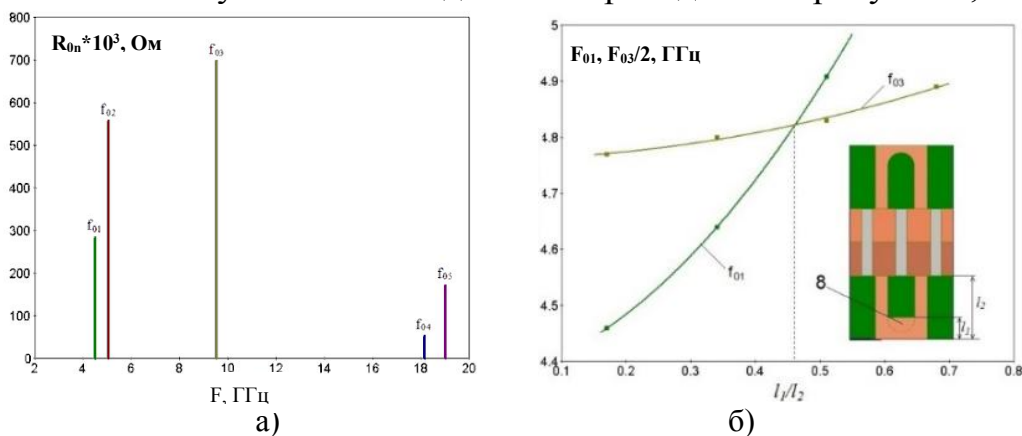


Рисунок 5 - Спектральные характеристики резонатора (а); настройка резонатора на кратные резонансные частоты (б)

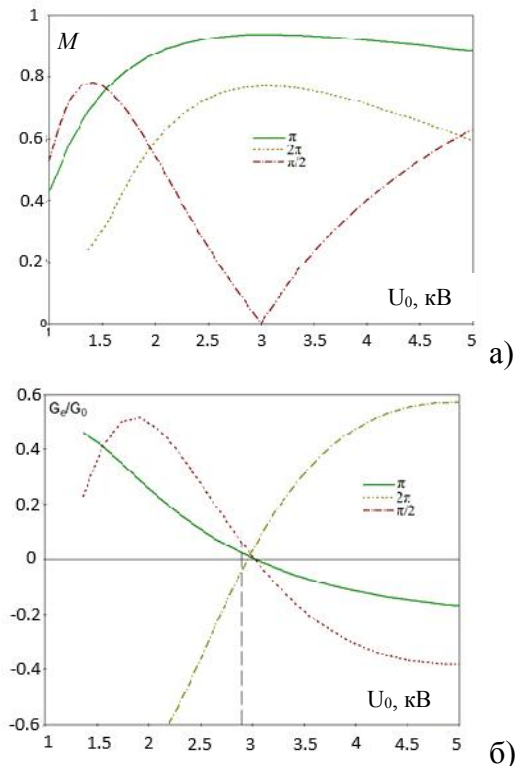


Рисунок 6 - Результаты расчета электронных параметров: а - коэффициент взаимодействия  $M$ ; б - относительная электронная проводимость  $G_e/G_0$

Исследовано поведение электронных параметров клистрона - коэффициента взаимодействия  $M$  и относительной электронной проводимости  $G_e/G_0$  для трех первых частот резонатора. Полученные результаты приведены на рисунке 6.

Из рисунка видно, что для низшего противофазного вида колебаний ( $\pi$ ) и высшего синфазного ( $2\pi$ ) удается добиться режима работы клистрона без самовозбуждения ( $G_e/G_0 > 0$ ) с высокими значениями коэффициента взаимодействия  $M$  при ускоряющем напряжении 2,8 – 2,9 кВ. В то же время для вида колебаний  $\pi/2$  в этом режиме коэффициент взаимодействия мал, а проводимость  $G_e/G_0$  имеет небольшое отрицательное значение.

В главе также приведены теоретические и экспериментальные исследования новой конструкции малогабаритного прямоугольного объемного четырехзазорного клистронного резонатора (см. рисунок 7).

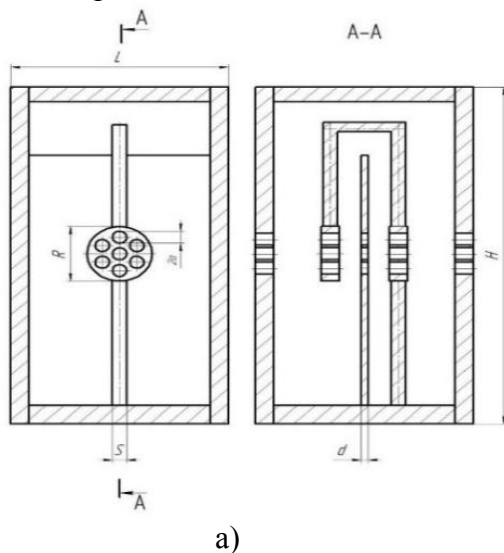


Рисунок 7 - Конструкция четырехзазорного прямоугольного резонатора (а); экспериментальный макет (б)

Внутри объемного резонатора размещена свернутая полосковая линия, соединенная с пролетными электродами, нагруженными на емкости высокочастотных зазоров. Был разработан экспериментальный макет резонатора, работающий в дециметровом диапазоне длин волн. Найден и исследован ряд резонансных частот с синфазным и противофазным распределением высокочастотного электрического поля (результаты приведены в таблице 3).

Таблица 3- Результаты расчета и эксперимента четырехзворного резонатора

Тип моды	Резонансная частота, МГц		Добротность	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
$\pi$	422	440	2158	3074
$2\pi$	1224	1250	3638	3721
$\pi$	1983	1965	5656	5542

Исследования показали возможность применения подобных резонаторов в приборах клистронного типа также и в сантиметровом, и в миллиметровом диапазонах.

**В третьей главе** рассматривается трехзворный призматический клистронный резонатор с тремя диэлектрическими подложками и расположенными на ней полосковыми линиями (см. рисунок 8).

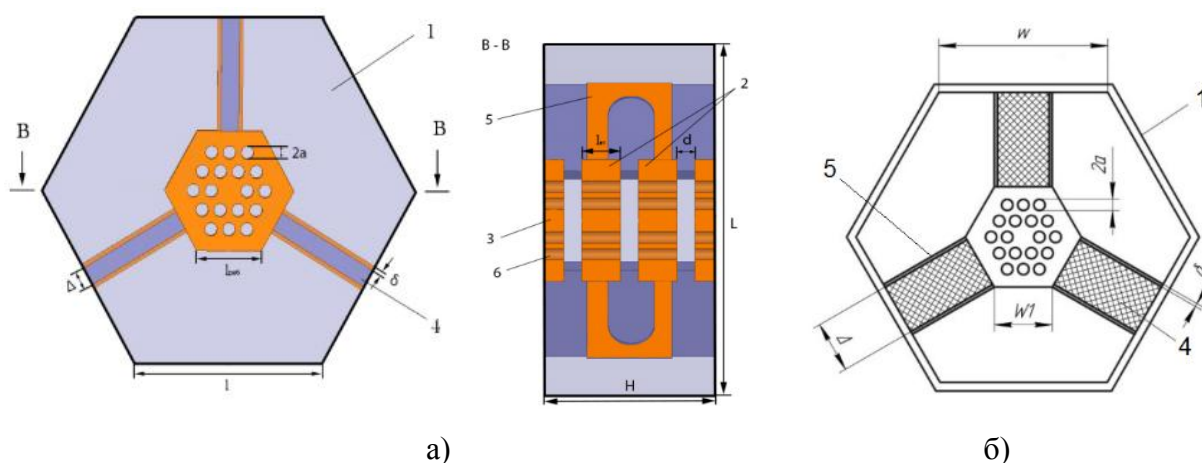


Рисунок 8 - Конструкция резонатора (а); конструкция резонатора с утолщенным диэлектриком (б): 1 – призматический корпус; 2 – центральные электроды; 3 – боковые электроды; 4 – диэлектрические подложки; 5 – полосковые линии

Результаты моделирования представлены в таблице 4. Также проведен анализ высокочастотных полей вдоль пространства взаимодействия резонатора (см. рисунок 9,а). Для применения резонатора в приборах с умножением частоты был исследован режим работы на кратных резонансных частотах. При этом подбором длины элемента перестройки (короткозамыкатель полосковой линии) удалось получить кратность резонансных частот равную трем ( $K=3$ ) для  $\pi$  и высшей  $3\pi/2$ -моды (см. рисунок 9,б).

Проведено исследование основных электродинамических параметров резонатора при различных значениях диэлектрической проницаемости подложки, на которых размещены полосковые линии. В частности, исследовалось поведение резонансных частот и собственной добротности.

Таблица 4 - Основные электродинамические параметры резонаторов

№ моды	Тип моды	Частота, ГГц,	Собственная добротность, $Q_0$	Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом
Толщина диэлектрика 1,0 мм				
1	$\pi$	5,334	705	173
2	$3\pi/2$	6,097	1426	139
3	$2\pi$	8,028	2193	96
4	$3\pi/2$	19,31	1661	12

Окончание таблицы 4 - Основные электродинамические параметры резонаторов

Толщина диэлектрика 3,2 мм				
1	$\pi$	5,014	692	210
2	$3\pi/2$	5,716	2044	92
3	$2\pi$	6,847	3319	173
4	$3\pi/2$	15,864	2967	15

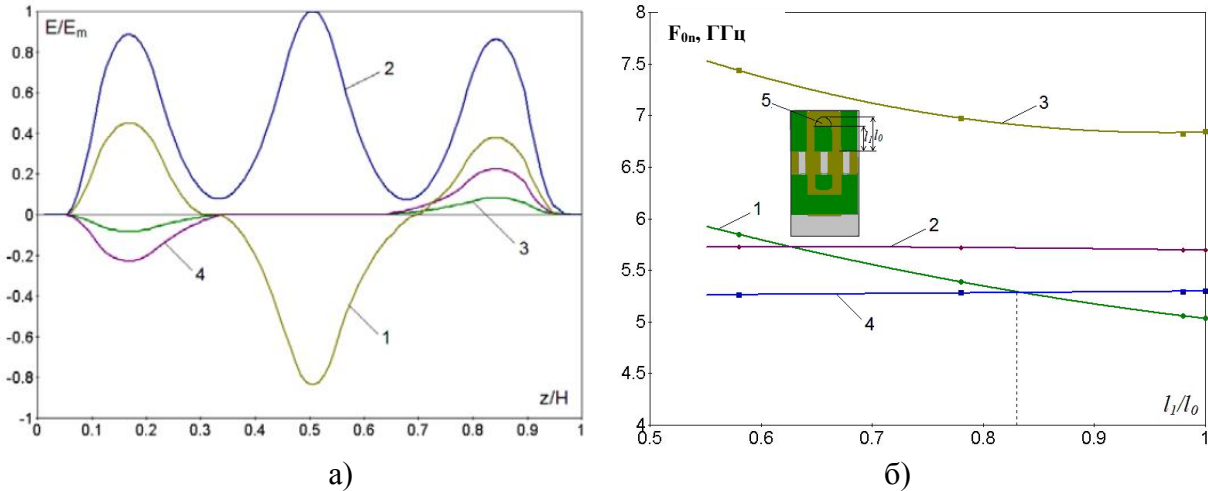


Рисунок 9 - Распределение высокочастотного электрического поля в резонаторе вдоль пространства взаимодействия (а); изменение резонансных частот резонатора в зависимости от длины элемента перестройки  $l_0-l_1$  (б): 1 -  $\pi$ -мода; 2 -  $3\pi/2$ -мода; 3 -  $2\pi$ -мода; 4 - высшая  $3\pi/2$ -мода ( $F_{04}/3$ ); 5- полосковый перестроечный элемент

При этом значения диэлектрической проницаемости материалов (алюмооксидная керамика, алмаз) выбирались с учетом их применения в вакуумной микроволновой технике. Результаты представлены на рисунке 10.

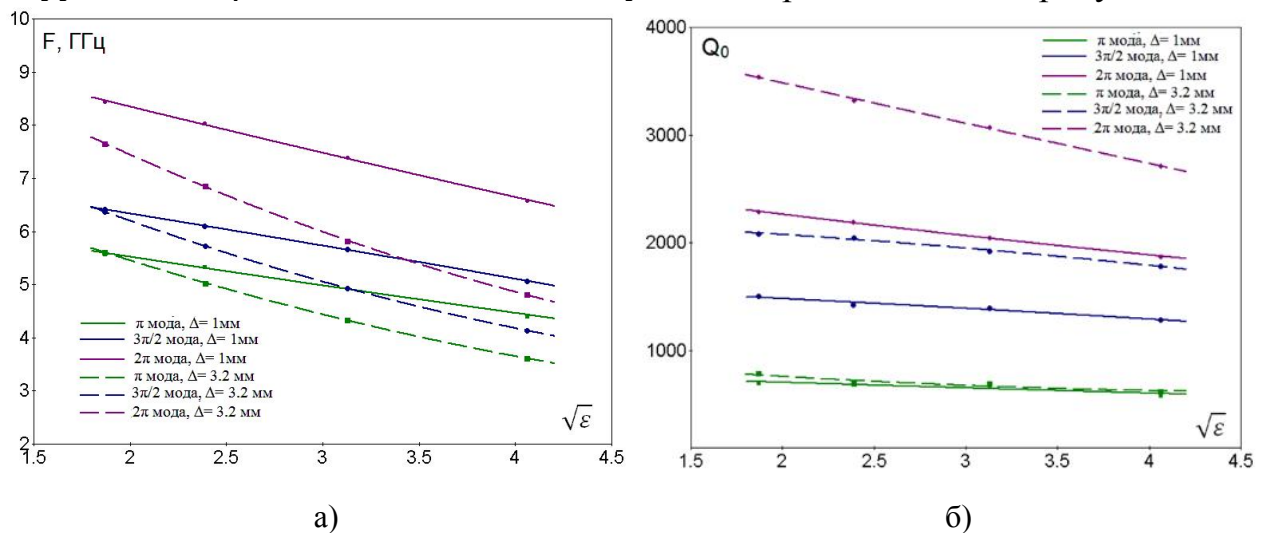


Рисунок 10 - Зависимость частот резонатора (а) и добротности (б) от диэлектрической проницаемости подложки для разных толщин диэлектрика

Из рисунка 10 видно, что резонансные частоты уменьшаются при увеличении диэлектрической проницаемости подложки. Для  $\pi$  и  $3\pi/2$ -мод при малых  $\epsilon$  значения резонансных частот практически равны при толщине диэлектрика 1,0 и 3,2 мм, далее при увеличении диэлектрической проницаемости для «толстого» диэлектрика уменьшение резонансной частоты происходит быстрее, чем для «тонкого» (разница частот на  $\pi$ -моды 798 МГц, на

$3\pi/2$ -моды 924 МГц). Для  $2\pi$ -моды при малых значениях  $\epsilon$  частоты при «толстом» и «тонком» диэлектрике не равны между собой (разница 788 МГц, которая увеличивается до 1770 МГц при  $\sqrt{\epsilon}=4,06$ ). Собственная добротность резонатора на  $\pi$ -моды меняется слабо при разных толщинах диэлектрика (максимальная разница на начальном участке, где  $\Delta Q_0=91$ ). При этом на  $3\pi/2$  и  $2\pi$ -модах наблюдается значительное расхождение характеристик. Максимальное изменение добротности наблюдается при малых значениях  $\epsilon$ , и составляют 580 на  $3\pi/2$ -моды и 1253 на  $2\pi$ -моды. При этом для  $2\pi$ -моды характеристика добротности имеет большую крутизну, по сравнению с  $\pi$  и  $3\pi/2$ -модами.

Результаты расчета электронных параметров приведены на рисунке 11.

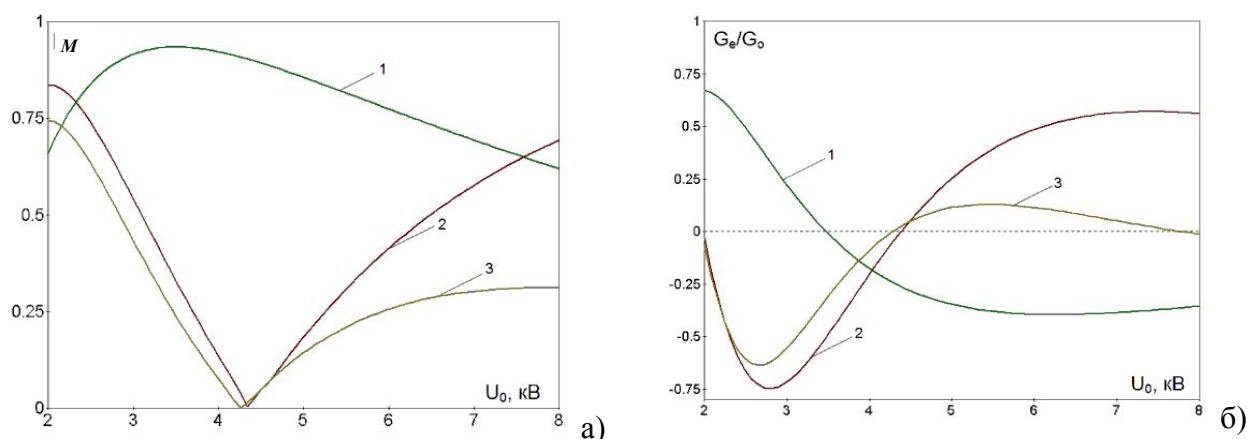


Рисунок 11 - Зависимости коэффициента взаимодействия (а) и относительной электронной проводимости (б) от ускоряющего напряжения:

1 –  $\pi$ -мода; 2 -  $3\pi/2$ -мода; 3 -  $2\pi$ -мода

Из рисунков видно, что для противофазной  $\pi$ -моды, оптимальное ускоряющее напряжение клистрона для работы в усилительном режиме при наибольшем значении  $M$  и отсутствии самовозбуждения ( $G_e/G_0 > 0$ ) составляет 2,8–3,3 кВ. Для моды  $3\pi/2$  усилительный режим можно обеспечить при более высоком ускоряющем напряжении (6,5 – 7,5 кВ), а для  $2\pi$ -моды усилительный режим в области выбранных ускоряющих напряжений не является оптимальным. Для работы в автоколебательном режиме при ( $G_e/G_0 < 0$ ) можно использовать все три моды, при этом для  $\pi$ -моды оптимальное ускоряющее напряжение будет составлять 3,7 – 4,4 кВ, а для  $3\pi/2$  и  $2\pi$ -мод 2,7 - 3 кВ.

**В четвертой главе** исследованы четырехлучевые двухззорные квазифрактальные резонаторы (ДФКР) для четырехствольного клистрона. Конструкция резонатора показана на рисунке 12,а. Были исследованы два конструктивных варианта резонатора: с четвертьволновым опорным стержнем прямой (см. рисунок 12,б) и конической форм (см. рисунок 12,в). Резонатор позволяет использовать в клистроне четыре отдельные электронные пушки со сходящимся пучком. Исследования показали, что в подобном резонаторе могут возбуждаться несколько противофазных и несколько синфазных мод с достаточно высокими электродинамическими параметрами. Низшим видом колебаний в резонаторе является противофазный ( $\pi$ ) вид.

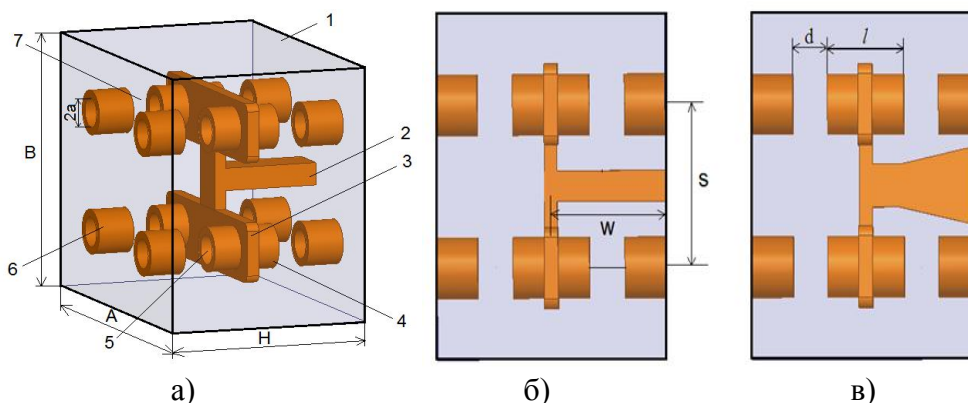


Рисунок 12 - Конструкция четырехлучевого ДФКР (а): 1 - объемный резонатор; 2 – опорный стержень; 3 – «ветви»; 4 – пролетные втулки; 5 – отверстия для пролета электронного потока. Конструкция резонатора с четвертьволновым опорным стержнем прямой (б) и конической (в) форм

Были исследованы основные электродинамические параметры - резонансная частота, собственная добротность, характеристическое сопротивление. Результаты расчета резонатора, представленного на рисунке 12, приведены в таблице 5.

Таблица 5 -Электродинамические параметры четырехлучевого ДФКР

№ моды	1	2	3	4	5	6	7
Тип моды	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$2\pi$	$2\pi$	$2\pi$
Резонатор с прямым опорным стержнем							
Резонансная частота, f, ГГц	2,559	4,848	6,938	7,873	10,491	12,787	13,366
Собственная добротность, $Q_0$	1370	1626	2687	2371	3612	4210	4333
Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом	243	123	116	95	117	168	40
Резонатор с коническим опорным стержнем							
Резонансная частота, f, ГГц	2,774	4,964	6,947	7,892	10,655	12,776	13,512
Собственная добротность, $Q_0$	1520	1476	2575	2024	3601	4133	4266
Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом	376	169	119	115	116	129	63

В диапазоне до 15 ГГц спектр состоит из четырех частот противофазного типа ( $\pi$ ) и трех синфазных мод ( $2\pi$ ), которые расположены последовательно. Следует отметить, что наибольшее характеристическое сопротивление наблюдается среди противофазных мод на низшей моде, среди синфазных мод на модах № 5 и №6.

Для конструкции с коническим четвертьволновым опорным стержнем, получают более высокие параметры характеристического сопротивления и добротности на нескольких противофазных видах колебаний.

На рисунках 14 и 15 представлены результаты исследований перестройки резонансных частот резонатора с помощью перестроечных элементов. Первый вариант - две симметрично расположенные на корпусе резонатора тонкие металлические пластины, размещенные в поперечном направлении резонатора, изменяющиеся по ширине (см. рисунок 13). Второй вариант - перестройка

резонатора с коническим опорным стержнем с помощью стержня прямоугольного сечения, который соединен с противоположной стенкой резонатора и ступенчато изменяется по длине (см. рисунок 14).

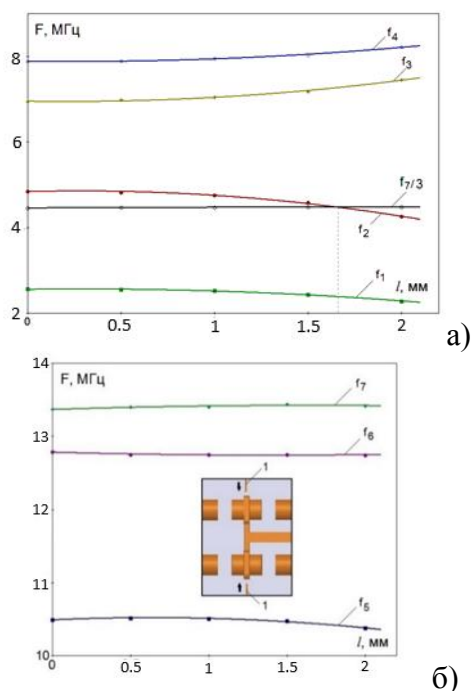


Рисунок 13 - Зависимости резонансных частот резонатора с прямым опорным стержнем от ширины перестроечных элементов 1 для случая перестройки пластинами: а – диапазон частоты с 2 до 9 ГГц; б - диапазон частоты с 10 до 14 ГГц

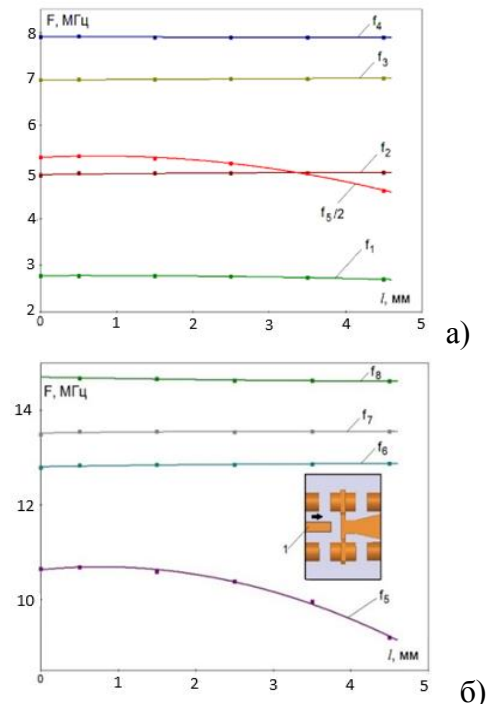


Рисунок 14 - Зависимости резонансных частот резонатора с коническим опорным стержнем от длины стержня перестройки 1: а – диапазон частоты с 2 до 8,5 ГГц; б - диапазон частоты с 9 до 15 ГГц

По результатам исследования перестройки частот резонатора поперечными пластинами можно отметить следующее: максимальное смещение частот наблюдается на  $\pi$ -модах, особенно на №1 и №2; на синфазных модах смещение частот проявляется слабее. В этом случае можно наблюдать кратность частот, равную три ( $K=3$ ) на модах №7 и №2 при ширине перестроечных пластин 1,66 мм.

Во втором случае перестройки частот резонатора большей чувствительностью к изменению длины элемента перестройки (14%) обладает синфазная мода №5. Низший противофазный вид позволяет получить 2,9% перестройки частоты. В этом случае, также, как и при перестройке поперечными пластинами, наблюдается кратность резонансных частот, но с отношением частот  $f_5/f_2=2$ .

Рассчитаны электронные параметры  $M$  и  $G_e/G_0$  от ускоряющего напряжения в диапазоне 2 - 14 кВ для трех мод резонатора. Результаты приведены на рисунке 15. Наибольшее значение коэффициента взаимодействия в «низковольтном» режиме (до 6 кВ) наблюдается на противофазной моде №1 с оптимальным напряжением 3– 3,8 кВ. При этом обеспечивается положительная активная электронная проводимость  $G_e/G_0$ . В диапазоне напряжений 8 - 14 кВ на моде №2  $M > 0,8$ , при этих же напряжениях синфазная мода №5 обеспечивает

значение  $M \approx 0,6$ . Моды №2 и №5 оценивались с точки зрения возможности использования в режиме умножения частоты.

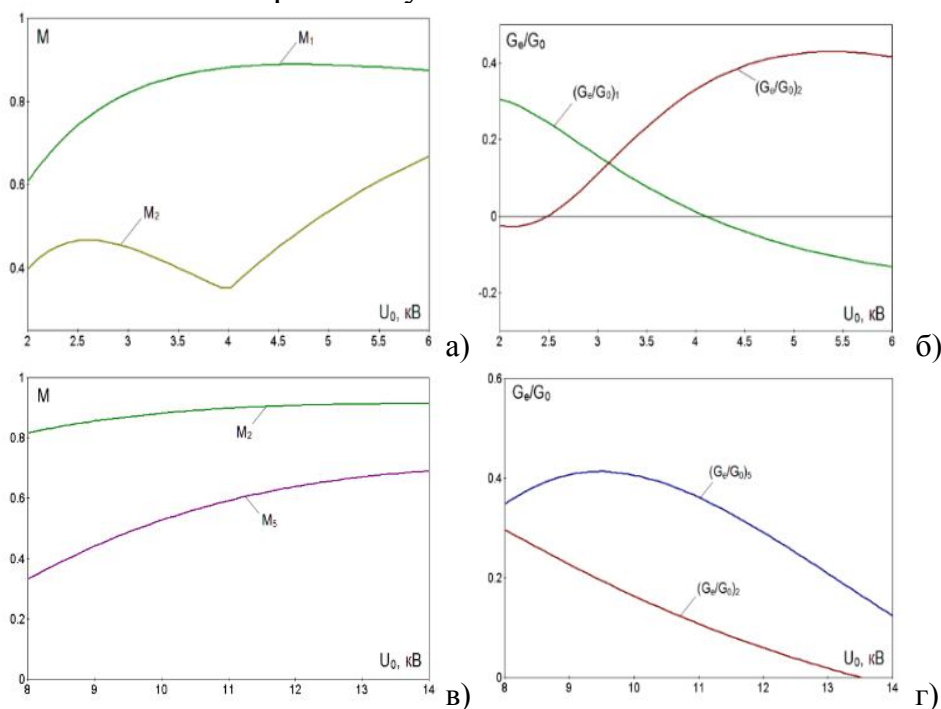


Рисунок 15 - Зависимость коэффициента взаимодействия  $M$  и относительной активной электронной проводимости  $G_e/G_0$  от ускоряющего напряжения  $U_0$  для мод №1 и №2 (а, б) и мод №2 и №5 (в, г)

Режим кратности резонансных частот рассчитывался для конструкции ДФКР с перестроечным элементом в виде стержня прямоугольного сечения. Для режима кратности частот на модах №2 и №5 оптимальным значением ускоряющего напряжения будет 11 - 12 кВ, при котором относительная электронная проводимость  $G_e/G_0$  имеет положительное значение.

Также в этой главе представлены результаты исследования многолучевого миниатюрного двухззорного квазифрактального резонатора для четырехствольного клистрона (см. рисунок 16).

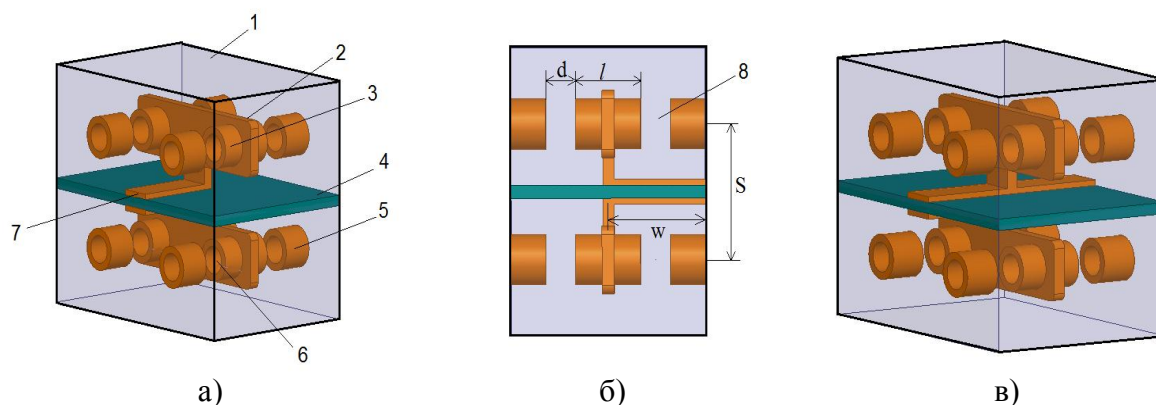


Рисунок 16 - Четырехлучевой резонатор: а, б- конструкция с четвертьволновой линией; в - конструкция с полуволновой линией. 1 – призматический корпус; 2 – резонансные «ветви»; 3 – центральный электрод; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – боковой пролетный электрод; 6 – пролетный канал; 7 – двухсторонняя полосковая линия; 8 - высокочастотные зазоры

Особенностями конструкции является применение в электродинамической системе квазифрактальной структуры в виде Н-фрактала и диэлектрической подложки, с расположенной на ней полосковой линией. Исследованы два варианта конструкции - с четвертьволновой и полуволновой



полосковой линией. Результаты расчета электродинамических параметров представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Основные электродинамические параметры резонатора

Резонатор с четвертьволновой линией								
№ моды	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип моды	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$2\pi$	$2\pi$
Частота, ГГц	2,482	3,495	6,48	6,675	7,756	9,667	12,063	13,335
Собственная добротность, $Q_0$	1382	702	1380	2727	2391	3557	4422	2451
Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом	282	283	138	30	76	84	130	56
Резонатор с половеолновой линией								
№ моды	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип моды	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$2\pi$	$2\pi$	$\pi$
Частота, ГГц	3,753	4,209	6,134	6,764	7,799	11,2	12,219	13,016
Собственная добротность, $Q_0$	1393	802	1078	2541	2331	3386	3964	4347
Характеристическое сопротивление, $\rho$ , Ом	238	117	35	48	85	120	87	9,6

Изучена возможность перестройки резонатора и настройки на кратные резонансные частоты, результаты представлены на рисунке 17,а. Представлены результаты только для мод  $f_{01}$ ,  $f_{02}$ ,  $f_{07}$ . Для перестройки частот в качестве перестроечного элемента использована двухсторонняя закорачивающая полосковая перемычка длиной  $l_1$ . Результаты по перестройке частот показывают, что изменение размера полоскового перестроечного элемента изменяет как частоту противофазных, так и синфазных мод, причем разнонаправленно. Противофазные моды увеличивают частоту при увеличении параметра  $l_1$ ,  $f_{01}$  на 13%,  $f_{02}$  на 22%, а синфазная мода зависит от элемента перестройки слабее и уменьшается на 0,5%. Показана возможность настройки резонатора на кратные частоты с кратностью  $K=3$ . При величине  $l_1/w=0,3$  обеспечивается настройка на кратные частоты моды №2 и моды №7.

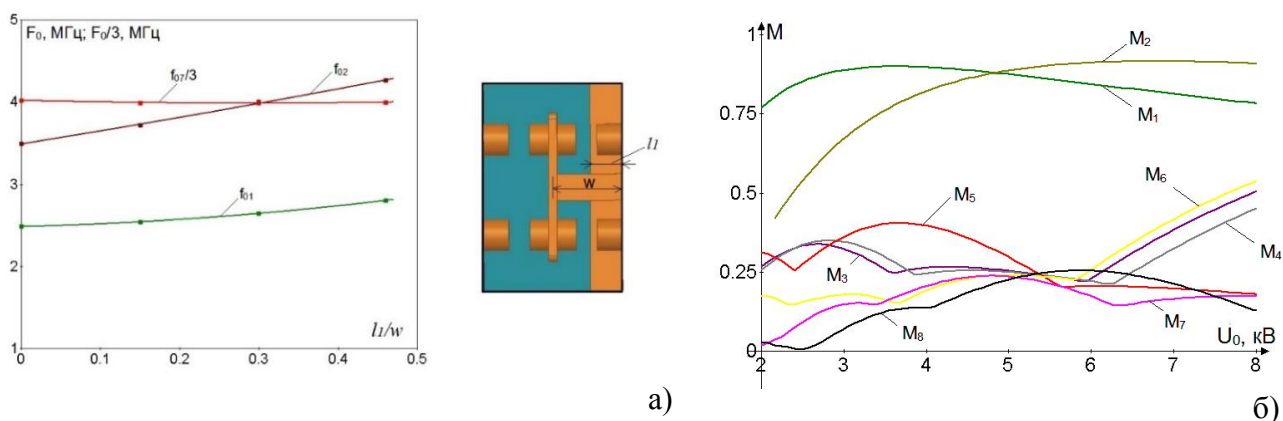


Рисунок 17 - Зависимости перестройки частот резонатора и механизма перестройки с помощью двухсторонней полосковой закорачивающей перемычки  $l_1$  (а); зависимость коэффициента взаимодействия резонатора с четвертьволновой линией от ускоряющего напряжения (б)

Для конструкции с четвертьволновыми полосковыми линиями произведен расчет электронного параметра, коэффициента взаимодействия  $M$  (см. рисунок 17,б). Видно, что оптимальное взаимодействие в резонаторе

обеспечивается только для первых двух мод. При этом на моде №1 оптимальное напряжение составляет 2,8 - 3 кВ, а для моды №2 5 - 6 кВ.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе:

1. Разработана методика численно-аналитического моделирования электродинамических параметров ряда новых многоканальных многозачорных резонансных систем для многолучевых низковольтных приборов клистронного типа.

2. Выработаны рекомендации по выбору параметров и конструкции резонансных систем и параметров электронного потока, обеспечивающих оптимальное взаимодействие в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн.

3. Разработана новая конструкция трехзачорного многолучевого прямоугольного двухчастотного клистронного резонатора с планарными полосковыми резонансными элементами на диэлектрической подложке, работающего в С- и Х-диапазонах. Проведенный расчет по дисковой модели клистрона показал, что низковольтный многолучевой клистрон с предложенной конструкцией резонаторов при работе в одномодовом режиме работы на частоте 4,7 ГГц позволяет при напряжении 2,6 кВ получить КПД около 60% и уровень выходной мощности около 1 кВт. В двухмодовом режиме можно будет дополнительно увеличить КПД на 5-10%, что может быть востребовано в МЛК, работающих в режиме умножения частоты  $f_2/f_1=2$ .

4. Впервые исследован трехзачорный клистронный резонатор с призматическими втулками и двумя двухсторонними полосковыми линиями на диэлектрической подложке. Исследованы основные электродинамические параметры в S-, C-, X-, Ku-диапазонах. Исследована возможность работы резонатора в бигармоническом режиме на кратных резонансных частотах. Для перестройки резонатора по частоте использован метод укорочения длины полосковых планарных проводников.

5. Исследован миниатюрный прямоугольный объемный четырехзачорный клистронный резонатор со свернутой полосковой линией. Благодаря использованию свернутого полоскового проводника удалось получить компактную резонансную систему, работающую в дециметровом диапазоне на частотах  $f_1=422$  МГц,  $f_2=1224$  МГц,  $f_3=1983$  МГц. Изменением длины линии связи удалось настроить резонатор на кратные резонансные частоты. Изготовлен экспериментальный макет резонатора, на котором проверены некоторые результаты теоретических расчетов.

6. Исследован миниатюрный призматический трехзачорный клистронный резонатор с тремя диэлектрическими подложками и полосковыми линиями. Проанализирована возможность применения в резонаторе «тонкой» и «толстой» диэлектрической подложки. Рассчитанные резонансные частоты резонатора располагаются в С- и Ku-диапазонах. Показано существенное влияние диэлектрика на электродинамические параметры резонатора. Проанализировано поведение основных электродинамических параметров резонатора при изменении диэлектрической проницаемости керамических подложек. Исследована возможность настройки на кратные резонансные частоты с кратностью  $K=3$  для  $\pi$  и высшей  $3\pi/2$ -моды.

7. Исследованы новые конструкции четырехлучевого двухззорного квазифрактального двухззорного резонатора для приборов клистронного типа, на базе Н-фрактала. Расчет произведён в S-, C-, X-, и Ku-диапазонах. Показана возможность перестройки резонансных частот резонатора с помощью поперечных пластин, введенных в объём резонатора и с помощью стержня прямоугольного сечения. Для режима кратности частот подбором длины элемента перестройки удалось получить кратность резонансных частот равную двум и трем. Проведен расчет электронных параметров резонатора, который показал, что среди всех исследованных мод наибольшее значение коэффициента взаимодействия наблюдается на первых двух  $\pi$ -модах.

8. Исследован четырехлучевой двухззорный квазифрактальный резонатор на базе Н-фрактала с четвертьволновой и полуволновой полосковой линией на диэлектрической подложке. Изучен многочастотный режим резонатора и режим работы на кратных резонансных частотах, а также произведен расчет электронных параметров резонатора. Также для этого типа резонатора показана возможность настройки на кратные резонансные частоты с помощью закорачивающей полосковую линию короткозамыкателя.

9. Результаты исследований трехззорного клистронного резонатора с призматическими втулками и двумя двухсторонними полосковыми линиями на диэлектрической подложке, а также призматического трехззорного клистронного резонатора с тремя диэлектрическими подложками легли в основу полученного патента на изобретение № 2812270.

10. На основе исследованных типов резонаторов могут быть созданы высокоэффективные, малогабаритные, низковольтные клистронные СВЧ-генераторы и усилители сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, работающих в одно- и многочастотном режимах.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в изданиях по специальности, рекомендованных ВАК РФ*

1. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Акафьева Н.А. Трехззорный многочастотный резонатор для миниатюрных многолучевых клистронов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2023. - № 5. – С. 74-80.

2. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Акафьева Н.А. Исследование многочастотного четырехлучевого квазифрактального клистронного резонатора // Электронная техника. Сер. 1: СВЧ-техника. - Вып. 2(558). - 2023. - С. 23-32.

*Патент на изобретение*

3. Пат. № 2812270. РФ, МПК H01J25/10. Миниатюрный трехззорный клистронный резонатор с полосковыми линиями на диэлектрической подложке/ А.Ю. Мирошниченко, М.А. Чернышев, В.А. Царев, Н.А. Акафьева; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – №2023113244; заявл. 22.05.2023; опубл. 29.01.2024. Бюл. №4.

*Прочие публикации*

4. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Царев В.А., Акафьева Н.А. Трехззорный резонатор для миниатюрного многолучевого клистрона // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – №. 8.

5. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Царев В.А., Акафьева Н.А. Призматический трехззорный резонатор для низковольтных многолучевых клистронов // Вопросы электротехнологии. – 2022 - №. 1(34). – С. 57-65.

6. Miroschnichenko A.Y., Tsarev V.A., Novikov A.A., Akafyeva N.A., Chernyshev M.A. Investigation of the Two-Gap Multi-Channel Resonator with Quasi-Fractal Strip Elements // 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering.– Saratov, Russia. - 2018. – P. 443-448.
7. Tsarev V.A., Miroschnichenko A.Y., Gnusarev A.V., Akafyeva N.A., Chernyshev M.A. Calculation of Electrodynamics Parameters of Photonic Crystal Resonator for Low-Voltage Multi-Beam Klystrons // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia. - 2020. – P. 227-230.
8. Miroschnichenko A.Y., Chernyshev M.A. Investigation of the Electrodynamics Characteristics of a Three-Gap Klystron Resonator with a Strip Line on a Suspended Dielectric Substrate //2021 International Conference on Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, Russia. - 2021. – P. 1-4.
9. Miroschnichenko A.Y., Tsarev V.A., Chernyshev M.A., Akafyeva N.A. A two-frequency compact klystron three-gap resonator with a suspended dielectric substrate // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). – Dolgoprudny, Russia. - 2021. – P. 1-4.
10. Чернышев М.А., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А. Исследование электродинамических параметров трехззорного клистронного резонатора с полосковыми проводниками на керамической подложке //Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб.: ЛЭТИ, 2021.– С. 552-556.
11. Царев В.А., Чернышев М.А., Мирошниченко А.Ю., Акафьева Н.А. Многочастотные миниатюрные клистронные резонаторы с полосковыми резонансными элементами //Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LV Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Интернаука, 2021. – С. 72-80.
12. Miroschnichenko A.Y., Chernyshev M.A., Tsarev V.A., Akafyeva N.A. Investigation of the Electrodynamics Parameters of a Three-Gap Multi-Beam Klystron Resonator with Planar Strip Conductors on a Dielectric Substrate //2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia. - 2022. – P. 63-66.
13. Мирошниченко А.Ю., Чернышев М.А., Акафьева Н.А., Емелин И.А. Исследование электродинамических характеристик двухззорного квазифрактального резонатора // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – СПб.: ЛЭТИ, 2023. – С. 449-453.

Чернышев Максим Алексеевич

## **МНОГОМОДОВЫЕ МНОГОКАНАЛЬНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.2024

Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл.печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Заказ \_\_\_\_\_