

Экз. №

На правах рукописи

ЮНАКОВ Алексей Николаевич

УДК.621.385.624

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ
МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ С ВЫХОДНОЙ СРЕДНЕЙ
МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 10 КВТ И НИЗКОВОЛЬТНЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗВИТЫХ
РЕЗОНАТОРАХ В СРЕДНЕЙ ЧАСТИ САНТИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Специальность 05. 27. 02

«Вакуумная и плазменная электроника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Фрязино 2011 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино Московской обл.

Научный руководитель: кандидат технических наук
Пугнин Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Прокофьев Борис Владимирович

кандидат физико-математических наук
Галдецкий Анатолий Васильевич

Ведущая организация: ОАО «НПО «Лианозовский электромеханический
завод» г. Москва

Защита состоится 15 марта 2011 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 409.001.01 при ФГУП «НПП Исток» по адресу: 141120, г. Фрязино Московской обл., ул. Вокзальная, 2а, Большой конференцзал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток»

Автореферат разослан 7 февраля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Погорелова Э. В.

Актуальность проблемы: Мощные широкополосные многолучевые клистроны (МЛК) нашли широкое применение в выходном каскаде усиления передатчиков мощных радиолокационных станций (РЛС) различного назначения. К современным клистроном для РЛС предъявляются ряд требований. Выходная импульсная мощность должна быть порядка сотен киловатт при уровне средней мощности не менее 10 кВт. Широкая полоса рабочих частот клистрона позволяет увеличить помехозащищенность станции и должна составлять несколько единиц процентов от центральной частоты. Большое значение имеет также величина питающих напряжений клистрона, уменьшение которых позволяет создавать более компактные передатчики.

В современных радиолокационных устройствах все более желательной является работа посылкой, состоящей из пачки очень коротких СВЧ импульсов, что позволяет получить высокую разрешающую способность, как по дальности, так и по скорости при одном коротком облучении. Высокая частота повторения импульсов исключает использование клистронов с анодной модуляцией и клистронов с модулирующим анодом, вследствие увеличения потребляемой мощности и габаритов модуляторов (пропорциональных U_{mod}^2). Таким образом, в клистронах для мощных РЛС требуется применение специального управляющего электрода (сетки). Наличие такого электрода в клистроне, постоянно находящегося под высоким электрическим потенциалом, приводит к увеличению возможности возникновения пробоев между электродами. Обеспечение электрической прочности является одной из главных задач создания мощных широкополосных клистронов. Работа при больших длительностях импульса (до 1 миллисекунды) также является необходимым требованием к клистроном для мощных РЛС.

Таким образом, к клистроном, используемым в мощных РЛС, предъявляются следующие основные требования:

выходная средняя мощность	более 10 кВт,
выходная импульсная мощность	более 100 кВт,
рабочая полоса частот	от 2 % до 6 % и более,
минимальное напряжение катода,	
управление по низковольтному электроду,	

высокая электрическая прочность (минимальное количество пробоев в межэлектродных промежутках),

работа клистрона при длительностях импульса от десятых долей микросекунды до миллисекунды.

МЛК во многом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к СВЧ источникам для мощных РЛС. В СССР первые конструкции многолучевых клистронов были созданы в 60-е и 70-е годы благодаря работам С.А. Зусмановского, С.В. Королева и др. В дальнейшем на отечественных предприятиях “Исток” (г. Фрязино), “Торий” (г. Москва), “Светлана” (г. Санкт–Петербург), “Контакт” (г. Саратов) и других было создано большое количество МЛК с резонаторами, как на основном, так и на высших видах колебаний. Примерно с 1990-х годов за рубежом также активно развивалось направление многолучевых клистронов. Однако, исходя из имеющихся публикаций, к настоящему времени за рубежом не достигнут комплекс параметров МЛК для РЛС, соответствующий разработкам в РФ.

Таким образом, к началу 2000-х годов было разработано большое количество МЛК разного уровня мощности, в том числе и мощных широкополосных клистронов для РЛС. В большинстве случаев в разработанных широкополосных клистропах использовались резонаторы тороидального типа. Известно, что в средней части сантиметрового диапазона длин волн параметры клистронов с тороидальными резонаторами (выходная импульсная и средняя мощность, коэффициент усиления и полоса) ограничены из-за невозможности увеличения диаметра пролетной трубы более половины длины волны. В связи с этим в средней части сантиметрового диапазона длин волн возникает необходимость в использовании других типов резонаторов с увеличенными по сравнению с тороидальным типом размерами - пространственно-развитых резонаторов. К таким резонаторам следует относить резонаторы, развитые в поперечном относительно электронного луча направлении: резонаторы кольцевого типа, резонаторы на высших видах колебаний (кольцевого и тороидального типов), резонаторы, впервые предложенные для использования с ленточными пучками, так называемые резонаторы линейного типа, а также резонаторы, развитые в продольном относительно электронного луча направлении: многоззорные (в частности, двухззорные) резонаторы.

Применение пространственно - развитых резонаторов известно

достаточно давно. Их использование позволяет увеличить число лучей по сравнению с тороидальными резонаторами на основном виде колебаний. Применение резонаторов на высших видах колебаний к тому же дает дополнительную свободу выбора количества многолучевых пролетных труб. В связи с этим представляет интерес исследование и сравнение электродинамических параметров различных резонаторов, используемых в мощных широкополосных МЛК.

Применение выходных двухзачерных тороидальных резонаторов в МЛК в средней части сантиметрового диапазона длин с уровнем средней выходной мощности порядка 10 кВт не известно.

Таким образом, к началу выполнения работы не были определены принципы построения мощных широкополосных многолучевых клистронов для РЛС с уровнем средней выходной мощности порядка 10 кВт и выходной импульсной мощности в сотни киловатт на пространственно-развитых резонаторах, в частности, не определены критерии выбора конкретного типа резонатора, а также не проведено сравнения параметров резонаторных систем на пространственно-развитых резонаторах.

Целью диссертационной работы явилось исследование резонаторных систем на пространственно-развитых резонаторах в средней части сантиметрового диапазона длин волн, направленных на определение конструктивных решений, позволяющих обеспечить максимальный комплекс выходных параметров мощных широкополосных клистронов и разработка, на основе этих исследований, МЛК для мощных РЛС.

Основные задачи исследований:

- определение взаимосвязей между конструкцией резонаторной системы, электронно-оптической системы и выходными параметрами клистронов;
- исследование электродинамических параметров и конструктивных особенностей различных типов резонаторов (тороидальных, кольцевых, линейных);
- исследование характеристик и определение оптимальных конструкций резонаторов на высших видах колебаний с многолучевыми пролетными трубами;
- выбор базовой конструкции мощного многолучевого широкополосного клистрона на основе резонаторов на втором виде

колебаний с многолучевой пролетной трубой;

- исследование электромагнитных полей и определение принципов конструирования линейных резонаторов с целью обеспечения равномерного распределения электрического поля в парциальных пролетных каналах резонатора;

- исследование путей увеличения рабочей полосы частот выходной секции, в том числе исследование возможности применения выходного двухзазорного резонатора в широкополосных клистродах с уровнем средней выходной мощности более 10 кВт.

Научная новизна работы:

1. Исследованы электродинамические характеристики различных типов резонаторов (тороидального, кольцевого и линейного) с одинаковым числом пролетных каналов и расстоянием между центрами каналов. Определено, что характеристическое сопротивление резонаторов при одинаковом числе пролетных каналов и одинаковом расстоянии между центрами каналов практически не зависит от типа резонатора.

2. Исследовано распределение электрического поля в пролетных каналах многолучевого линейного резонатора. На основе проведенных исследований автором предложена, защищенная патентом РФ, конструкция многолучевого линейного резонатора, в которой повышена равномерность распределения электрического поля в зазорах взаимодействия парциальных пролетных каналов.

3. Исследованы электродинамические характеристики резонаторов на высших видах колебаний с одинаковым числом пролетных каналов, а также параметры клистронов, построенных на основе этих резонаторов. Определено, что в МЛК с резонаторами на высших видах колебаний и многолучевыми пролетными трубами, при одинаковом общем числе лучей с увеличением вида колебаний КПД клистронов и характеристическое сопротивление резонаторов падает.

4. Исследованы резонаторная и электронно-оптические системы клистрода с активными резонаторами с рабочим типом колебаний H_{201} . На основе расчетных и экспериментальных данных определена оптимальная конструкция резонаторной системы с активными резонаторами на втором виде колебаний. Определено, что в мощных широкополосных клистродах комплекс выходных параметров, требуемый для мощных РЛС (выходная

средняя мощность более 10 кВт, импульсная 200 – 600 кВт, максимальная длительность импульсов сотни микросекунд, полоса рабочих частот до 6 %) в средней части сантиметрового диапазона длин волн обеспечивается выбором активных резонаторов с рабочим типом колебаний H_{201} и диаметром пролетной трубы $(0,4 \div 0,45)\lambda$, где λ - длина волны. Показаны пути выравнивания электрического поля в зазорах взаимодействия входного и выходного резонаторов. Также определены принципы построения выходной фильтровой системы с активными резонаторами с рабочим типом колебаний H_{201} . Данная конструкция защищена патентом РФ № 2244980.

5. Исследована возможность применения выходного двухззорного резонатора в клистронах в средней части сантиметрового диапазона длин волн с выходной средней мощностью порядка 10 кВт и импульсной - сотни киловатт. Определено, что в двухззорном резонаторе с большим диаметром пролетной трубы главным ограничивающим фактором для увеличения полосы является возбуждение паразитных колебаний. Увеличить разделение частот видов колебаний в двухззорном резонаторе, нагруженном на выходную систему, позволяет уменьшение диаметра пролетной трубы менее $0,42\lambda$. На основе расчетных и экспериментальных данных определена конструкция центральной перемычки двухззорного резонатора, позволяющая изменять разделение частот между видами колебаний.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В многолучевых клистронах с выходной средней мощностью более 10 кВт, импульсной мощностью 200-600 кВт и длительностью импульса сотни микросекунд увеличение полосы рабочих частот до 6 % в средней части сантиметрового диапазона достигается применением активных резонаторов на втором виде колебаний, в которых высокое характеристическое сопротивление достигается выбором многолучевых пролетных труб с диаметром $0,4 \div 0,45$ от длины волны.

2. В мощных широкополосных клистронах с резонаторами на втором виде колебаний и многолучевыми пролетными трубами повышение КПД до 40 % достигается увеличением напряжения на ВЧ зазоре путем применения 4-резонаторной выходной системы, в которой для выравнивания электрического поля в пролетных каналах активный резонатор содержит две щели связи, смещенные к пролетным трубам.

3. В мощных клистродах с выходной средней мощностью более 10 кВт, импульсной мощностью 100-200 кВт полоса рабочих частот (6 – 7) % достигается применением двухзачерного выходного резонатора, в котором увеличение разделения частот рабочего синфазного вида колебаний и нерабочих противофазных (низкочастотного и высокочастотного) видов колебаний обеспечивается выбором диаметра пролетной трубы менее 0,42 от длины волны.

Практическая ценность работы. Результаты выполненных исследований были использованы в двух опытно-конструкторских работах, а также при разработке 3 типов клистронов, проведенных в ФГУП «НПП «Исток». В целом, в результате выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований, решена поставленная в данной диссертационной работе задача современной вакуумной СВЧ электроники - создание мощных широкополосных многолучевых клистронов на пространственно-развитых резонаторах в средней части сантиметрового диапазона длин волн, используемых в мощных РЛС.

В результате выполнения этих работ созданы опытные образцы 5-ти типов мощных широкополосных многолучевых клистронов для РЛС в диапазоне длин волн от 4 до 5,5 ГГц. Из них клистрон «Амарант» разработан в обеспечение ОКР «ВВО-АП» и предназначен для работы в качестве оконечного усилителя мощности в передающем устройстве РЛС 96Л6-АП. Клистрон «Вакуум» разработан в рамках ОКР целью, которой являлась разработка технологии производства вакуумных СВЧ приборов с повышенными электрическими характеристиками и долговечностью для модернизации существующих и разработки перспективных ЗРС и РЛС С-400 «Триумфатор», модернизируемых С-300 ПМУ «Фаворит», перспективных РЛС, систем «Зоопарк», «Аистенок», «Клинок», «Кредо», «Монумент» и др.

Апробация работы: Основные теоретические выводы и практические результаты работы доложены и обсуждены на 6-ти конференциях, по теме диссертации опубликовано 6 статей, получено 3 патента на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Материал изложен на 90 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 12 таблиц,

а также титульный лист, оглавление на 3 страницах, список литературы на 5 страницах (52 наименования). Общий объем диссертации составляет 170 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **Введении** приведены результаты анализа требований, предъявляемых к параметрам клистронов, необходимых для современных мощных РЛС. На основе литературных данных проанализирован достигнутый уровень параметров мощных широкополосных СВЧ приборов разработанных как в России, так и за рубежом. С привлечением этого анализа обоснован выбор темы диссертации, определены цели работы, отмечены научная новизна и практическая значимость проведенных исследований и полученных в работе результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** проведен анализ различных типов резонаторов. На примере тороидального резонатора рассмотрены факторы, ограничивающие увеличение характеристического сопротивления за счет уменьшения диаметра пролетной трубы. Показано, что увеличение характеристического сопротивления резонаторов в средней части сантиметрового диапазона, а, следовательно, увеличение КПД, коэффициента усиления и рабочей полосы частот приводит к ухудшению одного или нескольких из параметров клистрона: увеличению плотности тока с катода (уменьшение срока службы), ухудшению электропрочности, уменьшению подводимой мощности и, соответственно, выходной мощности, увеличению тепловых нагрузок, а также возможно к ухудшению токопрохождения.

Автором предложена конструкция линейного резонатора, в которой центральные ряды пролетных каналов, расположены на участках резонаторов с наименьшей высотой резонатора, а расположенные по обе стороны от центральных рядов последующие ряды пролетных каналов размещены на участках активных резонаторов с большими высотами (рис. 1). Данная конструкция позволяет улучшить равномерность электрического поля резонатора в зазорах взаимодействия парциальных пролетных каналов, а также по сравнению с ранее известными способами повышения равномерности электрического поля упрощает конструкцию резонатора.

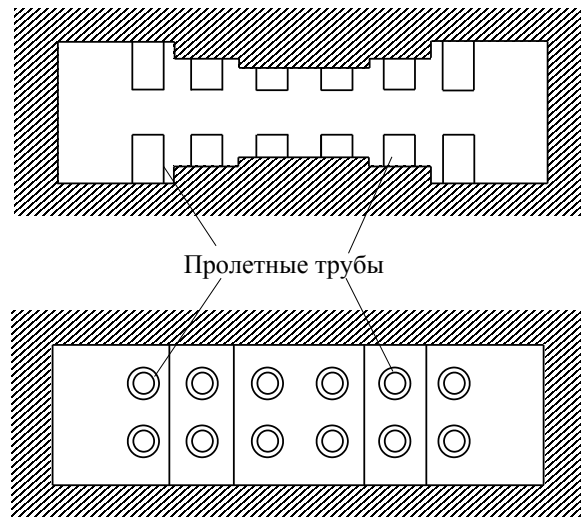


Рис. 1. Схематическое изображение 12-ти лучевого линейного резонатора

В диссертации проведен сравнительный анализ трех типов резонаторов: тороидального, кольцевого и линейного. Приведено сравнение электродинамических параметров (характеристическое сопротивление, неравномерность сопротивлений в пролетных каналах и разделение резонансных частот низших видов колебаний) в резонаторах с одинаковым числом лучей и расстоянием между центрами каналов.

По результатам анализа различных типов резонаторов определено:

- в резонаторах разной конструкции при одинаковом числе лучей и одинаковом расстоянии между пролетными каналами характеристические сопротивления резонаторов примерно равны и с точки зрения величины характеристических сопротивлений нет предпочтений в выборе какого-либо типа резонатора;

- резонаторы линейного и кольцевого типов имеют небольшое разделение частот между основным и вторым видами колебаний, что может накладывать ограничения на работу клистрона в широкой полосе частот.

Проведены исследования различных вариантов конструкций резонаторных систем на высших видах колебаний с многолучевыми пролетными трубами и построенных на их основе многолучевых клистронов в средней части сантиметрового диапазона длин волн. Исследования проводились для двух диапазонов – 5,5 и 10 ГГц. Для каждого диапазона частот суммарное количество лучей в резонаторе и расстояние между центрами пролетных каналов сохранялись одинаковыми. Изменялись число пролетных труб в резонаторе и число лучей в трубах. На основе

выполненных исследований сделан вывод о том, что при сохранении электропрочности, свойств теплорассеяния резонаторов и при близком количестве лучей, с увеличением числа ячеек (числа пролетных труб) КПД клистронов падает. Это связано с уменьшением характеристического сопротивления резонаторов.

Проведенные исследования характеристик резонаторов на высшем виде колебаний базировались на основе анализа их электродинамических характеристик. Использование резонаторов на высших видах колебаний позволяет уменьшить удельные нагрузки на элементы конструкции и, как следствие, достигать больших уровней средней подводимой мощности. Таким образом, получение максимального комплекса выходных параметров обусловлено оптимальным сочетанием числа труб и количества лучей, которые можно разместить в резонаторной ячейке без существенной потери величины характеристического сопротивления.

В главе 2 проведены исследование и создание базовой конструкции клистрона с активными резонаторами с рабочим типом колебаний H_{201} (на втором виде колебаний).

Определен оптимальный диаметр многолучевой пролетной трубы в резонаторах на втором виде колебаний. Показано, что в клистронах с резонаторами на втором виде колебаний с диаметром пролетной трубы равным половине длины волны невозможно получение высокого КПД и коэффициента усиления в широкой полосе частот. Расчетно-экспериментальным путем определено, что в широкополосных МЛК с активными резонаторами на втором виде колебаний требуемый для мощных РЛС комплекс выходных параметров (выходная средняя мощность более 10 кВт, импульсная 200 – 600 кВт, максимальная длительность импульсов сотни микросекунд, полоса рабочих частот до 6 %) достигается при выборе диаметра пролетной трубы в диапазоне $0,4 \div 0,45$ от длины волны. Конкретное значение диаметра пролетной трубы прибора выбирается из указанного интервала значений с учётом наиболее плотной упаковки каналов в пролетной трубе, которая в свою очередь выбирается исходя из диаметров и количества пролетных каналов, а также из заданной рабочей частоты.

Проведены исследования выходных систем клистронов с резонаторами

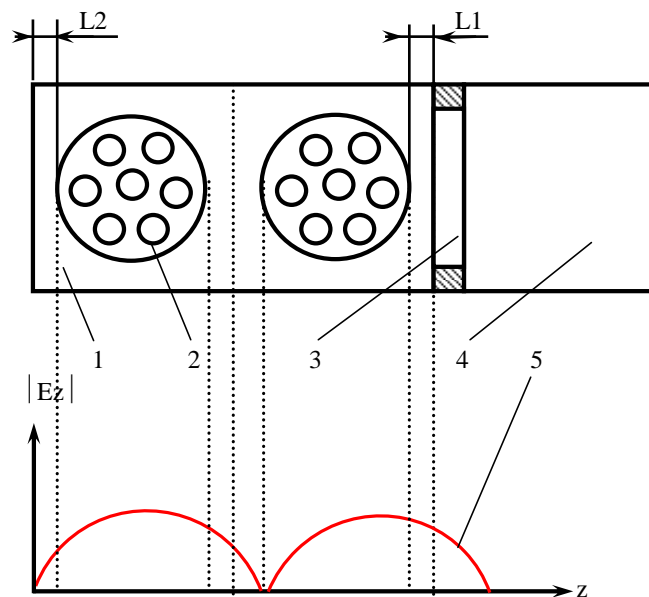
на втором виде колебаний, в том числе четырехсвязных выходных систем. Определены принципы конструирования фильтровой системы, заключающиеся в следующем: для равномерной нагрузки пролетных труб активного резонатора с рабочим типом колебаний H_{201} его связь с пассивным резонатором должна осуществляться через две щели, расположенные напротив каждой из пролетных труб. Первый пассивный резонатор также должен иметь рабочий тип колебаний H_{201} . Рабочим типом колебаний второго пассивного резонатора может быть тип H_{101} . При этом щель связи первого и второго пассивных резонаторов должна быть смещена относительно оси первого пассивного резонатора.

Показано, что в широкополосных МЛК при работе выходного резонатора в перенагруженном режиме (напряжение на зазоре выходного резонатора меньше, чем напряжение катода) переход с 3-х на 4-хсвязную выходную систему позволяет увеличить выходную мощность на величину до 10 %. Также отмечено, что с увеличением числа резонаторов и связей между ними значительно возрастает трудоемкость настройки 4-хсвязной системы по сравнению с 3-хсвязной системой. В связи с этим широкое применение 4-хсвязных систем может быть ограничено из-за большой трудоемкости настройки таких систем.

Проведены исследования неравномерностей распределения электрического поля в зазорах взаимодействия резонаторов с рабочим типом колебаний H_{201} , вызванных нагрузкой входного и выходного резонаторов (рис. 2).

Автором предложено в мощных широкополосных многолучевых клистродах с резонаторами с рабочим типом колебаний H_{201} выравнивать электрическое поле в зазорах пролетных труб входного и выходного активных резонаторов путем использования резонаторов несимметричной формы, при которой расстояние L_1 от стенки резонатора со щелями связи до пролетной трубы $2 \div 2,5$ раза меньше, чем расстояние L_2 от противоположной стенки резонатора до пролетной трубы (рис. 2).

В главе 3 исследована возможность применения двухзазорного выходного резонатора в мощных широкополосных клистродах в средней части сантиметрового диапазона длин волн с выходной средней мощностью более 10 кВт.



1 – активный резонатор с рабочим типом колебаний H_{201} ,
 2 – многолучевые пролетные трубы,
 3 – щель связи активного резонатора с волноводом (или пассивным резонатором),
 4 – волновод (или пассивный резонатор),
 5 – распределение электрического поля вдоль резонатора по оси z

Рис. 2. Схематический вид активного резонатора с рабочим типом колебаний H_{201} , нагруженного на волновод (пассивный резонатор)

Показано, что в двухззорном резонаторе характеристическое сопротивление синфазного вида на 25-30 % больше сопротивления противофазного вида колебаний. К тому же при использовании пролетных труб с диаметром близким к половине длины волны равномерность электрического поля в пролетных каналах у синфазного вида колебаний значительно выше. Учитывая это, а также из-за проблемы с перегревом перемычки между зазорами в мощных широкополосных МЛК, предпочтительнее использовать синфазный вид колебаний. Проведенные для оценки токооседания на центральной перемычке двухззорного выходного резонатора расчеты показали, что при начальном заполнении канала лучом равном 0,6 и 0,686 оседание на стенках каналов перемычки небольшое и составляет несколько единиц киловатт импульсной мощности. При начальном заполнении 0,8 на центральной перемычке двухззорного резонатора осажается пучок с импульсной мощностью порядка 47 кВт. Таким образом, определено, что при проектировании клистрона с двухззорным выходным резонатором необходимо особое внимание

уделить электронно-оптической системе, которая должна обеспечивать заполнение канала хорошо сгруппированным электронным пучком на входе в выходной двухзазорный резонатор менее 0,7.

Расчетным путем определено, что в двухзазорном резонаторе с одной связью между зазорами разделение резонансных частот между низкочастотным противофазным и синфазным видами колебаний слабо зависит от диаметра пролетной трубы и составляет $12 \div 18\%$ от рабочей частоты. Разделение резонансных частот между синфазным и высокочастотным противофазным видами колебаний существенно зависит от диаметра пролетной трубы и составляет $45 \div 14,5\%$ от рабочей частоты. Причем, чем больше диаметр пролетной трубы, тем меньше разделение частот между видами (рис. 3).

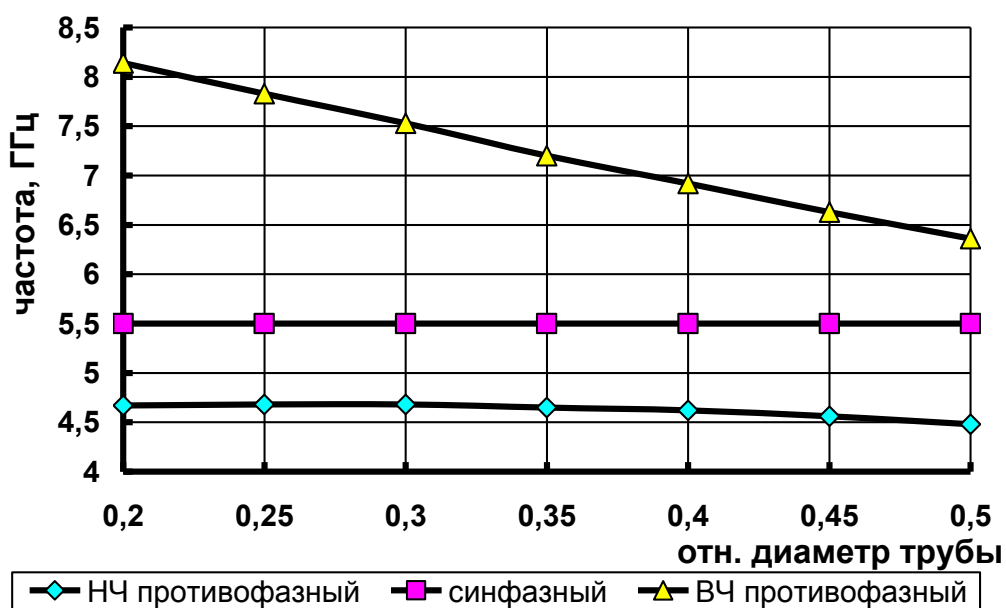


Рис. 3. Зависимость частоты первых трех видов колебаний в двухзазорном резонаторе с одной связью между зазорами от диаметра пролетной трубы

В двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами разделение частот между низкочастотным противофазным и синфазным видами колебаний увеличивается до $22 \div 24\%$. Однако в таком резонаторе уменьшается разделение частот между синфазным и высокочастотным противофазным видами колебаний. При диаметре пролетной трубы равном 0,47 от длины волны частоты синфазного вида колебаний и высокочастотного противофазного вида колебаний совпадают (рис. 4).

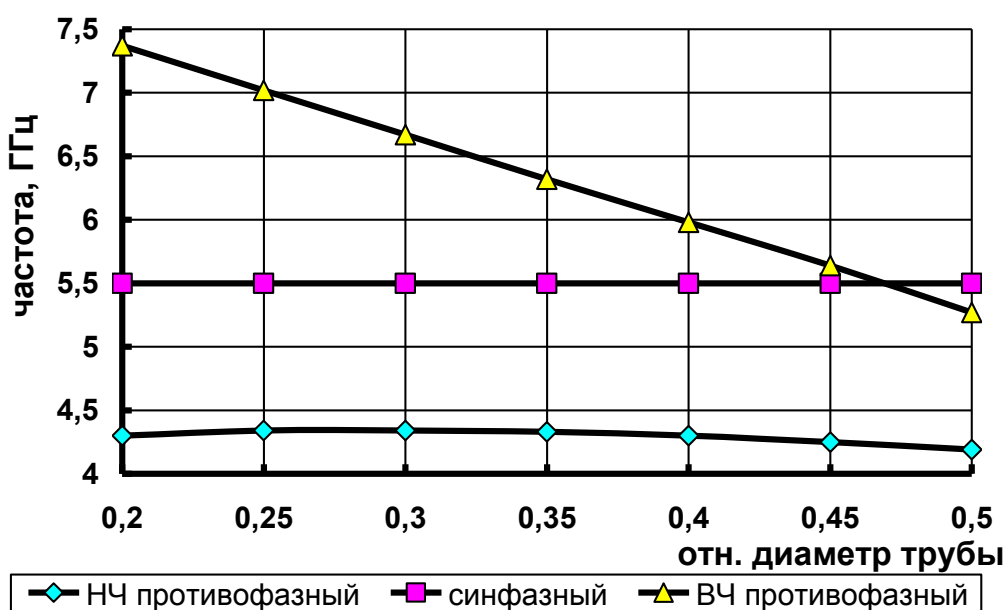
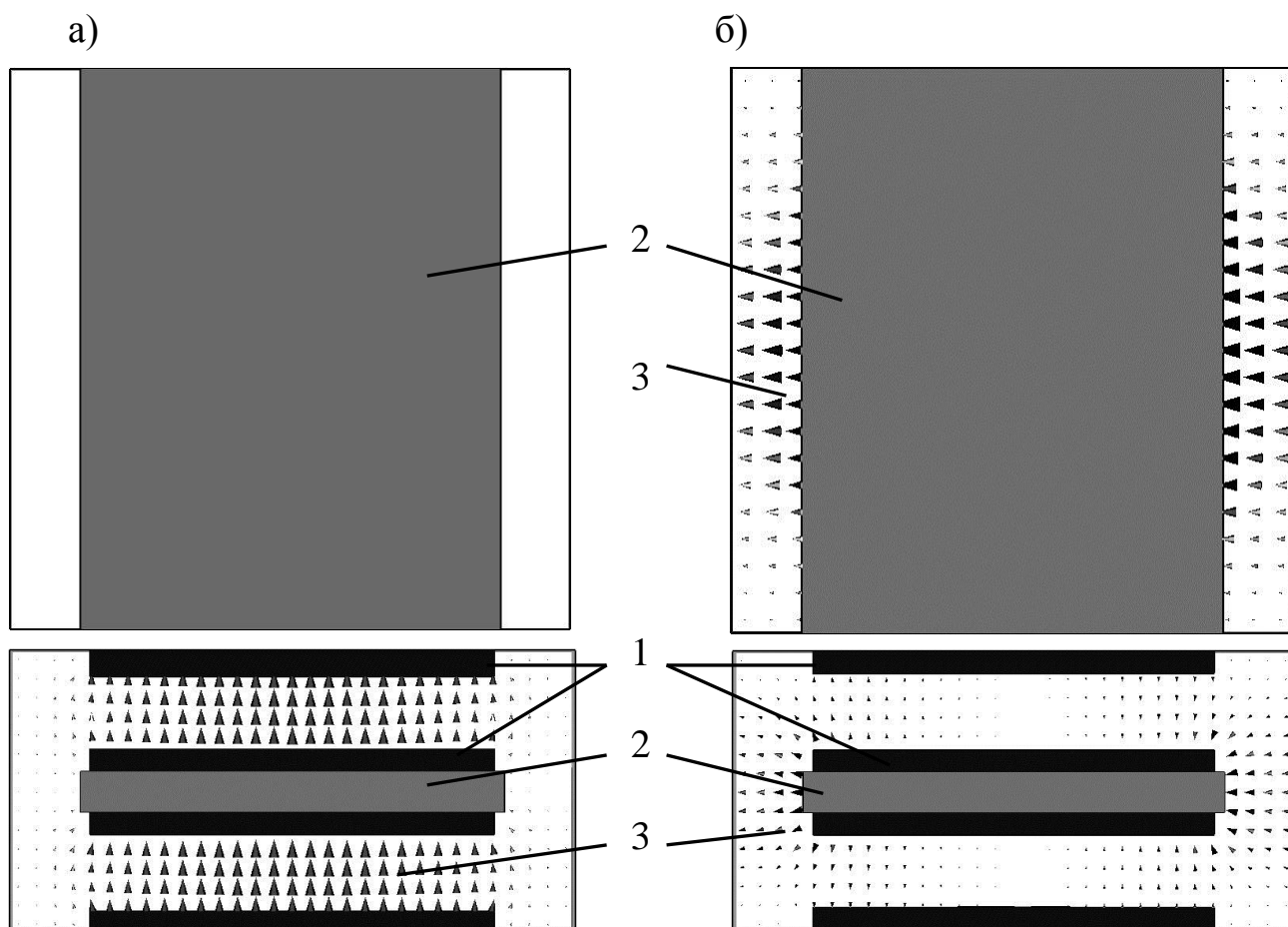


Рис. 4. Зависимость частоты первых трех видов колебаний в двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами от диаметра пролетной трубы

Показано, что в двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами высокочастотный противофазный вид колебаний является (как и синфазный вид) резонансом типа H_{111} в коаксиальном резонаторе. Максимумы электрического поля этого вида колебаний находятся в районе связей между зазорами. Распределение напряженностей электрических полей синфазного и высокочастотного противофазного видов колебаний в двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами показано на рис. 5.

Указанные значения разделений частот синфазного и нерабочих видов колебаний определены без учета связи двухзазорного резонатора с фильтровой системой. В работе обсуждены различные варианты связи двухзазорного резонатора с первым пассивным резонатором. Показано, что для равномерной нагрузки обоих высокочастотных зазоров двухзазорный резонатор должен быть связан с пассивным резонатором (или выходным волноводом) щелью связи расположенной в области связи между зазорами.

Также определено, что такой способ вывода энергии нагружает синфазный вид колебаний, что приводит к уменьшению его частоты, при этом противофазные виды не связываются с выходным волноводом (или пассивным резонатором) и их частота не изменяется. Определено, что разделение частот между низкочастотным противофазным и синфазным



- 1 – пролетная труба,
- 2 – центральная перемычка,
- 3 – напряженность электрического поля

Рис. 5. Распределение напряженностей электрических полей в двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами а) синфазный вид, б) ВЧ противофазный вид

видами колебаний уменьшается на $300 \div 400$ МГц при нагрузке на выходную фильтровую систему с полосой 350 МГц. Таким образом, при введении нагрузки разделение частот между низкочастотным противофазным и синфазным видами колебаний в двухзазорном резонаторе с одной связью между зазорами уменьшается до 11% и до 24 % в двухзазорном резонаторе с двумя связями между зазорами.

В работе рассмотрены различные пути увеличения разделений частот первых трех видов колебаний. Определено, что значительно увеличить разделение частот между синфазным и нерабочими видами колебаний можно только при уменьшении диаметра пролетной трубы. Показано, что

в двухзазорном резонаторе уменьшение диаметра пролетной трубы менее половины длины волны дает возможность применять конструкцию центральной перемычки различной формы. Проведенные исследования собственных частот в двухзазорном резонаторе показали, что применение различных конструкций центральной перемычки позволяет изменять разделение частот между рабочим синфазным и соседними видами колебаний. В двухзазорном резонаторе с диаметром пролетной трубы 0,42 от длины волны автором предложено изготавливать центральную перемычку с пазом в районе связи двухзазорного резонатора с первым пассивным резонатором и с выступом с противоположной стороны перемычки (рис. 6).

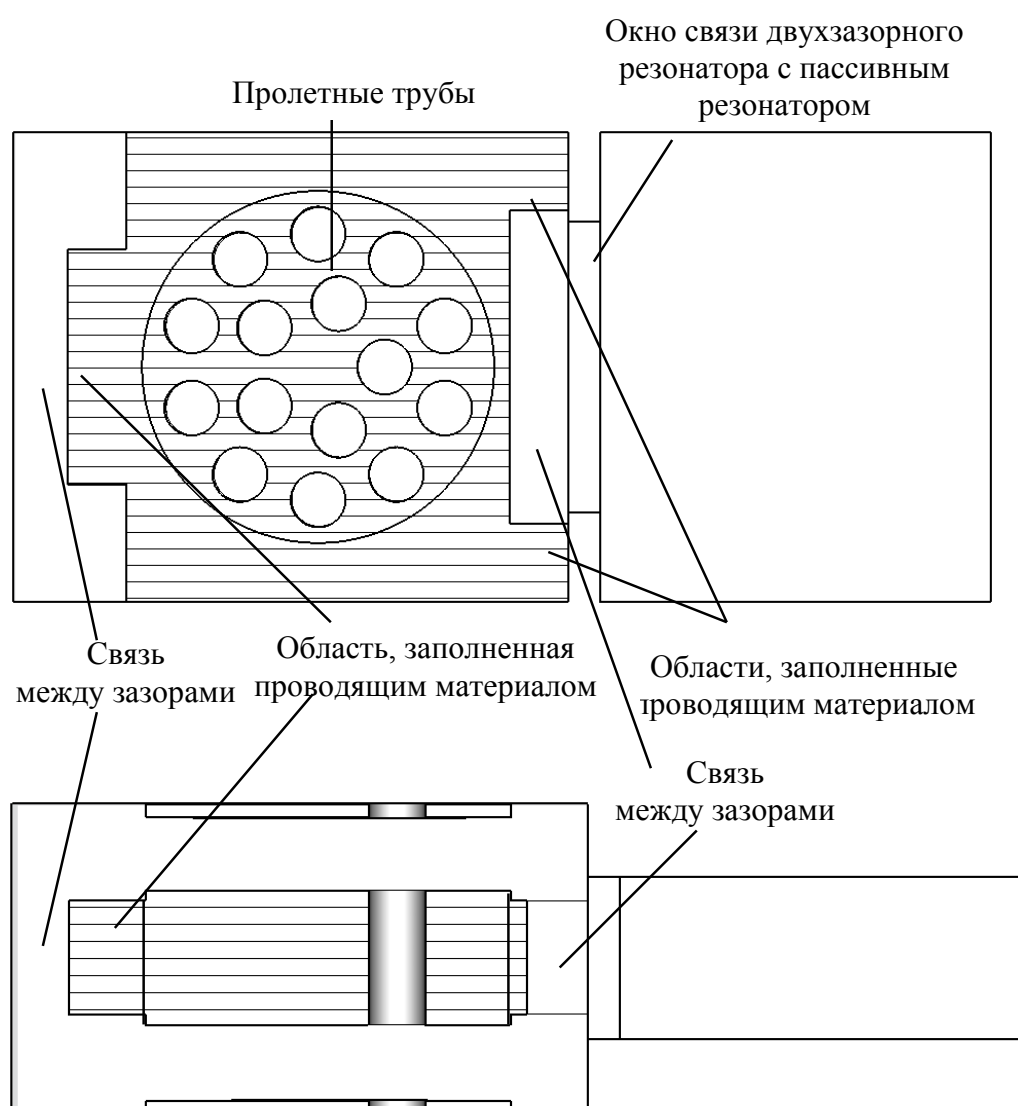


Рис. 6. Конструкция двухзазорного резонатора с перемычкой, содержащей выступ и паз

Проведены исследования разделения частот между первыми тремя видами колебаний при различных расстояниях между центрами ВЧ зазоров.

Известно, что каждому ускоряющему напряжению (напряжению катода) для обеспечения фазовых условий взаимодействия электронного потока с полем резонатора соответствует оптимальное расстояние между центрами ВЧ зазоров. С учетом этого, определено, что с увеличением напряжения катода за счет увеличения ширины центральной перемычки, при прочих равных условиях, разделение частот между первыми тремя видами колебаний уменьшается.

Экспериментально показана невозможность создания мощных широкополосных клистронов с одной и двумя связями между зазорами выходного активного резонатора с диаметров пролетной трубы близкой к половине длины волны. Также установлено, что введение поглотителя в двухзазорный резонатор не позволяет создавать клистроны с уровнем средней выходной мощности порядка 10 кВт.

Расчетно-экспериментальным путем определено, что в мощных клистронах с выходной средней мощностью более 10 кВт, импульсной мощностью 100-200 кВт полоса рабочих частот 6 - 7 % достигается применением двухзазорного выходного резонатора, в котором увеличение разделения частот рабочего синфазного вида колебаний и нерабочих противофазных (низкочастотного и высокочастотного) видов колебаний обеспечивается выбором диаметра пролетной трубы менее 0,42 от длины волны.

В **главе 4** рассмотрены (созданные при участии автора в качестве заместителя главного конструктора) результаты разработки мощных широкополосных многолучевых клистронов на пространственно-развитых резонаторах.

Создан ряд мощных широкополосных клистронов на пространственно-развитых резонаторах. В клистронах использовались резонаторы на втором виде колебаний с многолучевыми пролетными трубами. На базе данной конструкции были созданы мощные – более 600 кВт импульсной выходной мощности и широкополосные – до 6 % клистроны. В таблице 1 приведены основные характеристики разработанных клистронов.

Созданные клистроны имеет схожую конструкцию. Основными узлами клистроны являются: резонаторная система, ввод и вывод энергии, электронная пушка, коллектор и электроразрядный насос. Резонаторная система включает в себя корпус с активными резонаторами, катодный

Таблица 1. Основные параметры разработанных клистронов

Параметр\Прибор	КФ-3-1К	КФ-3-1КМ	КФ-3-2КМ	Амарант	Вакуум
Электрические параметры					
Рабочая длина волна, см	5,5	5,5	5,5	4	5,2
Рабочая полоса, МГц	175	350	200	180	250
Рвых. имп., кВт	170-300	170-300	450-700	90-150	200-300
Рвых. ср., Вт	11,1	11,1	12	15-25	11,1
Длительность импульса, мкс	1-512	1-512	1-150	1,6-500	1,6-500
Минимальный КПД, %	24	20	30	30	22
Напряжение луча, кВ	20-25	22-26	30-33	13-15	22-26
Напряжение модуляции, кВ	4,5-5,5	5-5,5	7-7,5	3,5-4,5	5-5,5
Конструктивные характеристики					
Тип резонаторов	Н ₂₀₁ , с многолучевыми пролетными трубами				
Вид колебаний	2	2	2	2	2
Число лучей	30	30	30	30	30
Диаметр пролетной трубы, мм	22,5	22,5	22,5	20	22,5
Количество резонаторов	7	9	7	8	9
Масса, кг	28	32	28	30	32

и коллекторный полюса, систему охлаждения резонаторного блока, выходную систему и систему волноводов. Выходная система клистронов состоит из активного резонатора, работающего на втором виде колебаний и двух или трех пассивных резонаторов.

Для фокусировки электронных потоков в клистропах используется соленоид, который создает необходимое магнитное поле порядка 2000 Гс. Применение соленоида позволило добиться токопрохождения в статическом режиме 95-98 %, в динамическом режиме 85-96 %. Общий вид клистропа КФ-3-1К показан на рис. 7.

В работе также рассмотрены вопросы и обсуждены меры по обеспечению электрической прочности. Для достижения этой цели в конструкцию и технологию изготовления электронной пушки и прибора в целом заложен ряд решений.

Одной из основных мер по повышению электрической прочности в созданных клистропах явилось применение резонаторов на втором виде колебаний. Это позволило уменьшить напряженности электрического поля в межэлектродных промежутках за счет увеличения числа лучей, а также за счет снижения удельных тепловых нагрузок на элементы конструкции

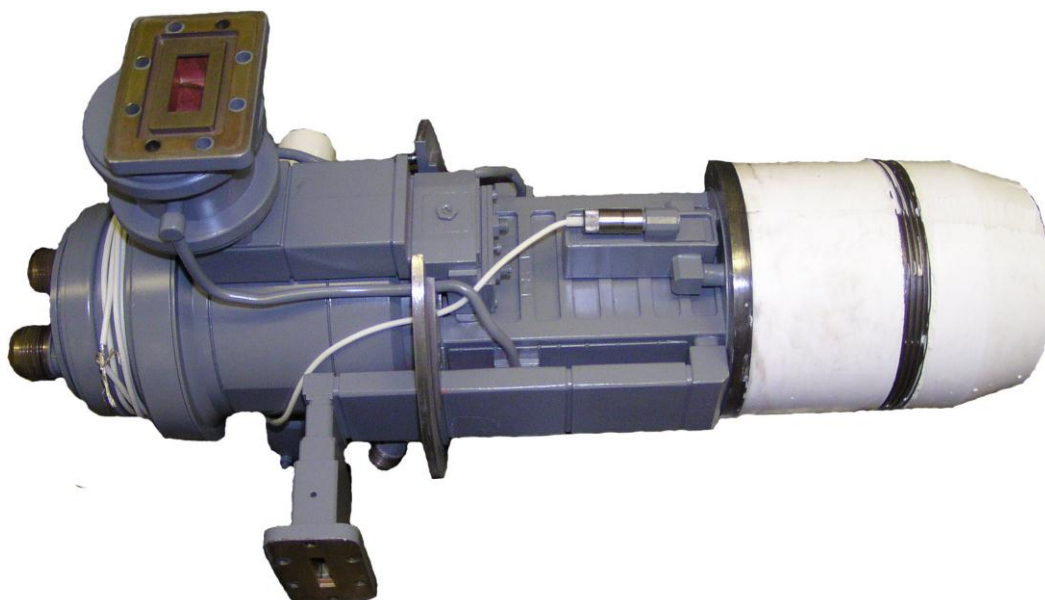


Рис. 7. Общий вид клистрона КФ-3-1К

уменьшить локальные газовыделения, возникающие при работе в режиме длинного импульса.

Применение резонаторов на втором виде колебаний приводит к увеличению размеров катодно-подогревательного узла, а также мощности накала катода. Определено, что в процессе откачки и совмещенной термовакуумной обработки катода в приборе с мощным источником накала катода может происходить увеличение поверхностного газосодержания на 2-3 порядка относительно приборов с низкой тепловой нагрузкой пушки прибора. Прежде всего, это связано с локальным повышением температуры в области электронной пушки во время термовакуумной обработки катода. Показано, что для того, чтобы избавиться от “перегрева” катодной ножки обработку катода необходимо проводить при сниженной температуре на корпусе прибора, что позволяет значительно снизить газовыделение в процессе предварительной тренировки и, самое важное, в процессе динамических испытаний клистрона.

В работе исследована возможность тренировки клистронов импульсами наносекундной длительности. Показана эффективность тренировки комбинацией тренировки наносекундными импульсами и обычной тренировки методом разряда емкости через ограничительное сопротивление.

Отмечено, что кроме приведенных мер по увеличению электрической прочности в разработанных клистродах применены традиционные процессы

и конструктивные решения: улучшение чистоты поверхности электродов и степени их обезгаженности; уменьшение количества свободных частиц в объеме прибора; снижение окисления поверхностей деталей; повышение степени вакуума в приборе, уменьшение площади высоковольтных электродов, предварительная высоковольтная слаботочная тренировка.

В **заключении** подведены итоги диссертационной работы. Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведено исследование взаимосвязей между конструкцией резонаторной системы, электронно-оптической системы и выходными параметрами клистрона. Рассмотрены факторы, ограничивающие увеличение характеристического сопротивления.

2. Предложен принцип конструирования линейного резонатора, позволяющий выравнивать электрическое поле в зазорах взаимодействия парциальных пролетных каналов резонатора.

3. Проведены исследования электродинамических характеристик тороидального, кольцевого и линейного типов резонаторов при одинаковом числе лучей и одинаковом расстоянии между центрами пролетных каналов. Определено, что характеристическое сопротивление резонаторов при одинаковом числе пролетных каналов и одинаковом расстоянии между центрами каналов практически не зависит от типа резонатора.

4. Проведен комплекс исследований МЛК с различными вариантами конструкций резонаторных систем на высших видах колебаний. Определено, что в мощных многолучевых широкополосных клистронах в средней части сантиметрового диапазона длин волн с резонаторами на высших типах волн и многолучевыми пролетными трубами, при одинаковом числе лучей с увеличением вида колебаний характеристическое сопротивление резонаторов и КПД клистронов падает.

5. На основе расчетных и экспериментальных данных определена конструкция резонаторной системы с активными резонаторами на втором виде колебаний. Определено, что в многолучевых клистронах с выходной средней мощностью более 10 кВт и импульсной 200-600 кВт полоса рабочих частот до 6 % достигается использованием активных резонаторов с рабочим типом колебаний H_{201} с диаметром пролетной трубы $(0,4 \div 0,45)\lambda$, где λ длина волны.

6. Предложены пути выравнивания электрического поля в зазорах взаимодействия входного и выходного резонаторов путем использования резонаторов несимметричной формы, при которой расстояние от стенки резонатора со щелями связи до пролётной трубы меньше, чем расстояние от противоположной стенки резонатора до пролётной трубы.

7. На основе расчётных и экспериментальных данных определены принципы построения выходной фильтровой системы с активными резонаторами с рабочим типом колебаний H_{201} .

8. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены ограничения при использовании двухззорного выходного резонатора с диаметром пролетной трубы порядка 0,5 от длины волны. Обнаружено наличие высокочастотного противофазного вида колебаний вблизи рабочего синфазного вида в двухззорных резонаторах с диаметром пролетной трубы близким к половине длины волны. Предложены принципы конструирования мощных широкополосных клистронов с двухззорным выходным резонатором.

9. Предложенные принципиальные и конструктивные решения были внедрены при разработке и последующем выпуске 5 типов мощных широкополосных МЛК на пространственно-развитых резонаторах.

Публикации по теме диссертации

1. Пугнин В.И., Юнаков А.Н., Мощные многолучевые клистроны. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 2003, № 1(481). с. 31-39.

2. Пугнин В.И., Юнаков А.Н., Проблемы создания мощных широкополосных многолучевых клистронов. // Радиотехника, 2, 2004, с. 17-21.

3. Корепин Г.Ф., Пугнин В.И., Юнаков А.Н., Определение источника газовой выделенности в процессе высоковольтной тренировки ЭВП, // Научно-технические технологии, 5, 2005, т.6, с.47 – 50.

4. Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Мощные клистроны для радиолокации и научных исследований // Радиопромышленность, 2008, Вып. 2, стр. 116-122.
5. Корепин Г.Ф., Юнаков А.Н. Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП //Вакуумная техника и технология, 2, 2010, т.10 с.71-76.
6. В.П. Панов, А.А., Шишков, В.И. Юркин, В.П. Рыбачек, П.М. Мелешкевич, В.И. Пугнин, Е.А. Стройков, А.Н. Юнаков О создании приборов с большими углами пролета электронов // Вестник РГРТУ, №2, 2010г. с. 110-113
7. Корепин Г.Ф., Юнаков А.Н. Поверхностное газосодержание и термовакуумная обработка электронной пушки высоковольтных ЭВП // Материалы 12 научно- технической конференции «Вакуумная наука и техника», Судак, 2005. с 89-93.
8. Корепин Г.Ф., Юнаков А.Н. Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП. // Тезисы докладов научно-технической конференции “Вакуумная техника и технология - 2010”, Санкт-Петербург, 2010г. с. 56.
9. В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков, Т.Н. Бурдина, Многолучевой прибор О-типа. // Патент РФ № 2244980.
10. В.И. Пугнин, А.Н. Юнаков, СВЧ прибор О-типа. // Патент РФ № 2328053.
11. П.М. Мелешкевич, В.И. Пугнин, Е.А. Стройков, А.Н. Юнаков, В.П. Панов, А.А., Шишков, В.И. Юркин, В.П. Рыбачек Способ генерации СВЧ колебаний и устройство для его осуществления (варианты). // Патент РФ № 2391739.

Подписано в печать 28.01.2011
Формат 60x80/16. Объем 1 усл.-печ. лист.
Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэйшнл»

