

На правах рукописи

САНДАЛОВ Александр Николаевич

**Нелинейные явления при усилении электромагнитных волн
интенсивными электронными потоками
в многолучевых микроволновых усилителях**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Москва – 2006

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный консультант: доктор физико–математических наук, профессор Канавец Василий Иванович.

Официальные оппоненты:

Доктор физико–математических наук, профессор Кузьменков Леонид Стефанович,

Доктор физико–математических наук, ведущий научный сотрудник Майоров Сергей Алексеевич,

Доктор физико–математических наук, профессор Солнцев Виктор Анатольевич.

Ведущая организация: Московский инженерно - физический институт (государственный университет).

Защита диссертации состоится “ 21 “ сентября 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета № Д 501.001.66 в МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, физический факультет, ауд. № 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 г. Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, физический факультет.

Автореферат разослан “ 21 “ июля 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико–математических наук

Ершов А.П.

Введение, актуальность темы диссертации. Проблема создания мощных генераторов и усилителей когерентного микроволнового излучения занимает значительное место в современной радиофизике.

Использование источников мощного микроволнового излучения в ускорительной технике, радиолокации и связи, гражданской и военной промышленности требует непрерывного повышения их выходных характеристик: выходной мощности, коэффициента полезного действия, расширения полосы усиливаемых частот.

Практическая реализация этих задач представляет собой сложную научную проблему, решение которой возможно лишь с привлечением численных методов исследования на базе современной вычислительной техники, подробного теоретического анализа физических процессов, происходящих в микроволновых генераторах и усилителях, и их экспериментального изучения.

Повышение выходной мощности микроволновых приборов неразрывно связано с увеличением энергии электронных потоков. Переход в релятивистскую область энергий, где исследования высокоэффективного взаимодействия приобретают другое качество, требует применения новых физических идей и технических решений. Разработка и создание релятивистских клистронных усилителей позволит значительно повысить выходные характеристики приборов и расширить область их применения.

Коэффициент полезного действия серийных микроволновых приборов с продольным взаимодействием не превышает 50%, и лишь отдельные экспериментальные образцы узкополосных клистронных усилителей имеют эффективность более 60%. Поэтому весьма актуальна разработка и создание усилительных устройств с коэффициентом полезного действия более 70%.

Расширение полосы усиления мощных клистронных усилителей до 10% – 14% стало особенно важным в последние годы в связи с необходимостью решения задач, связанных с передачей информации и решением энергетических проблем.

Основным элементом микроволнового прибора является электронный поток, важной характеристикой которого служит первеанс P , определяемый отношением тока пучка I_0 к ускоряющему напряжению V_0 : $P = I_0 / V_0^{3/2}$. Первеанс определяет меру интенсивности потока. Интенсивными считаются потоки, у которых первеанс принимает значения, большие $10^{-8} - 10^{-7} \text{ A/V}^{3/2}$. Ввиду малости численного значения первеанса пользуются более удобной величиной – микропервеансом P_μ , определяемой как: $P_\mu = P \cdot 10^6$. Поэтому интенсивными будут потоки с

микропервеансом P_{μ} более 0,01 - 0,1, а в интенсивных потоках важную роль играют силы пространственного заряда.

В мощных микроволновых приборах, таких как клистронный усилитель, лампа бегущей волны (ЛБВ) и др., микропервеанс обычно лежит в интервале от 0,5 до 10. Физические процессы, протекающие в этих приборах, становятся сильно нелинейными, а это накладывает жесткие требования на теоретические методы их анализа.

Увеличение выходной мощности микроволнового прибора $P_{\text{вых}} = I_0 V_0 = P V_0^{5/2}$ происходит за счет увеличения либо напряжения V_0 , либо первеанса электронного пучка P . Поскольку повышение ускоряющего напряжения нежелательно, то необходимо увеличить микропервеанс электронного потока. Эта возможность была реализована в СССР С.А. Зусмановским и С.В. Королевым переходом к многолучевым электронным потокам и в дальнейшем П.В. Невским переходом к многолучевым многоствольным электронным потокам.

Исследованию физических процессов в мощных микроволновых приборах были посвящены работы многих авторов: в клистронных усилителях: И.Г. Артюха, В.И. Канавца, Ю.А. Кацмана, А.А. Кураева, Д.М. Петрова, А.С. Победоносцева, А.З. Хайкова, и др.; в ЛБВ: Л.А. Вайнштейна, А.М. Каца, В.М. Лопухина, В.А. Солнцева, Д.И. Трубецкова, М.Б. Цейтлина и др. Однако вопросы высокоэффективного взаимодействия до сих пор изучены недостаточно полно.

Основная цель настоящей диссертационной работы заключается в развитии теории самосогласованного взаимодействия переходного вынужденного излучения электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками, основанной на учете динамики интенсивности пространственного заряда и экспериментальных исследованиях нелинейного высокоэффективного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками в мощных многолучевых клистронных усилителях.

Научная новизна результатов диссертационной работы. Развита теория высокоэффективного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками, основанная на учете динамики интенсивности пространственного заряда, которая позволила выявить ряд эффектов, открывающих пути реализации новых классов мощных многолучевых клистронных усилителей в том числе:

Расслоения электронного потока и его влияние на группирование электронов, способы его компенсации путем воздействия на электронный поток полями резонаторов основной частоты, разнозазорных резонаторов и резонаторов высших гармоник.

Динамической расфокусировки электронного потока и её влияние на

эффективность группирования, приводящей к повышению эффективности многорезонаторных клистронов.

Принцип высокоэффективного группирования в мощных многолучевых клистронных усилителях на основе пучков с пониженным значением первеанса, позволяющий реализовать приборы с полосой усиливаемых частот более 10% и эффективностью более 50%.

Программные комплексы Клистрон – МГУ и Арсенал - МГУ, созданные автором и под его руководством, позволяют методами вычислительного эксперимента провести анализ нелинейного взаимодействия электромагнитных волн с полями электродинамических структур в мощных клистронных усилителях от катода до коллектора.

На основе развитой теории и результатов вычислительного эксперимента предложены новые модели и принципы построения многолучевых клистронных усилителей.

Компенсация расслоения и реализация динамической расфокусировки электронного потока позволяют получить КПД 70% и более. Эксперименты, проведенные в отраслевых НИИ, привели к созданию многолучевых клистронных усилителей с указанной эффективностью. В этих экспериментах подтверждено действие резонаторов на второй гармонике основного сигнала в узкополосном режиме на эффективность устройства в целом, а в режиме широкополосного усиления на форму частотной характеристики.

Впервые в мире разработан релятивистский клистронный усилитель с термоэмиссионным катодом и периодической фокусирующей системой на постоянных магнитах. Испытания клистрона, проведенные в ИЯФ СО РАН, позволили получить на частоте 7 ГГц усиление входного сигнала до 50 дБ при эффективности более 50 % и выходной мощности около 2 МВт.

На многолучевом релятивистском генераторе получена выходная мощность более 30 МВт в трехсантиметровом диапазоне длин волн с длительностью импульса более 20 нс и 10 МВт на длине волны 1,5 см.

Впервые реализованы релятивистские клистронные усилители, работающие на взрывоэмиссионных катодах. На релятивистском клистроне КМТ-1 получено усиление 26 дБ.

Обоснована возможность создания сверхмощного релятивистского многолучевого клистронного усилителя с выходной мощностью более 1 ГВт и длительностью импульса до 1 мкс.

Научная и практическая значимость. Разработаны математические модели и методы численного анализа нелинейных явлений в мощных многолучевых микроволновых приборах, позволяющие учесть кулоновское взаимодействие заряженных частиц, их трехмерное движение в электрических и магнитных полях при релятивистских и

нерелятивистских скоростях электронов и переменной структуре электромагнитного поля. Использование этих моделей послужило основой для реализации приборов с высокой эффективностью.

Созданные на основе этих численных моделей программные комплексы Клистрон – МГУ и Арсенал – МГУ используются в России, Франции, Японии и Китае для разработки и конструирования мощных и сверхмощных узкополосных и широкополосных клистронных усилителей.

На основе проведенных исследований высокоэффективного группирования электронов и энергообмена электромагнитного поля и электронного пучка в выходной системе с учетом кулоновского взаимодействия, влияния эффектов расслоения и динамической расфокусировки электронного потока созданы многолучевые клистронные усилители с эффективностью более 70%.

Физические принципы группирования электронов и энергообмена в широкой полосе усиливаемых частот использованы для разработки и создания широкополосных многолучевых клистронных усилителей. В длинноволновом диапазоне с полосой усиливаемых частот до 14% и в коротковолновом – до 8%.

Созданные на базе проведенных экспериментальных исследований релятивистские клистронные усилители могут быть использованы для проведения физических исследований в различных областях науки и техники.

Автор защищает следующие положения:

1. Развитие теории самосогласованного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками, основанной на учете динамики интенсивности пространственного заряда и экспериментальных исследованиях нелинейного высокоэффективного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками в мощных многолучевых клистронных усилителях.

2. Вычислительный эксперимент по анализу нелинейного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками на базе дискретных моделей электронного потока, который выявил ряд новых эффектов, включая эффекты расслоения и динамической расфокусировки электронного пучка. На его основе разработаны принципы высокоэффективного группирования и энергообмена в мощных узкополосных и широкополосных многолучевых клистронных усилителях.

3. Способы компенсации эффекта расслоения электронного пучка воздействием на электронный поток полями резонаторов основной частоты, их высших гармоник, разнозазорных резонаторов; влияния эффекта динамической расфокусировки электронного потока и их совместную реализацию для высокоэффективного группирования и энергообмена в многолучевых клистронных усилителях.

4. Разработку моделей, принципов построения и экспериментальную реализацию нерелятивистских и релятивистских многолучевых клистронных усилителей и многолучевого релятивистского генератора сантиметрового диапазона длин волн.

5. Экспериментальную реализацию принципа высокоэффективного группирования и энергообмена с учетом кулоновского взаимодействия, влияния эффектов расслоения и динамической расфокусировки электронного потока, приведшую к созданию многолучевых клистронных усилителей с КПД более 70%.

Апробация работы:

Материалы диссертации изложены более чем в 150 работах, среди которых 70 статей, и 5 обзоров, опубликованных в центральных журналах СССР, России и за рубежом, и более чем 80 докладов в трудах конференций, книге лекций по электронике СВЧ.

Материалы, изложенные в диссертации, доложены и опубликованы в трудах Всесоюзных, Всероссийских и Международных конференций, семинаров, симпозиумов и рабочих совещаний: на Всесоюзных научных сессиях, посвященных Дню Радио; Всесоюзных семинарах по колебательным явлениям в потоках заряженных частиц; Ломоносовских чтениях МГУ; Всесоюзных семинарах по методам учета сил пространственного заряда в электронных приборах СВЧ; на 3-й и 10-й зимней школе-семинаре по электронике СВЧ; Всесоюзных семинарах по релятивистской электронике; Симпозиуме по сильноточной электронике; Всесоюзной школе-семинаре «Физика и применение микроволн»; 2-й конференции по высокотемпературной диагностике плазмы (США-1978); 4-й, 6-й и 9-й Международной конференции по сильноточным электронным и ионным пучкам (BEAMS) (Франция – 1981, Япония – 1986, США - 92); на 9-й конференции по ЛСЭ (США – 1987); на рабочих совещаниях по Линейным Коллайдерам (LC) (Япония – 1990, Россия – 1991, Япония –1995, Россия – 1997); на рабочих совещаниях по СВЧ источникам для Линейных Коллайдеров (RF) (Россия – 1992, США – 1994, Япония – 1996); на конференции по электромагнитным взаимодействиям (EUROEM – 1994, AMEREM – 1996), UHF (Россия – 1999, 2001); в Китае (2000, 2002); на Международном семинаре по современным проблемам вычислительной электродинамики – Санкт-Петербург 2004 г.

Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения, содержит 306 страниц текста, включающих 180 рисунков и библиографию из 600 наименований. Основные результаты диссертации опубликованы в 30 статьях, 23 докладах на конференциях, авторском свидетельстве на изобретение и книге лекций по электронике СВЧ [1-55].

Содержание диссертации

Во введении кратко описано современное состояние теории и практики разработки и создания мощных однолучевых и многолучевых клистронных усилителей. Особое внимание уделено методам и способам теоретического описания физических процессов, происходящих в мощных многолучевых клистронных усилителях при их практической реализации.

Содержится историческая справка по теоретическим и экспериментальным исследованиям, проведенным другими авторами. Кратко обсуждаются основные достижения в анализе нелинейных явлений при усилении электромагнитных волн интенсивными электронными потоками в многолучевых микроволновых приборах. Обосновывается необходимость проведения дальнейших исследований по повышению эффективности клистронных усилителей.

В первой главе описаны теоретические аспекты вычислительного эксперимента по взаимодействию интенсивного электронного потока и электромагнитного поля в мощных многолучевых микроволновых приборах и представлено описание физических процессов, происходящих в них. Основное внимание уделено нелинейным явлениям усиления сигналов в многолучевых клистронных усилителях.

Описываются типы интенсивных электронных потоков, способы их формирования и особенности прохождения в канале взаимодействия. Обсуждаются достоинства и недостатки однолучевых и многолучевых электронно-оптических систем и их реализация в широкополосных и узкополосных клистронных усилителях. Рассмотрена специфика фокусирующей системы для различных областей применения приборов.

Микроволновые приборы на продольном взаимодействии: мощный клистронный усилитель (рис. 1а), односекционная и многосекционная ЛБВ (рис. 1б, в) и твистрон (рис. 1г) имеет четыре основных конструктивных элемента: электронную пушку, область взаимодействия, коллектор и магнитную фокусирующую систему. Эти приборы имеют общий основной элемент – резонатор. Это может быть одноззорный, двухззорный либо многоззорный резонатор в клистронном усилителе, либо система связанных резонаторов в мощных ЛБВ и «сороконожка» или «клеверный лист» в твистроне.

Возможен и гибридный вариант (рис. 1д), который на входе содержит секцию ЛБВ или многоззорный резонатор, обеспечивающие ввод широкополосного сигнала, и высокоэффективный нелинейный группирователь, а на выходе - распределенную секцию ЛБВ, обеспечивающую широкополосный съём энергии усиливаемого сигнала. В

последние годы нашли широкое применение именно эти гибридные варианты.

Электронные пушки, системы фокусировки электронного пучка, коллекторы и окна ввода и вывода энергии являются общими для всех приборов с продольным электронным потоком. Главное отличие заключено в области взаимодействия.

В микроволновых приборах с продольным взаимодействием могут протекать физические процессы,

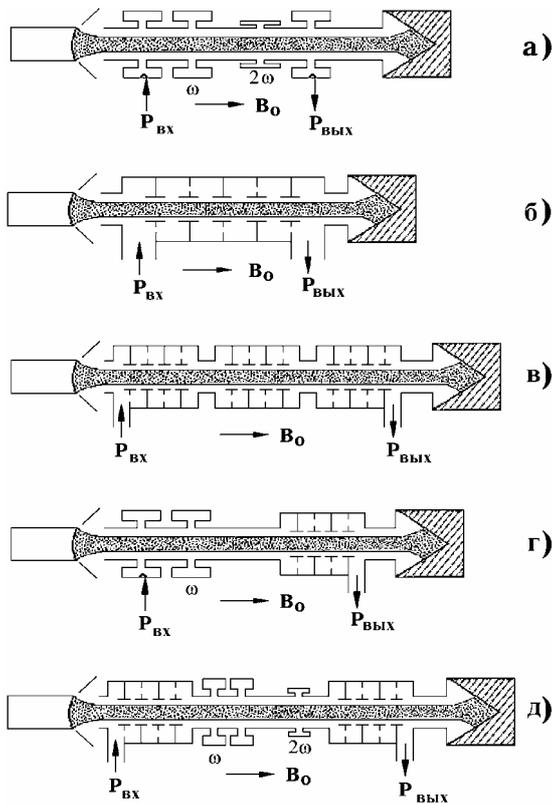


Рис. 1. Схемы мощного клистронного усилителя (а), односекционной ЛБВ (б), многосекционной ЛБВ (в), твистрона (г) и гибридного прибора (д).

которые можно описывать линейной теорией в случае, например, многочастотного взаимодействия, слабонелинейной теорией в случае спиральной ЛБВ и ЛБВ на связанных резонаторах, работающей на границе полосы прозрачности, а также нелинейной теорией в случае мощных клистронных усилителей и ЛБВ. Сложные электродинамические структуры могут быть описаны методами эквивалентных схем: четырехполюсниками либо шестиполюсниками или, при прямом решении, уравнений Максвелла.

Приведены уравнения для линейной, слабонелинейной и нелинейной теорий микроволновых приборов. Описаны соответствующие дискретные модели учета влияния сил пространственного заряда для каждой из них и обоснована их применимость для различных режимов работы приборов с продольным взаимодействием.

Рассмотрены и обоснованы различные одномерные, двумерные и трехмерные модели электронного потока, которые применяются для анализа нелинейных и сильно нелинейных явлений в мощных многолучевых клистронных усилителях, описаны границы их применимости. Приведен краткий обзор программных комплексов, созданных другими авторами, используемых для расчетов микроволновых приборов.

В последние годы мощные клистронные усилители заняли ведущее место среди других микроволновых приборов. Отчетливо просматривается возможность дальнейшего увеличения выходной мощности при переходе к

релятивистским напряжениям электронного пучка и при использовании разных типов многолучевых конструкций.

Зависимость выходной мощности клистронных усилителей и

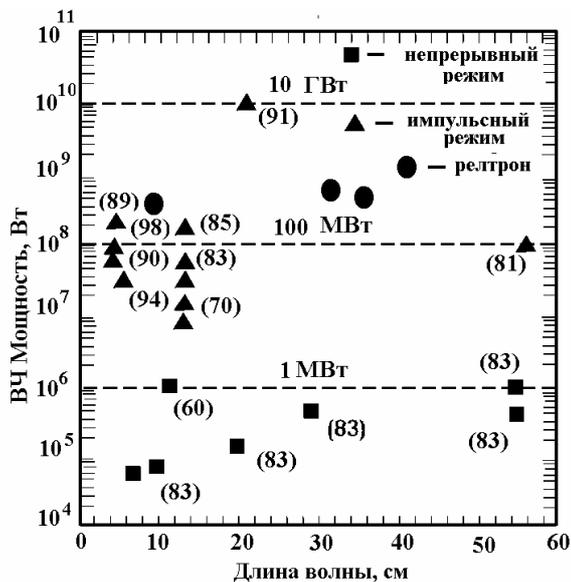


Рис. 2. Выходная мощность клистронных усилителей и релтронов в зависимости от длины волны излучения.

релтронов, работающих в непрерывном (квадрат) и импульсном (треугольник) режимах от длины волны излучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах (в скобках указан год публикации) представлена на рис. 2.

Основными параметрами, характеризующими мощность клистронного усилителя, являются ускоряющее напряжение V_0 и ток электронного потока I_0 . Они определяют микроперванс электронного потока P_μ , зная величину которого, можно определить значение КПД прибора η , при оптимально сконструированном клистронном усилителе.

Теоретическая зависимость КПД ($\eta, \%$) и экспериментальные данные

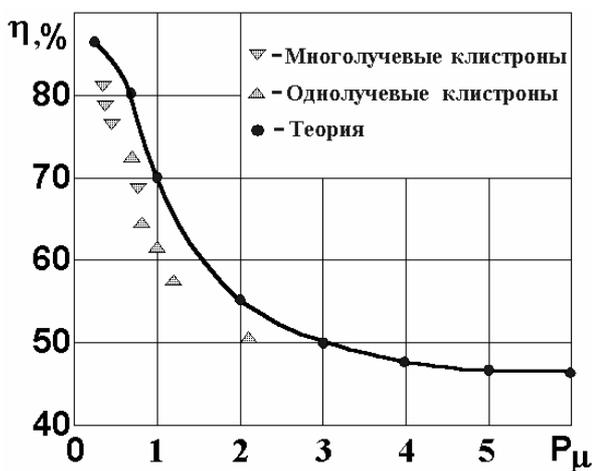


Рис. 3. Зависимость КПД $\eta \%$ от микроперванса P_μ электронного потока.

эффективности однолучевых и многолучевых клистронных усилителей от величины микроперванса P_μ на луч электронного потока представлены на рис. 3. Она была построена автором в 1975 году и опубликована в 1983 г. на основании оптимизационных расчетов, потребовавших создания программного комплекса КЛИСТРОН – МГУ, позволивших оценить возможность получения

максимального значения КПД при различных значениях микроперванса.

Экспериментальные данные соответствуют клистронным усилителям (однолучевым и многолучевым), созданным при участии автора, а также максимальным по КПД клистронным усилителям, разработанным в лабораториях мира.

Долгие годы, вплоть до опубликования сотрудниками НИИ Исток в 1993 году работ по многолучевым клистронам, данная зависимость на Западе считалась не соответствующей физике процессов клистронных усилителей, однако в настоящее время это наиболее популярная зависимость КПД от микропервеанса, отображающая реальные физические процессы, протекающие в однолучевых и многолучевых клистронных усилителях.

Зависимость КПД от микропервеанса является основополагающей при разработке и создании мощных узкополосных и широкополосных клистронных усилителей. Максимальная эффективность и полоса усиления клистронных усилителей достигаются при значениях микропервеанса менее 0,5, и оптимальном выборе длин труб дрейфа, электродинамических характеристик резонаторов и параметров сил пространственного заряда электронного пучка - ω_p/ω и $k = \alpha \cdot v_0/(\omega \cdot r_{\text{п}})$, где ω_p - плазменная частота бесконечно широкого электронного потока. α - решение трансцендентного уравнения для электронного пучка радиуса $r_{\text{п}}$ в трубе дрейфа радиуса $r_{\text{т}}$, v_0 - скорость электронного пучка. Параметр α изменяется от 1,2 до 2,0, и его обычно полагают равным 2 в одномерных моделях электронного потока, в то время как значение данного параметра играет важную, если не сказать определяющую роль при сравнительном анализе экспериментальных и теоретических характеристик мощных приборов.

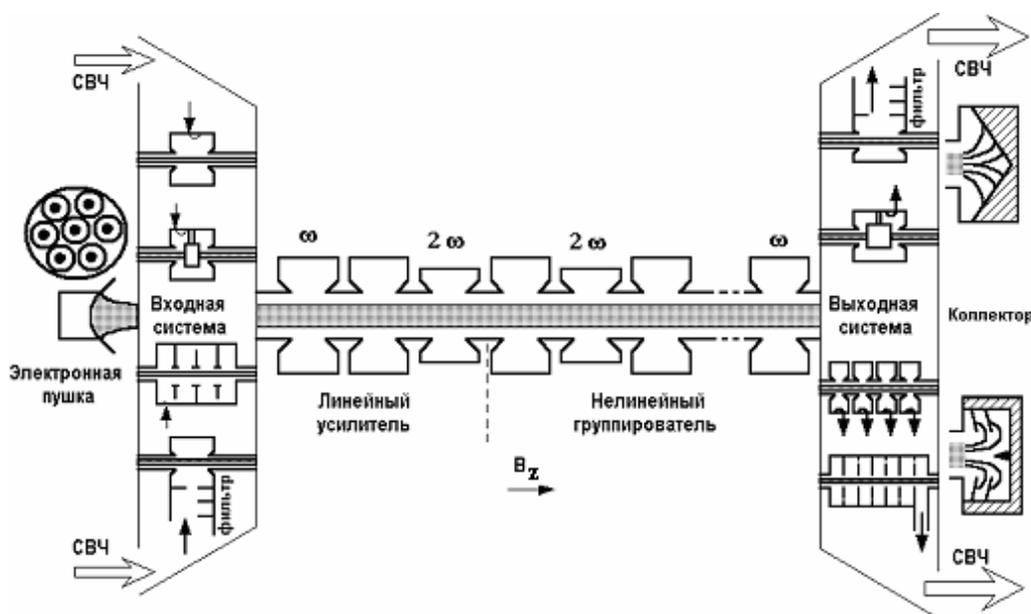


Рис. 4. Схема мощного многорезонаторного (однолучевого или многолучевого) клистронного усилителя.

Мощный клистронный усилитель содержит электронную пушку (однолучевую, либо многолучевую), сложную входную систему, линейный усилитель, нелинейный группирователь, сложную выходную систему, коллектор и фокусирующую систему (рис. 4).

В зависимости от области применений входная система может содержать однозачорный резонатор, двухзачорный резонатор, секцию связанных резонаторов, однозачорный или двухзачорный резонатор с фильтровой системой.

Линейный усилитель формирует полосу усиливаемых частот и требуемый уровень усиления и состоит из однозачорных или двухзачорных резонаторов, настроенных либо на основную частоту, либо её гармоники.

Нелинейный группирователь, ответственный за получение высокого значения КПД прибора и коррекцию его частотной характеристики, может включать однозачорные или двухзачорные резонаторы на основной частоте, либо её второй гармонике, резонаторы с внешней нагрузкой и настройками, разнозачорные резонаторы и т.д. Количество резонаторов и длина прибора определяют необходимый уровень усиления и значение выходной мощности.

Выходная система, как и входная, может содержать однозачорный резонатор, двухзачорный резонатор, секцию связанных резонаторов и однозачорный или двухзачорный резонаторы с фильтровой системой. Для вывода мощности используются один или два волновода.

Коллектор может быть конвекционным или с рекуперацией. Его конструкция должна обеспечивать равномерное распределение отработанных электронов по поверхности коллектора. Однако, в связи с наличием остаточного магнитного поля в переходной к коллектору области, это не всегда удается осуществить.

Конструкции коллекторов бывают аксиально-симметричными и несимметричными, что существенно затрудняет их теоретический анализ.

Фокусирующая система клистронного усилителя осуществляет формирование и транспортировку электронного потока либо соленоидальным магнитным полем (рис. 5а), либо магнитным полем на постоянных магнитах (рис. 5б-г). Фокусирующие системы на постоянных магнитах с периодическим или реверсным характером изменения амплитуды

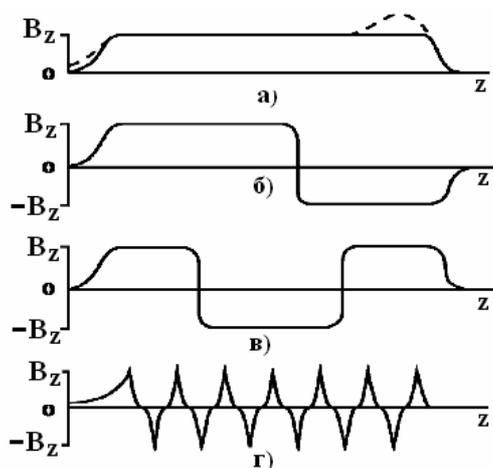


Рис. 5. Распределение амплитуды продольного магнитного поля B_z от продольной координаты z : соленоида (а) и фокусирующих систем на постоянных магнитах (б - г).

магнитного поля обычно используются в многолучевых конструкциях клистронных усилителей, обеспечивая относительно высокие значения величины токопрохождения электронного потока в трубе дрейфа.

Максимальное токопрохождение электронного пучка в статическом и динамическом режимах работы обеспечивается однолучевой конструкцией клистронного усилителя при фокусировке соленоидальным магнитным полем.

Трубы дрейфа должны обеспечивать транспортировку электронного пучка без токооседания на стенки электродинамической структуры. Коэффициент заполнения трубы дрейфа электронным пучком обычно равен $\kappa = r_{\text{п}}/r_{\text{т}} = 0,7-0,8$. Он зависит от величины фокусирующего магнитного поля, которое равно $B = B_z/B_{\text{Br}} = 2,0-3,0$, где B_{Br} - величина Бриллюэновского магнитного поля, минимального магнитного поля, необходимого для фокусировки электронного потока.

В мощных клистронных усилителях, особенно в приборах непрерывного действия, проблема формирования и транспортировки электронного потока стоит достаточно остро, и для обеспечения 100% токопрохождения, или близкого к этому значению, могут быть использованы трубы дрейфа переменного диаметра, последовательно расширяющиеся к выходной системе. Однако это приводит к неустойчивости электронного пучка, которая должна быть тщательно проанализирована.

При использовании в клистронных усилителях периодической фокусировки на постоянных магнитах и реверсной фокусировки, которые значительно изменяют характер формирования, транспортировки и токооседания электронного потока, по сравнению с соленоидальной фокусировкой, необходимо проведение тщательного теоретического анализа, учитывающего профиль фокусирующего магнитного поля и его влияние на динамический режим работы прибора.

Поэтому для исследования высокоэффективных клистронных усилителей необходимо анализировать физические процессы во всех его частях от катода до коллектора. Чтобы реализовать высокую эффективность в мощных клистронных усилителях необходимо подробное исследование нелинейных процессов протекающих в электронной пушке, линейном усилителе, нелинейном группирователе, выходной секции и коллекторе. Для этих целей на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова были разработаны программные комплексы Клистрон – МГУ и Арсенал – МГУ.

Программный комплекс Клистрон - МГУ 1,5–мерный. Взаимодействие электронного потока и электромагнитного поля реализовано на основе дисково-кольцевой модели электронного пучка. Клистрон – МГУ был создан автором для исследования физических процессов и конструирования мощных узкополосных и широкополосных клистронных усилителей с высоким КПД.

Данный программный комплекс прошел тридцатилетнюю проверку в ходе конструирования однолучевых и многолучевых клистронных усилителей различных модификаций, последовательно совершенствуясь и усложняясь. Клистрон – МГУ является первым программным комплексом, позволившим провести исследования влияния «эффекта расслоения» на процессы группирования электронов в многорезонаторных клистронных группирователях. С его помощью были разработаны и созданы однолучевые и многолучевые высокоэффективные клистронные усилители, как узкополосные, так и широкополосные. На его основе в МГУ был создан 2,5 – мерный программный комплекс Арсенал – МГУ, разработанный В.Е. Родякиным под руководством автора.

Арсенал-МГУ-2,5-мерный позволяет анализировать клистронные усилители, содержащие электронные пушки, как термоэмиссионные, так и на эффекте взрывной эмиссии, линейный усилитель и нелинейный группирователь, распределенные выходные структуры, конвекционные коллекторы и коллекторы с рекуперацией. Он основан на самосогласованном анализе движения заряженных частиц в электромагнитных полях при представлении электронного потока в виде «крупных» частиц. Арсенал - МГУ используется для моделирования физических процессов в клистронном усилителе от катода до коллектора при задании в качестве входных данных геометрических размеров прибора.

Программные комплексы Клистрон-МГУ и Арсенал-МГУ использовались и используются при разработке и создании высокоэффективных нерелятивистских и релятивистских клистронных усилителей в СССР и России, при конструировании мощных клистронных усилителей в Институте физики высоких энергий Японии (КЕК), в фирме Thomson Tubes Electroniques (Франция) и Институте Электроники КАН (Китай). Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных.

Во второй главе описаны физические процессы в многорезонаторных устройствах с продольным взаимодействием. В частности рассмотрены особенности кулоновского взаимодействия и расслоения электронного потока в мощных клистронных усилителях и мощных ЛБВ. Показано, что они существенно влияют на характер нелинейных процессов, протекающих в данных приборах.

Следует различать два предельных случая. При малых характерных длинах прибора $L \ll \lambda_q$ (где λ_q - плазменная длина волны) расслоение электронного пучка, в основном, определяется радиальным изменением высокочастотных полей электродинамических систем. Кулоновские силы обычно увеличивают расслоение потока. Лишь при определенных нелинейных режимах их можно использовать для уменьшения данного эффекта.

В приборах с большими характерными длинами ($L \geq \lambda_q$) скоростная модуляция достаточно мала, за исключением, может быть, конечного участка секции ЛБВ. Почти на всем протяжении секции процессы являются линейными или слабонелинейными. Длительное взаимодействие электронов приводит к установлению картины нормальных волн электронного пучка, характеризуемой общим для всех слоев распределением высокочастотных полей в поперечной области. Расслоение проявляется как результат неодинакового возбуждения нормальных волн и обмена энергией между ними.

В мощных микроволновых приборах применяют сложные электродинамические системы. В связанных структурах с положительной и отрицательной дисперсиями может быть получена искусственная область непрозрачности. Области непрозрачности возникают также при взаимодействии нескольких типов волн в одной электродинамической системе.

Использование искусственных областей непрозрачности весьма заманчиво, так как позволяет реализовать преимущества, присущие ЛБВ с запредельным усилением, когда мощный электронный пучок может «открыть» секцию ЛБВ и расширить полосу усиливаемых частот. Это также привлекательно использовать в клистронных усилителях высокого уровня выходной мощности, когда электронный пучок, возбуждая выходную секцию типа связанных резонаторов, обеспечит широкополосное усиление выходного сигнала.

Дискретное взаимодействие колебаний и волн в цепочках шестиполосников с электронным пучком было проанализировано матричным методом. При этом электронный поток мы заменяем цепочкой шестиполосников. Система, поток и сложная замедляющая структура представляют собой цепочку восьмиполосников. Матричный метод позволяет найти собственные волны ЛБВ, учесть граничные условия, получить различные характеристики устройства.

В мощных ЛБВ, на частотах вне рабочей полосы, иногда происходит паразитное самовозбуждение, которое можно ликвидировать вспомогательной замедляющей структурой (ЗС), вносящей дополнительные потери.

Среди возможных типов связи основной и дополнительной ЗС для внесения потерь наиболее удобна активная связь с затуханием, так как при этом отбор энергии сопровождается экспоненциальным изменением полей с расстоянием, и нет периодичности в перекачке энергии. Она может быть получена при взаимодействии двух электродинамических систем с положительной и отрицательной дисперсиями.

Экспериментальные исследования (проведены В.И. Юрьевым и А.И. Трифоновым) обнаружили значительное уменьшение ширины полосы

связи при малых зазорах ($\Delta < 5$ мм) основной и дополнительной ЗС. Расхождение между данными эксперимента и теории связано с тем, что при сильной связи между линиями происходит изменение структуры полей основных гармоник, что требует дальнейшего уточнения использованных при теоретическом анализе эквивалентных схем. Такое уменьшение области связи делает нецелесообразным использование систем связанных линий, в которых величина параметра нарастания волн $\alpha > 0,2$ см⁻¹.

Рассмотренная электродинамическая система была использована при создании макета ЛБВ. В разработанном приборе дополнительная система предназначалась для подавления паразитного самовозбуждения на обратной волне. Этот вид паразитных колебаний характерен для ЛБВ с ЗС "кольцо-стержень". Правильность настройки секций макета контролировалась измерениями $K_{стU}$ и затухания на частотах самовозбуждения.

Паразитное самовозбуждение изменяет ход амплитудных характеристик ЛБВ без дополнительной ЗС, приводит к своеобразному гистерезису при последовательном уменьшении, а затем увеличении

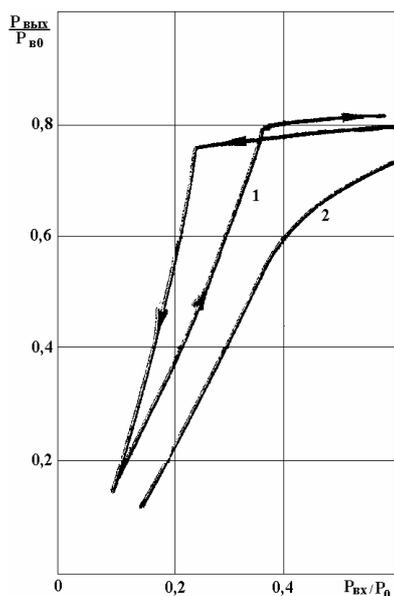


Рис. 6. Зависимость выходной мощности ЛБВ от входной мощности.

мощности сигнала на входе (рис. 6, кривая 1). С введением дополнительной ЗС гистерезис исчезает, амплитудная зависимость становится типичной для ЛБВ без самовозбуждения (рис. 6, кривая 2).

В теории многочастотных процессов микроволновых приборов наряду с методикой фундаментальной частоты успешно развивается метод близких частот, основанный на представлении сложного сигнала в виде квазигармонического колебания с медленноменяющимися амплитудой и фазой. Он пригоден для исследования весьма узкого спектра, когда свойства приборов не зависят от частоты. Преобразование сложных сигналов с дискретным спектром рассматривалось на основе приближенных теорий, характеризующихся упрощенным

рассмотрением сил кулоновского взаимодействия.

Нами была развита приближенная нелинейная теория приборов с продольным взаимодействием электронного потока и электромагнитного поля, основанная на разложении переменных величин в кратные ряды Фурье.

В качестве примера рассмотрим мощный пятирезонаторный клистрон, на вход которого подаются два сигнала с различными частотами.

Система аксиально-симметричная и фокусируется большим магнитным полем. Частоты сигналов ω_{10} и ω_{01} лежат в полосе пропускания прибора. Нелинейный характер процессов взаимодействия приводит к образованию на выходе клистрона сигнала со сложным дискретным спектром, частоты которого связаны соотношением $\omega_{nm} = n\omega_{10} + m\omega_{01}$, где n и m - целые числа ($n, m = 1, 2, \dots, N, M$).

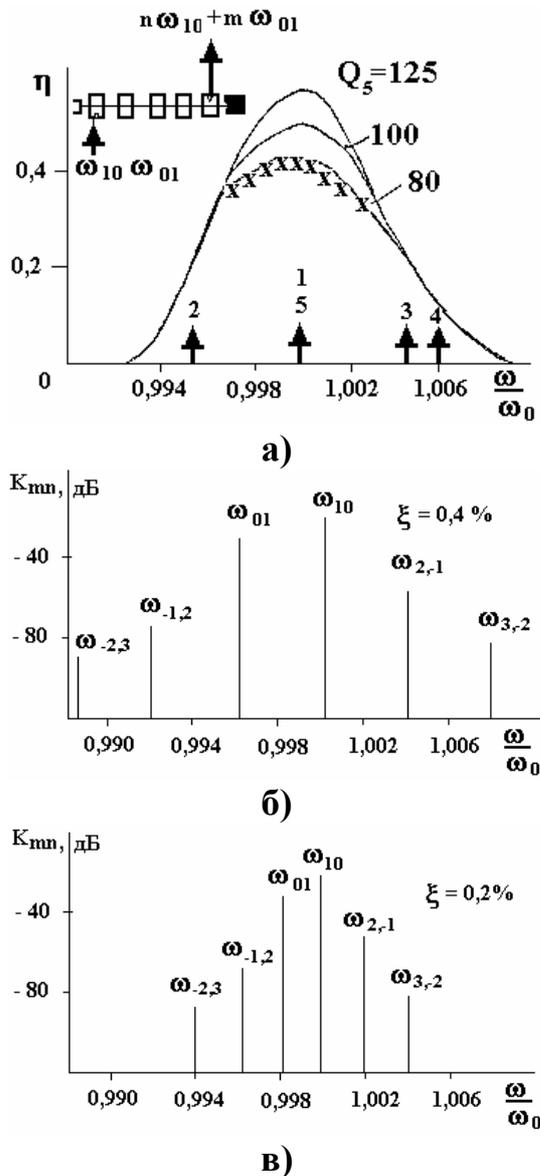


Рис. 7. Схема клистрона (а) типичные теоретические выходные спектры K_{nm} комбинационных составляющих при различных расстройках ξ между входными сигналами (б, в).

прибора. Если один из сигналов значительно превышает второй, то имеет место преимущественное усиление более мощного сигнала, а амплитуда другого падает по сравнению с первым случаем. Обобщающие зависимости выходной мощности основных сигналов на частотах ω_{10} и

При теоретическом анализе этих режимов учитывались от 4 до 6 составляющих ряда Фурье угла пролета $\theta_{10}, \theta_{01}, \theta_{20}, \theta_{02}, (\theta_{2,-1}, \theta_{-2,1})$. В спектре конвекционного тока учитывались 8 компонентов $I_{10}, I_{01}, I_{02}, I_{20}, I_{2,-1}, I_{1,-2}, I_{3,-2}, I_{-2,3}$. На рис. 7 приведены типичные выходные спектры $K_{nm} = 10 \lg P_{nm}/P_0$ комбинационных составляющих при различных расстройках $\xi = \Delta\omega/\omega \cdot 100\%$ между входными сигналами. Изменение расстройки ξ от 0,4% до 0,2% приводит к соответствующему сужению спектра комбинационных составляющих, лежащих в полосе пропускания прибора. Амплитудные соотношения в спектрах в пределах полосы пропускания сохраняются. В дальнейших расчетах ξ полагалась равной 0,16%.

Исследования показали, что имеет место эффект подавления мощным сигналом более слабого. На рис. 8 этот эффект хорошо прослеживается на изменении комбинационных компонент конвекционного тока I_{nm} вдоль прибора.

При равенстве входных мощностей различие в поведении спектральных компонент конвекционного тока, соответствующих независимым частотам ω_{10} и ω_{01} , незначительно и обусловлено частотной зависимостью характеристик

ω_{01} для ряда фиксированных значений входной мощности $P_{10}^{(вх)}$ и изменением $P_{01}^{(вх)}$ приведены на рис. 8.

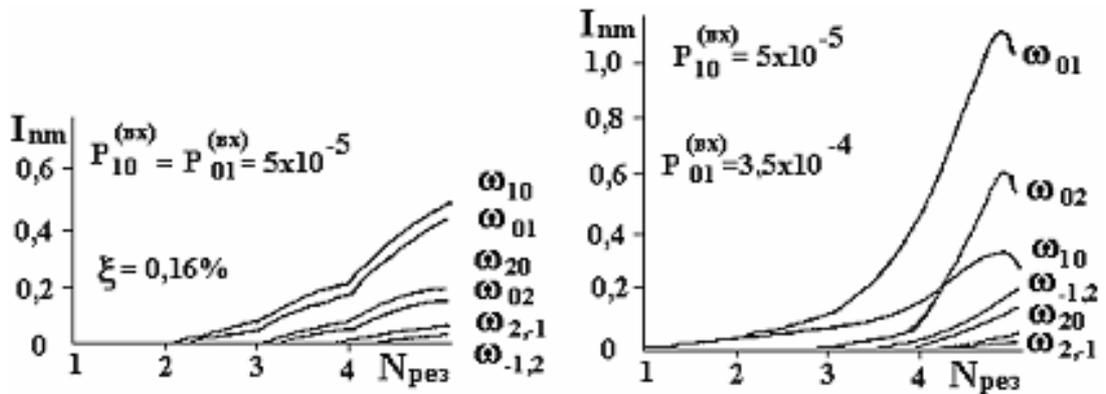


Рис. 8а. Зависимость амплитуд гармоник тока I_{nm} по длине прибора от номера резонатора $N_{рез}$ при одинаковых (слева) и различных (справа) значениях входной мощности 1-го и 2-го сигналов соответственно.

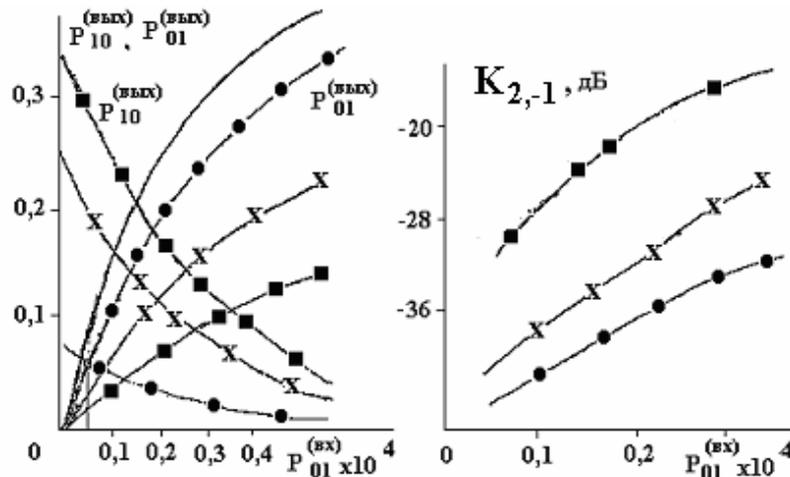


Рис. 8б. Амплитудная зависимость выходных значений мощности при фиксированных значениях входной мощности 1-го сигнала и изменении входной мощности 2-го сигнала (кривые сверху вниз $P_{10}^{(вх)} = 0; 5 \cdot 10^{-5}; 1,5 \cdot 10^{-4}; 2,5 \cdot 10^{-4}$) (слева); Зависимость мощности боковой комбинационной составляющей $K_{2,-1}$, от изменения входной мощности 2-го сигнала $P_{01}^{(вх)}$ при различных фиксированных значениях мощности 1-го сигнала (справа).

Увеличение входной мощности $P_{01}^{(вх)}$ сигнала на частоте ω_{01} приводит к возрастанию выходной мощности этого сигнала и падению мощности второго сигнала $P_{10}^{(вх)}$. Происходит перекачка мощности слабого сигнала в более мощный сигнал. Из графика (рис. 8) можно определить уровень входной мощности $P_{01}^{(вх)}$, при котором мощности выходных сигналов будут одинаковы.

При взаимодействии двух сигналов в клистронном усилителе, аналогично преобразованию сигналов в ЛБВ, происходит подавление мощным сигналом более слабого. Уровень комбинационных

составляющих в полосе прибора при определенном соотношении мощностей входных сигналов может быть не менее - 30 дБ.

В третьей главе приведены исследования нелинейных процессов при усилении электромагнитных волн в высокоэффективных клистронных усилителях.

Эффект расслоения в клистронных усилителях. Рассмотрены результаты оптимизации параметров многорезонаторного клистронного усилителя, направленной на достижение максимума показателя качества группирования.

Картина траекторий электронов в оптимизированных группирователях с различным числом резонаторов примерно одинакова. В конце всех областей дрейфа, кроме последней области, наблюдается группировка электронов пучка с образованием двух сгустков. В последней области дрейфа отмечается значительное уменьшение переменной составляющей скорости большинства медленных электронов.

Траектории электронов в трехрезонаторном группирователе представлены на рис. 9а. В первой области дрейфа видно характерное "фазовое расслоение" сгустка.

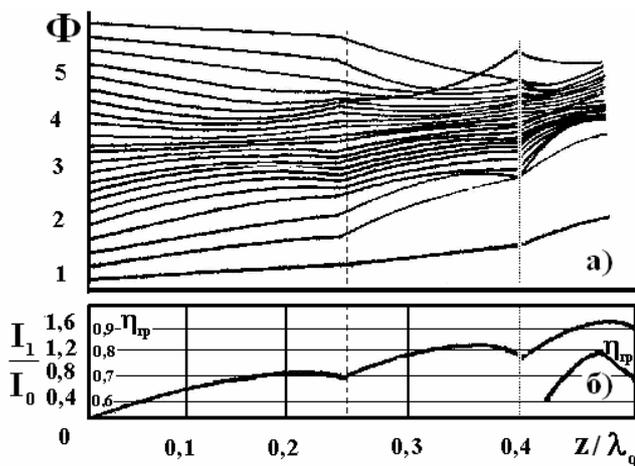


Рис. 9. Траектории электронов в трехрезонаторном группирователе (а) и амплитуда первой гармоники тока I_1/I_0 и КПД $\eta_{гр}$ (б) от продольной координаты z/λ_q .

Это происходит потому, что крайние электроны, подлетающие к сгущению заряда, быстро тормозятся, а разряжение в центре сгустка на входе в область способствует увеличению времени группирования центральных электронов. В последней области дрейфа образуется плотный сгусток с малым разбросом скоростей. Такой процесс группировки имеет место при достаточно больших длинах участков дрейфа, и резонаторы клистронного усилителя должны помещаться за максимумом амплитуды тока первой гармоники (рис. 9б).

Фазовые траектории электронов (рис. 9а) несколько несимметричны, что является характерной особенностью группирования электронов при конечных значениях первеанса, сопровождающейся переходом кинетической энергии электронов в потенциальную энергию сгустка. В отсутствие сдвигов фаз между переменным полем зазора и первой

гармоникой тока замедление пучка в процессе группировки приводит к появлению дополнительного разброса скоростей. Выясненные общие

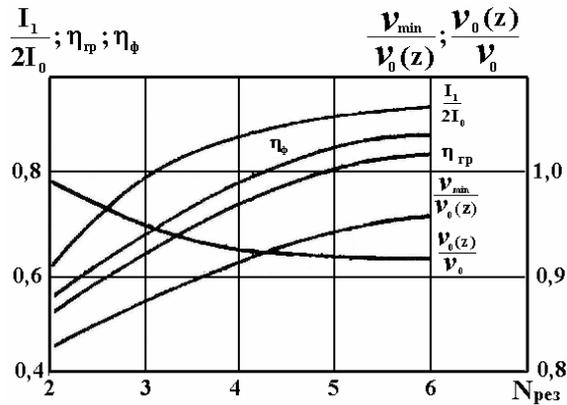


Рис. 10. Зависимости максимальных значений амплитуды первой гармоники тока $I_1/2I_0$, показателей качества η_{ϕ} и $\eta_{гр}$, величины $v_0(z)/v_0$ и минимальной скорости электронов на выходе группирователя от числа резонаторов клистрона $N_{рез}$.

закономерности группирования позволили провести оптимизацию группирователей клистронных усилителей с различным числом резонаторов.

На рис. 10 приведены зависимости максимальных значений амплитуды первой гармоники тока, показателей качества группирования η_{ϕ} и $\eta_{гр}$, величины $v_0(z)/v_0$ и минимальной скорости электронов $v_{min}/v_0(z)$ на выходе группирователя от числа резонаторов $N_{рез}$.

При увеличении $N_{рез}$ показатель качества группирования η_{ϕ} увеличивается и приближается к 0,9. Показатель качества

группирования $\eta_{гр}$ стремится к некоторому пределу, определяемому замедлением пучка $v_0(z)/v_0$. Таким образом существует, определяемое первеансом, максимальное значение электронного КПД клистрона, которое нельзя превысить увеличением числа резонаторов.

Показатель качества

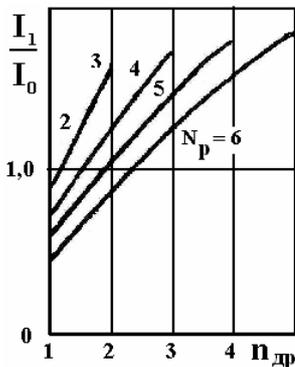


Рис. 11. Зависимость амплитуды первой гармоники тока от номера дрейфа.

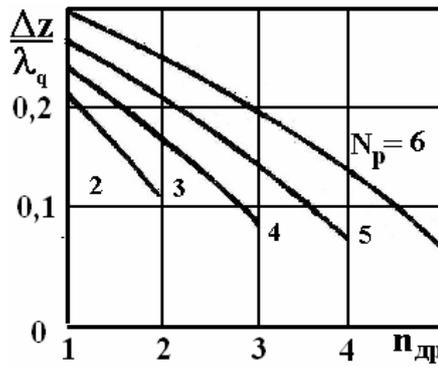


Рис. 12. Оптимальные длины труб дрейфа от номера дрейфа.

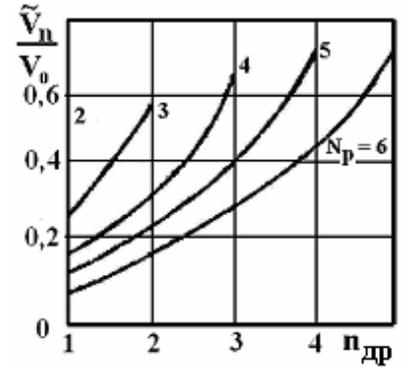


Рис. 13. Оптимальные напряжения на зазорах от номера дрейфа.

Амплитуда первой гармоники тока в сечениях, где находятся резонаторы, с увеличением номера резонатора возрастает (рис. 11). С увеличением N_p амплитуда первой гармоники в сечениях, соответствующих одному и тому же номеру резонатора, уменьшается.

Нормированные оптимальные длины труб дрейфа $\Delta z/\lambda_q$ при

различном числе резонаторов (рис. 12) последовательно уменьшаются ($\lambda_q = 2\pi v_0 / \omega_p \sqrt{1 + k^2}$ - длина волны плазменных колебаний), а оптимальные напряжения в зазорах резонаторов \tilde{V}_n / V_0 (рис. 13) нарастают. Величины $\Delta z / \lambda_q$ и \tilde{V}_n / V_0 изменяются монотонно. Как следует из рис. 13, усиление в оптимизированном группирователе мало (нужно учесть, что в выходном резонаторе $\tilde{V} / V_0 \sim 1$).

Для увеличения усиления нужно добавить каскады в линейный усилитель, например, добавить один каскад, образованный входным резонатором и трубой дрейфа. Оптимальная длина трубы дрейфа будет близка к $\lambda_q / 4$, т.е. меньше следующей длины $\Delta z_{23} = 0,28 \lambda_q$.

Оптимальная группировка электронов в многорезонаторных клистронных усилителях с резонаторами, настроенными на основную частоту сигнала, достигается за счет использования нелинейного волнового процесса в удлиненных областях дрейфа. На выходе труб дрейфа, кроме последней, образуются двугорбые сгустки с повышенным содержанием второй гармоники тока.

Длины труб дрейфа можно сократить, если ввести дополнительную модуляцию пучка на частоте второй гармоники полями специальных резонаторов. В результате получается оптимизированный группирователь с "короткими" трубами.

Роль дополнительных резонаторов сводится не только к улучшению группировки электронов в сгусток. Бессеточные зазоры резонаторов основной частоты и частоты второй гармоники имеют различное распределение коэффициентов электронного взаимодействия по радиусу. Комбинируя резонаторы, изменяя амплитуды и фазы их полей, можно получить компенсацию эффекта расслоения - неоднородности группирования электронов в различных слоях.

Напряженность поля резонатора на второй гармонике более быстро спадает к центру пучка по сравнению с изменением напряженности для резонатора основной частоты. Компенсация расслоения объясняется существованием, при определенных условиях, обратной зависимости координаты максимума амплитуды первой гармоники тока от разности потенциалов в зазоре резонатора второй гармоники.

Анализ влияния поля второй гармоники на группировку электронов в приближении дисковой модели позволил найти условия улучшения группирования и существования необходимого смещения максимума по координате.

С физической точки зрения, компенсация расслоения возможна из-за двух противоположных процессов: увеличения длины участка группирования с возрастанием напряжения двойной частоты и

уменьшения этой длины с увеличением напряжения основной частоты.

Расслоение может значительно ухудшить качество группировки. Его можно уменьшить специальными мерами, например, дополнительным воздействием на пучок полем резонатора, возбуждаемого на частоте второй гармоники сигнала. Наряду с компенсацией расслоения это воздействие способствует улучшению группировки электронов. При дополнительной модуляции компенсация расслоения обеспечивается возможностью регулировки воздействия на отдельные слои.

Компенсация расслоения должна проявиться также и в многорезонаторной системе с дополнительным воздействием на частоте второй гармоники. Были рассмотрены многорезонаторные группирователи и определены режимы, характеризуемые максимальным значением показателя качества и возрастанием координаты максимума показателя качества с увеличением напряжения в зазоре дополнительного резонатора.

Фазовые траектории электронов в трехрезонаторном группирователе для режима, соответствующего максимальному значению показателя качества ($I_{13}/\lambda_q = 0,21$) приведены на (рис. 14а). Характерной особенностью группирования является образование в конце второй области дрейфа двух сгущений траекторий и уменьшение плотности заряда в центре сгустка.

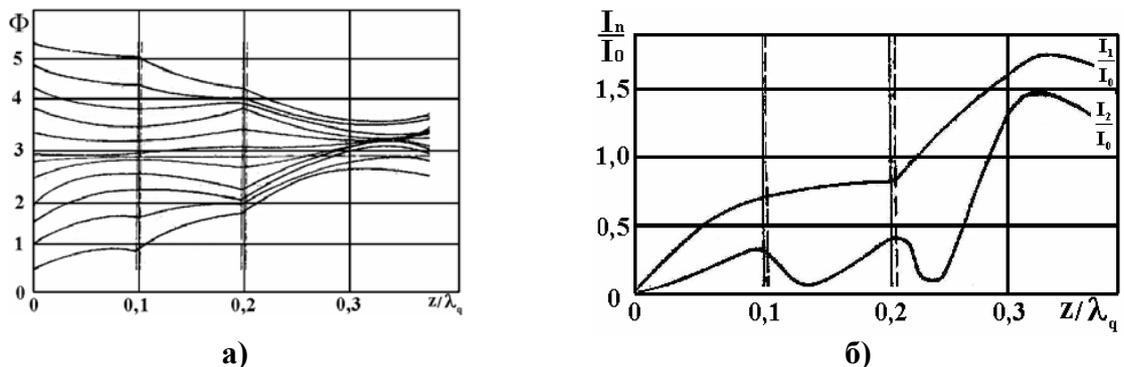


Рис. 14 а) Фазовые траектории электронов в трехрезонаторном группирователе; б) Зависимости амплитуд первых двух гармоник тока от продольной координаты.

Картина траекторий в конце второй и в третьей областях подобна картине траекторий на соответствующих участках дрейфа оптимизированного группирователя без дополнительной модуляции. Это означает, что механизм уменьшения расслоения в обоих случаях аналогичен и связан с образованием двугорбого распределения тока по фазе.

Различие в начальных процессах определяет различие в ходе зависимостей амплитуд первой и второй гармоник тока от расстояния. Зависимость амплитуды первой гармоники тока I_1/I_0 от продольного расстояния z/λ_q сглажена, в первой и второй областях дрейфа отсутствуют максимумы амплитуд первой гармоники тока I_1/I_0 (рис. 14б).

В системах с укороченными трубами дрейфа желательно использовать модуляцию на второй гармонике основного сигнала. В этом случае улучшение группировки и уменьшение расслоения может наблюдаться при использовании одного дополнительного резонатора.

Таблица 1

Напряжение пучка	14 кВ	50 кВ	8.6 кВ	6.4 кВ
Ток пучка	2.5 А	2.5 А	3.65 А	6.8 А
Число лучей	7	1	18	36
Микропервеанс	0.215	0.223	0.254	0.369
Частота	710 МГц	2.45 ГГц	2.45 ГГц	1.95 ГГц
Длит. импульса	2 мкс	Непр.	Непр.	2 мкс
Кол-во резонат.				
на частоте - ω	6	6	6	6
на частоте - 2ω	1	2	1	-
Входная секция	Резон.	Резон.	Резон.	Фильтр.
Вых. секция	Двухаз.	Одноаз.	Одноаз.	Фильтр.
Фокусир.система	соленоид	соленоид	МПФС	МПФС
Магн. поле.	400 Гс	800 Гс	1000 Гс	2000 Гс
Коллектор	Конвекц.	С рекупер.	Конвекц.	Конвекц.
КПД				
Проект	80 %	70 %	75 %	40 %
Эксперимент	78 %	65-70 %	70-75 %	40%
Вых. мощность	28 кВт	87 кВт	23-25 кВт	18 кВт
Полоса	1.5 %	2.0 %	2.5 %	15 %
Усиление	50 дБ	60 дБ	60 дБ	50 дБ
Коллективы	МГУ-ТОРИЙ	МГУ-КОНТАКТ	МГУ-ТОРИЙ	МГУ-ТОРИЙ

В табл. 1 приведены результаты испытаний клистронных усилителей, которые сначала были предложены и исследованы автором теоретически, а затем реализованы экспериментально.

Результаты предварительных теоретических исследований обсуждались с экспериментаторами, проводился выбор возможных значений общих параметров клистронного усилителя: волновых сопротивлений резонаторов, добротностей, особенностей магнитной системы, входных и выходных устройств. Затем осуществлялось численное моделирование выходных характеристик приборов, и проходила их коррекция и изготовление.

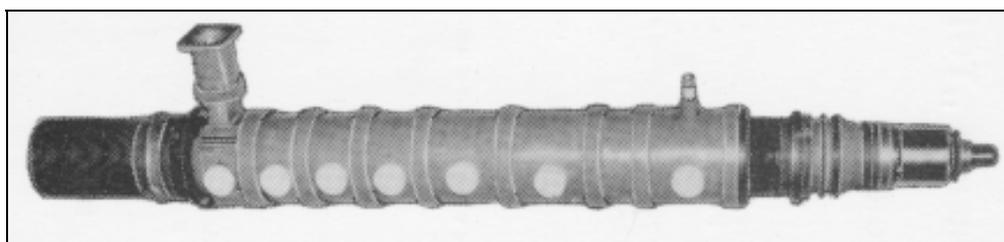


Рис. 15. Высокоэффективный клистрон с КПД в нагрузке 78 %.

После получения экспериментальных данных, осуществлялась минимальная коррекция параметров, которые в данной конструкции могли

изменяться.

В первом столбце табл. 1 представлены параметры мощного клистронного усилителя, созданного в 1974 году выдающимся экспериментатором Сергеем Владимировичем Лебединским.

Клистрон содержал восемь резонаторов, один из которых был настроен на вторую гармонику основного сигнала. Электронно-оптическая структура имела семь электронных потоков и соленоидальную магнитную систему, которая была реализована прямо на электродинамической системе клистрона (рис. 15). На данном клистронном усилителе был впервые в мире реализован КПД в нагрузке 78%.

Во втором столбце табл. 1 представлены параметры клистронного усилителя, созданного С.Н. Голубевым. Поскольку этот прибор работал в непрерывном режиме с выходной мощностью до 100 кВт, то его электронно-оптическая система была однолучевой с фокусировкой соленоидальным магнитным полем. Для повышения значения выходной мощности, ширина выходного зазора была взята больше теоретического значения, чтобы предотвратить возможный пробой в выходной секции. В клистроне применена одноступенчатая рекуперация электронного потока, которая позволила повысить эффективность на 3%. Экспериментальное значение КПД достигало 65-70%.

Клистронный усилитель, параметры которого приведены в третьем

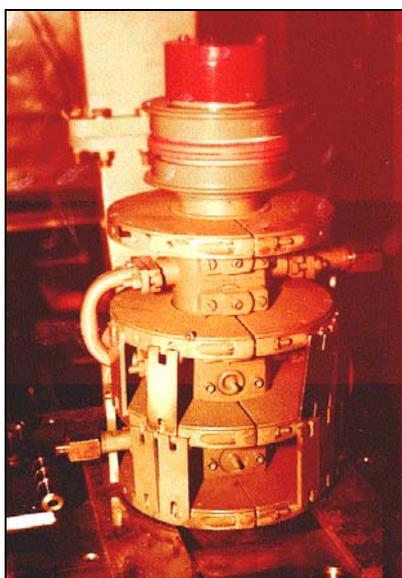


Рис. 16. Вариант клистрона для разрезного микротрона МГУ.

столбце табл. 1 конструировался как первый вариант прибора (разрабатывался под руководством И.Г. Артюха) для разрезного микротрона МГУ непрерывного действия (рис. 16). Он был рассчитан и изготовлен в МГУ, а его испытания были проведены в НИИ «Титан». Электронно-оптическая система содержала восемнадцать электронных потоков, которые формировались магнитно-периодической фокусирующей системой (МПФС). Экспериментальное значение КПД составляло 70-75%.

Все описанные выше клистронные усилители имеют узкую полосу усиливаемых частот, кроме прибора, параметры которого приведены в последнем столбце табл. 1 (разработчик С.А. Абанович). Данный прибор имел полосу усиливаемых частот 15%. В этом мощном широкополосном клистроне использовались входное и выходное устройства в виде фильтра, а электронно-оптическая система имела тридцать шесть электронных потоков, фокусируемых МПФС. Экспериментальное значение КПД достигало 40%.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования по созданию высокоэффективных клистронных усилителей позволили разработать и реализовать на практике приборы с эффективностью более 75 % в нагрузке.

В четвертой главе описаны исследования физических процессов в широкополосных клистронных усилителях. Ранее были созданы мощные широкополосные клистроны с КПД 30% и полосой от 2 до 10% в зависимости от рабочего диапазона частот и уровня выходной мощности.

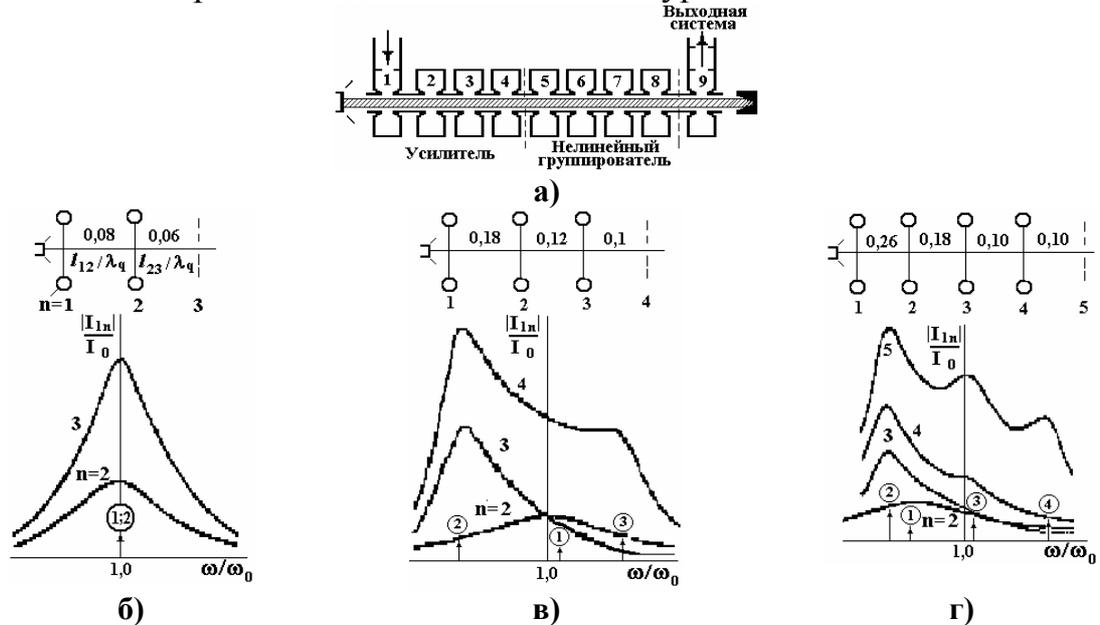


Рис. 17. Схема клистронного усилителя (а) и частотные характеристики линейных усилителей (б - г).

В многорезонаторном клистронном усилителе можно выделить три области со специальными функциями: усилитель слабых сигналов, нелинейный группирователь и выходную систему (рис. 17). Резонансные частоты усилителя находятся в рабочей полосе.

Резонаторы нелинейного группирователя отстроены за пределы полосы. В группирователе создаются плотные сгустки с малым разбросом скоростей. В выходной системе осуществляется эффективный отбор энергии от электронного потока во всей полосе частот.

В широкополосных приборах с низким уровнем КПД нелинейный группирователь, как правило, состоит из одного резонатора. В широкополосном клистроне с высоким КПД уменьшение сил кулоновского расталкивания должно сопровождаться увеличением электронной нагрузки выходных резонаторов.

Эти требования противоречивы и не могут быть выполнены при использовании одного аксиально-симметричного пучка. Разрешение противоречия возможно при переходе к многолучевым потокам, которые могут быть плоскими и кольцевыми, состоять из отдельных, расположенных рядом или разнесенных на расстояние порядка длины

волны, пучков. На рис. 18 приведены примеры поперечных сечений распределенных потоков: 1, 2 – тонкие кольцевые потоки в круглой трубе дрейфа и коаксиальном волноводе; 3 – многолучевой пучок; 4 – многолучевой пучок в коаксиальном волноводе; 5 – многоствольный, многолучевой пучок.

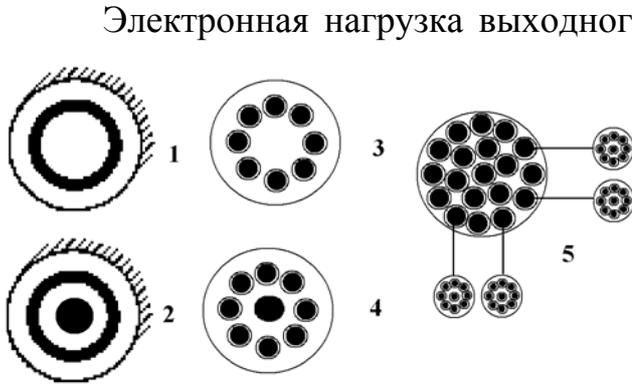


Рис. 18. Распределенные интенсивные электронные потоки.

Электронная нагрузка выходного резонатора зависит от тока пучка I_0 и в динамическом режиме близка к проводимости потока по постоянному току G_0 . При увеличенной проводимости обеспечивается низкая нагруженная добротность выходного резонатора, необходимая для энергообмена в широкой полосе. Для получения высокого КПД амплитуда напряжения на зазоре выходного резонатора должна находиться в пределах $|\tilde{V}_{\text{вых}}|/V_0 = 1,0-1,2$. В широкой рабочей полосе частот трудно осуществить высокоэффективный энергообмен электронного потока и электромагнитного поля при помощи одиночного выходного резонатора. В связи с этим используются двухзазорные резонаторы, цепочки связанных резонаторов или волноводные фильтры. Для практической реализации зачастую наиболее пригодна фильтровая система, которая может состоять из активного и пассивного резонаторов и позволяет реализовать полосу до 10% с сохранением высоких значений КПД.

При разработке широкополосных клистронов полоса усиливаемых частот обычно задана и должна быть реализована по возможности меньшим числом резонаторов. В таких приборах зачастую нет четкого разделения на линейный усилитель и нелинейный группирователь.

С увеличением общего числа резонаторов предпоследние из них могут быть отстроены далеко за границу полосы с целью получения оптимального значения их импеданса на всех частотах. В этом случае они выполняют функции чисто нелинейного группирователя. Для получения высоких КПД необходимы, по крайней мере, два отстроенных резонатора.

Приведенные рассуждения показывают, что наиболее рациональной конструкцией широкополосного клистрона с высоким КПД и полосой до 5% является шестирезонаторная конструкция, включающая три резонатора усилителя, два резонатора нелинейного группирователя и выходной резонатор (рис. 19).

Исследования, проведенные различными теоретическими методами, позволили оценить параметры конструкции, рабочую полосу, усиление и уровень выходной мощности четырех-, пяти- и шестирезонаторных

приборов. Они подтвердили, что с целью получения повышенных значений КПД необходимо рассматривать, прежде всего, шестирезонаторную конструкцию с резонаторами основной частоты.

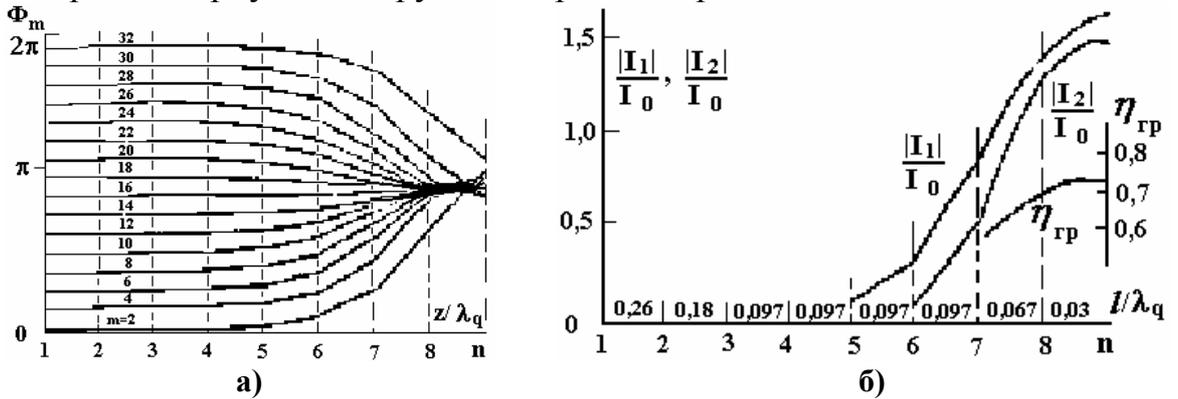


Рис. 19. Третий тип группирования электронов в клистроне.

Исследования клистронного усилителя с выходной электродинамической системой в виде трехзвенного фильтра, состоящего из активного и двух пассивных проходных резонаторов, показали, что в данной конструкции линейным усилителем являются первые три резонатора, а четвертый и пятый резонаторы - нелинейный группирователь.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ (экспериментальные работы проведены И.Г.Артюхом) была создана конструкция широкополосного шестирезонаторного клистронного усилителя с полосой 2,5% и КПД до 60%. Настройка прибора на максимум выходной мощности в точке полосы дала значение КПД в нагрузке 75%.

Фокусировка пучка в экспериментальном макете осуществлялась двухреверсной магнитной системой. Токпрохождение в статическом и динамическом режимах составило соответственно 93% и 77%.

Эффекты расслоения в широкополосном клистроне на краях полосы усиления выражены по-разному. На высокочастотном краю полосы усиления они выражены слабо, а на длинноволновом определяют КПД клистрона. В результате проведенных исследований установлена роль нелинейных и пространственных (в приближении расслоения) эффектов на формирование амплитудно-частотной характеристики.

Установлено, что уменьшение КПД клистрона при широкополосной настройке на длинноволновом краю полосы усиления может быть объяснено расслоением электронного потока, возникающим в пространстве дрейфа от второго до последнего резонатора.

В последние годы весьма актуальными задачами стали разработка и создание широкополосных (полоса усиливаемых частот до 10 %) и сверхширокополосных клистронов (полоса усиливаемых частот более 10%). Такие задачи успешно решаются в содружестве с Институтом Электроники КАН при участии автора диссертации. Экспериментальные

исследования широкополосных и сверхширокополосных клистронов проводятся в Институте Электроники Академии наук Китая, а теоретические исследования в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Результат группирования электронов в широкополосном клистронном усилителе можно увидеть на зависимости амплитуд первой I_1/I_0 и второй I_2/I_0 гармоник тока и КПД - η от продольной координаты z . При получении равномерной выходной характеристики эти зависимости имеют примерно одинаковое амплитудное значение, что говорит об аналогичном характере группирования электронов практически во всех точках полосы.

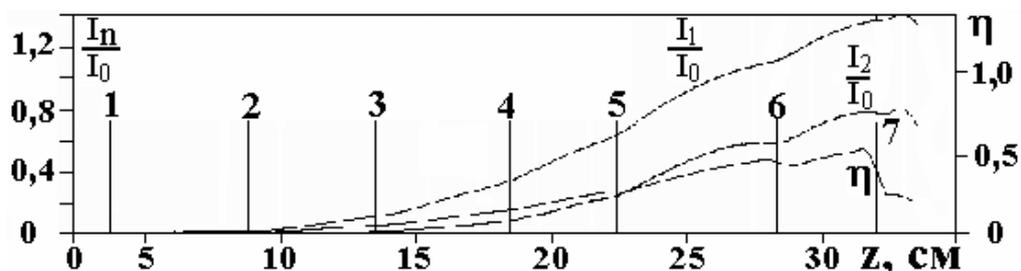


Рис. 20. Амплитуды первой I_1/I_0 и второй I_2/I_0 гармоник тока и КПД η на частоте $f = 1,185$ ГГц.

В качестве примера приведены результаты исследования широкополосного клистрона с полосой 10%. Анализ поведения амплитуд первой I_1/I_0 и второй I_2/I_0 гармоник тока и КПД η на частотах $f = 1,25$ ГГц (центральная частота) и $f = 1,335$ ГГц показал, что характер их поведения на центральной частоте и на частоте находящейся с правого края полосы усиления, практически совпадают. В то же время характер поведения гармоник тока на частоте $f = 1,185$ ГГц, находящейся с левого края полосы усиления (рис. 20), отличается от характера поведения гармоник тока на центральной частоте и на частоте, находящейся с правого края полосы усиления.

Для выяснения причины такого различия был проведен анализ токопрохождения электронного пучка в трубе дрейфа.

Он показал, что при работе клистронного усилителя на центральной частоте $f = 1,25$ ГГц (рис. 21) и на частотах выше ее ($f = 1,335$ ГГц), осаждение электронного пучка в выходном резонаторе не наблюдается, однако на этих частотах происходит заметное увеличение пульсаций пучка по радиусу, а также увеличение радиуса пучка после шестого резонатора.

На рис. 22 представлена картина токопрохождения на левом краю полосы усиления на частоте $f = 1,185$ ГГц. Видно, что коэффициент заполнения пучка равен $\sim 0,5$, пучок имеет малые пульсации, увеличение радиуса пучка наблюдается в области выходного резонатора и после него происходит осаждение пучка на трубу дрейфа, что и является причиной различия в характере поведения амплитуд гармоник тока.

В отсутствие в приборе токооседания электронного пучка результаты расчета по одномерной и двумерной моделям практически совпадают, что говорит о соответствии физики модельного подхода при переходе к программным комплексам повышенной сложности.

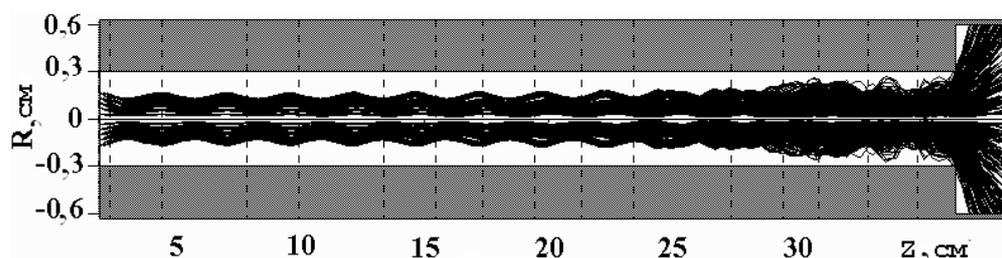


Рис. 21. Картина токопрохождения в центре полосы усиления.

Таким образом, расчеты сверхширокополосного прибора показали возможность реализации полосы усиления клистрона 14% при электронном КПД около 50%. В настоящее время клистроны с полосой 8%, 10% и 12% реализованы в Институте Электроники КАН.

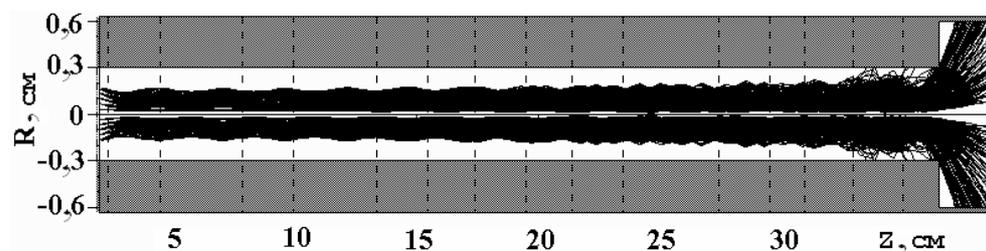


Рис. 22. Картина токопрохождения на левом краю полосы усиления на частоте $f = 1,185$ ГГц.

Исследованные физические принципы группирования и энергообмена в клистронных усилителях были распространены на область релятивистских уровней напряжений и токов электронного пучка.

В пятой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований физических процессов в многолучевом релятивистском генераторе и клистронных усилителях НМ, КМТ 1 и КМТ-3, разработанных под руководством автора.

Рассмотрены особенности высокоэффективного взаимодействия при релятивистских скоростях электронов. Увеличение ускоряющего напряжения V_0 влияет на характер модуляции и процесс группирования электронного потока.

Релятивистские электронные потоки в основном кольцевые. Увеличение напряжений и токов пучка автоматически приводит к увеличению поперечных размеров как электронного потока, так и электродинамической системы устройств. С другой стороны, повышение ускоряющего напряжения соответствует увеличению общей длины устройств (пропорционально γ^2 , где $\gamma = 1 + V_0[\text{МВ}]/0,511$ -

релятивистский фактор Лоренца), что может усложнить систему формирования электронного потока.

Рассмотрим, например, заряженный диск радиуса r и толщиной D , который пролетает через трубу дрейфа релятивистского клистронного усилителя с постоянной скоростью. Подобная «группа зарядов» очень

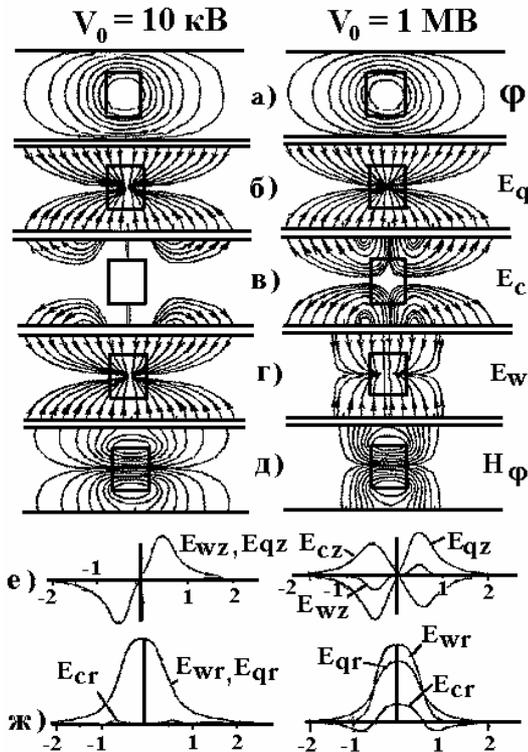


Рис. 23. Нерелятивистский и релятивистский сгусток в трубе дрейфа и электромагнитные поля им соответствующие.

часто используется при моделировании явлений нелинейного взаимодействия в релятивистских клистронных усилителях. Полагая, что поля излучения не возбуждаются, проанализируем результаты вычисления увлекаемых полей для нерелятивистского случая, когда заряженный диск имеет кинетическую энергию 10 кВ (левая часть рис. 23), и релятивистского случая, когда кинетическая энергия пучка 1 МВ (правая часть рис. 23).

На рис. 23а приведены эквипотенциальные линии ϕ кулоновского поля, возбуждаемого электронным сгустком. На рис. 23б изображены силовые линии кулоновского поля \vec{E}_q . Силовые

линии потенциальной части увлекаемых полей не зависят от скорости движения сгустка и аналогичны силовым линиям покоящихся зарядов. Область локализации \vec{E}_q определяется радиусом действия кулоновских сил $r_q = r_T / \mu_{01}$, где r_T - радиус трубы дрейфа, а μ_{01} - первый корень функции Бесселя $J_0(\mu_{01}) = 0$.

В отличие от потенциального кулоновского поля \vec{E}_q , вихревое поле содержит обе компоненты: электрическую $\{E_{cr}, 0, E_{cz}\}$ и магнитную $\{0, H_\phi, 0\}$. На рис. 23в представлены силовые линии электрической компоненты вихревого поля, а на рис. 23д – линии уровней магнитного поля. Как видно, вихревое поле зависит от скорости движения зарядов, но, тем не менее, радиус локализации остается равным r_q .

Силовые линии сгустка для полного электрического поля $\vec{E}_w = \vec{E}_q + \vec{E}_c$ показаны на рис. 23г. Радиус локализации поля \vec{E}_w зависит

от скорости движения электронов и равен r_q/γ , т. е. он уменьшается в γ раз по сравнению с радиусом действия кулоновских сил. На рис. 23е и рис. 23ж представлены распределения продольной и радиальных компонент электрического поля в зависимости от продольной координаты.

Максимальное значение радиальной компоненты E_{wr} зависит от толщины сгустка и для бесконечного по толщине сгустка превышает радиальную компоненту E_{qr} покоящегося сгустка в γ раз. Увеличение скорости движения сгустка приводит к уменьшению поля E_{wz} продольной компоненты по сравнению с относительной компонентой кулоновского поля.

Многолучевой релятивистский генератор. Электродинамическая система исследованного релятивистского генератора представляет собой диафрагмированный волновод с толстыми диафрагмами, имеющими, кроме небольшого отверстия в центре, восемь малых запердельных отверстий на периферии, распределенных по кольцу.

Исследования по генерации СВЧ излучения с помощью релятивистского многорезонаторного устройства были проведены на СЭУ «Тандем» физического факультета МГУ (лаб. профессора А.Ф. Александрова), имеющем следующие параметры: ускоряющее напряжение 300-800 кВ, ток пучка 1-5 кА, длительность импульса 100 нс.

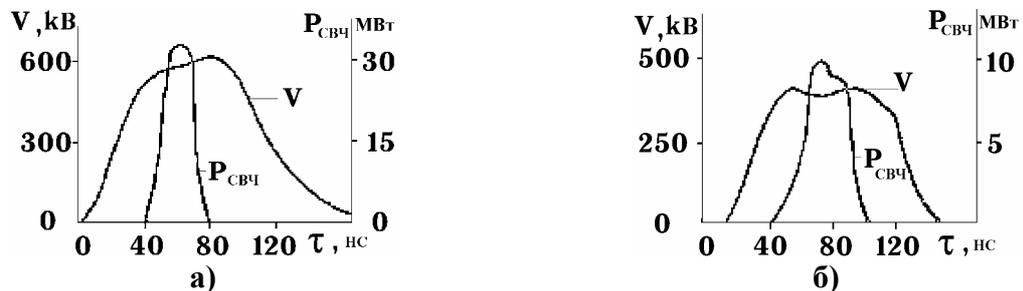


Рис. 24. Осциллограммы импульсов напряжения и мощности СВЧ излучения.

На рис. 24а представлены результаты исследования прибора с кольцевым электронным потоком, который формируется центральным стержнем катодного узла. Параметры электронного потока в эксперименте были следующими: $V_0 \approx 600$ кВ, $I_0 = 3$ кА, длительность импульса ускоряющего напряжения на половине амплитуды 100 нс.

Длительность импульса излучения значительно короче импульса напряжения и тока. Это можно объяснить возникновением СВЧ - пробоя при достижении напряженности электрического поля предельной для данного значения вакуума величины ~ 200 кВ/см.

Мощность СВЧ излучения составляла ≈ 32 МВт, частота генерации примерно 9,7 ГГц ($\lambda - 3,09$ см.), длительность импульса ~ 20 нс. КПД преобразования, рассчитанный по напряжению и выходному току пучка (с учетом токооседания), составил ≈ 3 %. На рис. 24б представлены

результаты исследования генерации СВЧ излучения с многопоточной катодной системой без центрального стержня. Мощность импульса СВЧ излучения составила 10 МВт, длина волны излучения $\sim 1,5$ см.

Таким образом, показана принципиальная возможность использования многопоточных электронных пушек в релятивистских СВЧ генераторах. При улучшении качества фокусировки и юстировки электронных потоков, а также при отработке многопоточной электронной оптики можно ожидать значительного увеличения КПД и выходной мощности устройства.

Таблица 2.

	НМ	КМТ-1	КМТ-2	КМТ-3
Напряжение пучка				
проект	200 кВ	1000 кВ	400 кВ	400 кВ
эксперимент	170 кВ	400 кВ		400 кВ
Ток пучка				
проект	62.5 А	1 кА	300 А	200 А
эксперимент	20 А	700 А		170 А
Тип катода	Оксидн.	взрывной.	взрывной	диэлектр.
Микропервеанс	0.285	2.7	1.18	0.7
Частота				9.4 GHz
входная	7.0 ГГц	2.85 ГГц	2.85 ГГц	9.28 ГГц
выходная	7.0 ГГц	2.85 ГГц		9.28 ГГц
Частота повторения	100 Гц	Одиночн.	Одиночн.	10 Гц
Длит. импульса				
пучка	2 мкс	1.5 мкс		120 нс
излучения	1 мкс	200 нс		120 нс
Кол-во резонаторов				
частоты ω	6	4	6	6
частоты 2ω	2	-	1	1
Выходная секция	Однозаяз.	Двухзаяз.	Двухзаяз.	Двухзаяз.
Фокусир. система	МПФС	соленоид	соленоид	соленоид
магнитное поле	2.6 кГс	20 кГс	20 кГс	5 кГс
Тип коллектора	Конвекц.	рупор	рупор	рупор
КПД				
теория	70 %	50 %	50 %	50%
эксперимент	50-60 %	10 %		5%
Усиление	40-50 дБ	30 дБ		30 дБ
Совместная работа	МГУ ИЯФ СО АН СССР	МГУ- ИИЯФ ТПИ	МГУ- ИИЯФ ТПИ	МГУ- ИИЯФ ТПИ

При конструировании в МГУ многолучевого релятивистского генератора и клистронных усилителей НМ и КМТ-1-3 (табл. 2), использовались программные комплексы Клистрон-МГУ и Арсенал-МГУ и измерительно-вычислительный комплекс для исследования «холодных» характеристик электродинамических структур, разработанный А.А. Стоговым, под руководством автора.

Испытания клистронных усилителей КМТ-1 и КМТ-3 проводились на экспериментальной базе ИИИЯФ при ТПИ (под руководством академика А.Н. Диденко).

Клистрон НМ изготавливался и испытывался в ИЯФ СО РАН (под руководством академика В.Е. Балакина).

Релятивистский клистрон НМ с периодической фокусирующей системой на постоянных магнитах. Релятивистский клистрон НМ конструировался как прототип источника для ВЛЭПП, с периодической фокусирующей системой на постоянных магнитах (рис. 5г), работающего на частоте 7 ГГц. Величина магнитного поля была равна 2,6 кГс. Электронный пучок формировался многокатодной термоэмиссионной пушкой.

Это был первый в мире эксперимент по использованию постоянных магнитов для фокусировки релятивистского электронного потока в клистронном усилителе. Была показана возможность реализации высокого токопрохождения электронного потока через прибор. Проведенный теоретический анализ показал, что колебания электронного потока могут быть уменьшены, и возможна реализация высокоэффективного варианта. А это означает, что в 1991 году была показана возможность использования периодической фокусирующей системы на постоянных магнитах для будущих разработок релятивистских многолучевых клистронных усилителей, которые и были разработаны в США в 1996 году.

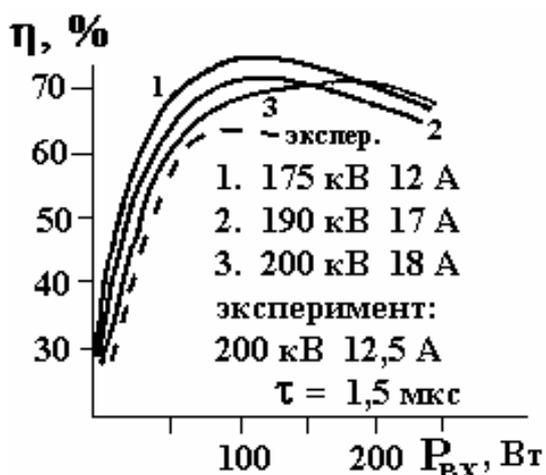


Рис. 25. Зависимость КПД от входной мощности.

Испытания клистрона были проведены на ускорителе «Элит» в ИЯФ СО РАН. Получено усиление входного сигнала до 50 дБ при эффективности более 50%, выходная мощность составила около 2 МВт. Ускоритель работал с частотой повторения импульса 120 нс. На рис. 25 представлено сравнение теоретических и экспериментальных результатов клистрона НМ. Видно, что экспериментальное значение КПД превышает 60%. Однако расчеты различных режимов работы прибора дали хорошее соответствие только на малых значениях входной мощности (до 100 Вт).

Теоретические и экспериментальные исследования релятивистских клистронов КМТ-1 и КМТ-3. Клистроны КМТ-1 – КМТ-3 конструировались для получения генерации в 10 см и 3 см – диапазонах длин волн.

В качестве системы формирования электронного потока использовались сильноточный электронный ускоритель («Луч») и линейный индукционный ускоритель, созданные в НИИЯФ при ТПИ. Клистрон КМТ –1 конструировался на ускоряющее напряжение 1 МВ и

ток пучка 1 кА и содержал четыре группирующих и два выходных резонатора с волноводным выводом из каждого резонатора (рис. 26).

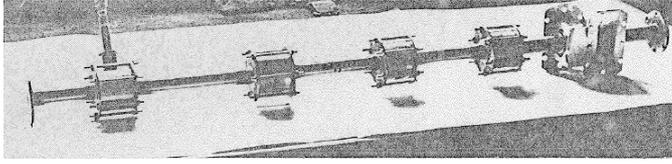


Рис. 26. Релятивистский клистрон КМТ-1.

индуктивными диафрагмами.

«Холодные» измерения электродинамических характеристик релятивистских клистронов КМТ-1 и КМТ-3 проводились на измерительно-вычислительном комплексе в МГУ.

Клистрон КМТ-1 (рис. 27) испытывался на сильноточном ускорителе «Луч» в 1985 г, имеющем следующие параметры: ускоряющее напряжение V_0 до 800 кВ, ток пучка I_0 до 10 кА, режим работы - однократный с длительностью импульса $\tau_{и} \approx 1,2$ мкс. Пушка представляет собой коаксиальный диод с магнитной изоляцией.

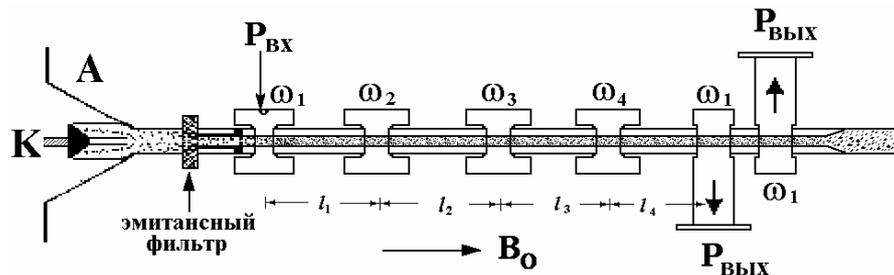


Рис. 27. Схема релятивистского клистрона КМТ-1.

Было получено усиление ВЧ мощности около 26 дБ. В силу технических причин релятивистский клистрон КМТ-1 испытывался при ускоряющем напряжении 400 кВ и токе пучка 700 А. Естественно, рассчитанный и сконструированный на другие параметры электронного потока релятивистский клистрон не мог обеспечить расчетные выходные характеристики.

Входная мощность в клистрон подавалась от импульсного магнетронного генератора с выходной мощностью до 1 МВт и длительностью импульса порядка 1,5 мкс в диапазоне длин волн 10 - 11 см.

На входе клистрона стоял аттенуатор, используемый для изменения входной мощности, и калиброванный направленный ответвитель с детектором, с которого снимались осциллограммы, характеризующие падающую и отраженную мощности.

Фокусировка электронного потока осуществлялась специально сконструированной импульсной фокусирующей системой, с

напряженностью магнитного поля до 3,5 кГс и неоднородностью менее 5% на длине $\approx 1,5$ м.

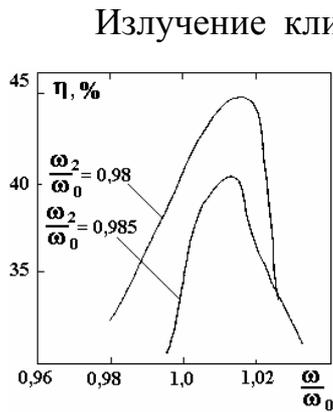


Рис. 28. Полосовая характеристика клистрона.

Излучение клистрона измерялось с помощью рупорной антенны с детектором, устанавливаемой напротив открытого конца волновода выходной системы. Коэффициент переизлучения из открытого конца волновода в антенну измерялся при холодных измерениях. Частота выходного излучения измерялась волноводными заградительными и полосовыми фильтрами, устанавливаемыми между приемной антенной и детектором. Юстировка клистрона осуществлялась последовательно от резонатора к резонатору по отпечаткам пучка на медной фольге, устанавливаемой в конце каждой трубы дрейфа.

Анализ процессов группирования электронного потока показал, что электроны группируются в сгусток с разбросом по скоростям, обеспечивающим КПД около 50%. Были исследованы полосовые характеристики клистрона при различных настройках резонаторов (рис. 28). Видно, что полоса клистрона невелика и составляет 2%. Анализ энергообмена в выходном резонаторе показал, что наибольший КПД достигается при $\tilde{V}_{\text{ВЫХ}}/V_0 = 1,3-1,4$ при холодной добротности выходного резонатора, настроенного на основную частоту, равной 30-50.

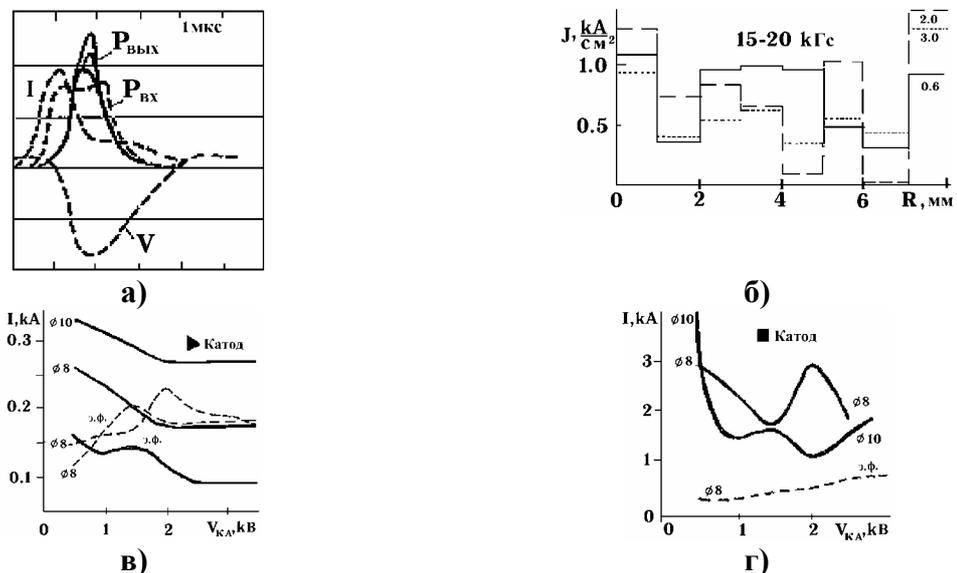
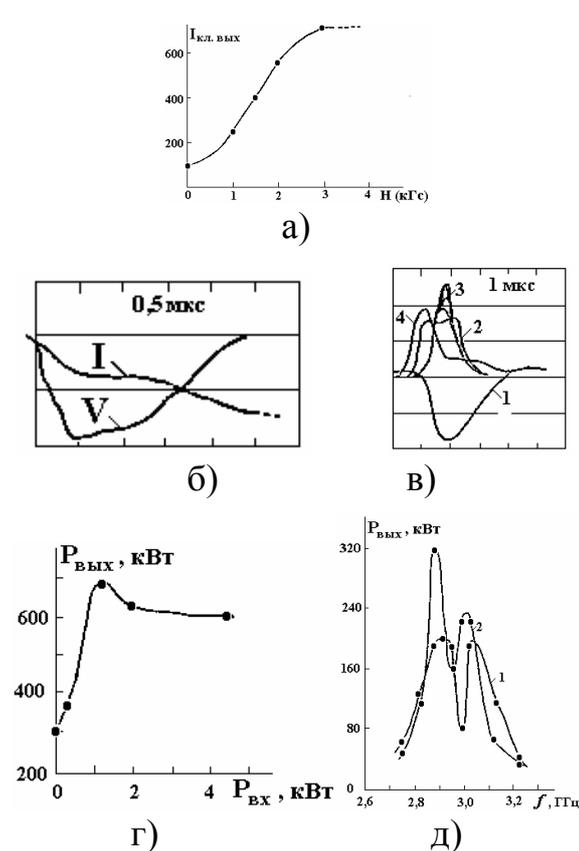


Рис. 29. Результаты эксперимента по влиянию эммитансного фильтра и формы катода.

Чтобы снизить напряжение на зазоре выходной системы использованы два выходных резонатора, напряжения на которых составляет $\approx 0,7 V_0$, что соответствует значению холодной добротности $Q_x = 15$. При этом эффективность отбора энергии каждым резонатором $\approx 22\%$.

Основной проблемой при исследовании клистрона было формирование электронного потока с требуемой величиной тока пучка. Для этих целей использовались срезающая анодная диафрагма и эммитансный фильтр. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения V_0 и входной мощности $P_{вх}$ от магнетронного генератора, а также выходной СВЧ мощности $P_{вых}$ приведены на рис. 29.

Поперечная структура электронного пучка, сформированная коническим коаксиальным диодом для различных величин



фокусирующего магнитного поля \vec{H} , равна 2,5; 10 и 15 кГс. Плотность тока пучка определялась по разности токов, которая приходила на цилиндр Фарадея, помещенного за диодной диафрагмой, имеющей различные радиусы отверстий. Разброс в распределении плотности тока составлял 50 % для диаметра пучка r менее 4 мм. Для пучка с радиусом более 4 мм наблюдалась многослойная структура электронного потока, которая имела слабую зависимость от величины магнитного поля.

Были исследованы также отклонения от круглой формы электронного пучка от фокусирующего магнитного поля при различных анодных диафрагмах с диаметрами 6, 8 и 10 мм. Они имели тот же характер

Рис. 30. Экспериментальные исследования с СВЧ излучением на входе.

отклонений. Для магнитного поля с амплитудой 10 кГс электронный пучок практически не имел изменений по форме. Для высококачественного пучка использовался эммитансный фильтр в виде трубки диаметром 8 и длиной 120 мм при анодной диафрагме 8 мм.

Было получено усиление 26 дБ: без входного сигнала выходная мощность составляла 26 кВт (шумы), при подаче на вход клистрона сигнала с $P_{вх} = 600$ Вт, выходная мощность $P_{вых} = 104$ кВт.

На рис. 30б показаны характерные осциллограммы напряжения и тока пучка. Из-за сложности одновременного достижения определенного напряжения и тока параметры электронного потока несколько отличались от расчетных величин. Характерные значения - $V_0 = 400$ кВ, $I_0 = 700$ А.

На рис. 30в показаны осциллограммы: 1 - ускоряющего напряжения, 2 - импульса СВЧ с магнетронного генератора, 3 - выходного импульса СВЧ при $P_{\text{вх}} = 0$ (4 выстрела). 4 - выходного импульса СВЧ при $P_{\text{вх}} = 0$ (шум). На рис. 30г приведена зависимость выходной мощности клистрона от входной. Рис. 30д - спектр выходного излучения клистрона снятый полосовым волноводным фильтром с полосой пропускания $\Delta f = 120$ МГц; кривая 1 - без входной мощности, кривая 2 с входной мощностью $P_{\text{вх}} = 3$ кВт.

Таким образом, экспериментально показана возможность реализации усилителя на релятивистском электронном потоке и получено усиление входного сигнала 26 дБ.

Основываясь на данных эксперимента по клистрону КМТ-1, в МГУ были разработаны конструкции релятивистских клистронов КМТ-2 и КМТ-3 на 10 см и 3 см – диапазоны длин волн соответственно. Релятивистский клистронный усилитель КМТ-3 был рассчитан на эксперименты в 3 см – диапазоне и планировался на испытания на линейном индукционном ускорителе (ЛИУ), разработанном в НИИЯФ при



Рис. 31. Релятивистский клистрон КМТ-3.

ТПИ с диэлектрическим катодом, для получения лучшего качества электронного потока. КМТ-3 (рис. 31) конструировался на работу при ускоряющем напряжении 400 кВ и ток пучка 200 А.

Проверено токопрохождение пучка через клистрон без ВЧ сигнала. Были получены паразитные колебания на выходе клистрона с амплитудой менее 500 Вт. Паразитные колебания возбуждались, если ток пучка был более 200 А. На клистроне КМТ-3 была зафиксирована выходная мощность 500 кВт.

Проведенные исследования показали, что для реализации в клистронном усилителе высоких выходных характеристик необходимо основное внимание при конструировании уделить вопросам формирования релятивистского электронного потока и разработке диагностической аппаратуры для исследования выходного излучения клистрона.

Релятивистские многолучевые клистронные усилители. Первый эксперимент по исследованию возможности формирования и прохождения сильноточного многолучевого электронного потока был проведен в МГУ на сильноточном ускорителе «Тандем» в 1982 г.

Были исследованы многолучевые пушки различной конфигурации, но основной эксперимент был проведен на электронной пушке, содержащей восемь электродов диаметром 2 мм каждый и центральный сменный электрод.

На данном устройстве была проверена возможность получения мощного СВЧ излучения в диапазоне длин волн 3 см.

Была показана принципиальная возможность использования многолучевых электронных пушек для генерации мощного излучения на

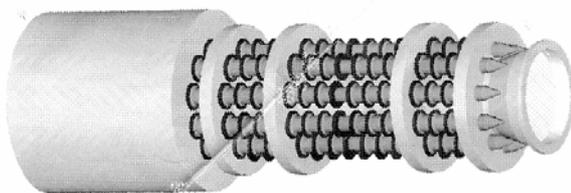


Рис. 32. Релятивистский многолучевой клистронный усилитель.

сильноточных электронных ускорителях. Учитывая современное состояние конструирования клистронных усилителей, можно говорить о возможности получения выходной мощности релятивистских многолучевых клистронных усилителей более 1 ГВт при длительности импульса 1 мкс. Один из возможных вариантов такого клистронного усилителя приведен на рис. 32.

сильноточных электронных ускорителях. Учитывая современное состояние конструирования клистронных усилителей, можно говорить о возможности получения выходной мощности релятивистских многолучевых клистронных усилителей более 1 ГВт при

Заключение.

Развита теория высокоэффективного взаимодействия электромагнитных волн с интенсивными электронными потоками, основанная на учете динамики интенсивности пространственного заряда, которая позволила выявить ряд эффектов, открывающих пути реализации новых классов мощных многолучевых клистронных усилителей, в том числе:

Расслоения электронного пучка и его влияние на группирование электронного потока, способы его компенсации путем воздействия на электронный поток полями резонаторов основной частоты, разноазорных резонаторов и резонаторов высших гармоник.

Динамической расфокусировки электронного потока и его влияние на эффективность группирования. Обосновано использование данного эффекта для повышения эффективности многорезонаторных клистронов.

Принцип высокоэффективного группирования в мощных многолучевых клистронных усилителях на основе пучков с пониженным значением первеанса. Разработаны основные положения такого принципа, позволяющие реализовать приборы в полосе усиливаемых частот более 10% и эффективностью более 50%.

Программные комплексы Клистрон – МГУ и Арсенал - МГУ, позволяют методами вычислительного эксперимента провести анализ нелинейного взаимодействия электромагнитных волн с полями электродинамических структур в мощных клистронных усилителях от катода до коллектора.

Предложены на основе развитой теории и результатов вычислительного эксперимента новые модели и принципы построения

многолучевых клистронных усилителей.

Компенсация расслоения и реализация динамической расфокусировки электронного потока позволяют получить КПД 70% и более. Эксперименты, проведенные в отраслевых НИИ, привели к созданию многолучевых клистронных усилителей с указанной эффективностью. Экспериментально подтверждено действие резонаторов на второй гармонике основного сигнала в узкополосном режиме на эффективность устройства в целом, а в режиме широкополосного усиления на форму частотной характеристики.

Впервые в мире разработан релятивистский клистронный усилитель с термоэмиссионным катодом и периодической фокусировкой на постоянных магнитах. Испытания клистрона, проведенные в ИЯФ СО РАН, позволили получить на частоте 7 ГГц усиление входного сигнала до 50 дБ при эффективности более 50 % и выходной мощности около 2 МВт.

На многолучевом релятивистском генераторе получена выходная мощность более 30 МВт в трехсантиметровом диапазоне длин волн с длительностью импульса более 20 нс и 10 МВт на длине волны 1,5 см.

Впервые показана возможность создания релятивистских клистронных усилителей, работающих на взрывоэмиссионных катодах. На релятивистском клистроне КМТ-1 получено усиление 26 дБ.

Обоснована реализация сверхмощного релятивистского многолучевого клистронного усилителя с выходной мощностью более 1 ГВт и длительностью импульса до 1 мкс.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Александров А.Ф., Афонин А.М., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Кубарев В.А., Лопухин В.М., Плетюшкин В.А., Сандалов А.Н., Слепков А.И. - Релятивистские черенковские генераторы с резонансными замедляющими структурами. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника, г. Горький, ИПФ АН СССР, 1981, с 145-169.
2. Алимов А.С., Артюх И.Г., Ишханов Б.С., Зверев Б.В., Сандалов А.Н., Ушканов В.А., Шведунов В.И. - Разрезной микротрон непрерывного действия НИИЯФ МГУ (состояние работ). Препринт НИИЯФ МГУ – 88 – 012/33, 1988, 64с.
3. Арапов Л.Н., Балакин В.Е., Сандалов А.Н. и др. - Разработка высокочастотного источника для ВЛЭПП. 12 семинар по линейным ускорителям заряженных частиц. Харьков, 28-31 мая 1991 г. с. 15-20.
4. Артюх И.Г., Абанович С.А., Родякин В.Е., Руденко Б.В., Сандалов А.Н. - Рекуперация энергии отработанных электронных потоков в коллекторных системах клистронов. В кн.: Физика и применение микроволн, Изд. МГУ, 1991, ч. 2, с. 52-55.
5. Артюх И.Г., Абанович С.А., Никитин А.П., Сандалов А.Н. - Мощный

- усилительный клистрон непрерывного действия. В кн.: Физика и применение микроволн. Изд. МГУ, 1991, ч. 1, с. 58-62.
6. Артюх И.Г., Вдовин В.А., Канавец В.И., Сандалов А.Н., Тербилов А.В. - Исследование широкополосных многорезонаторных клистронов. Электр. техника, сер. I, Электр.СВЧ, 1979, в. 2, с. 3-12.
 7. Артюх И.Г., Сандалов А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Штейн Ю.Г. - Релятивистские СВЧ устройства сверхбольшой мощности. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – Вып. 17 (1490). – М: ЦНИИ “Электроника”. 1989. 70 с.
 8. Афонин А.М., Васильев Е.И., Сандалов А.Н., Тербилов А.В. - Релятивистский клистрон. Авторское свидетельство на изобретение № 1145833 от 14 ноября 1984 г. с приоритетом от 28.10.1983.
 9. Афонин А.М., Сандалов А.Н., Стогов А.А., Тербилов А.В. - Релятивистский многорезонаторный клистрон с пространственно развитым электронным потоком. IV Симпозиум по сильноточной электронике. Новосибирск, март 1982 г., с. 148-151.
 10. Балакин В.Е., Сандалов А.Н. - Релятивистский многорезонаторный клистрон 4-см диапазона длин волн. В кн.: Физика и применение микроволн, Изд. МГУ, 1991, ч. 2, с. 56-59.
 11. Бурнейка К.П., Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Сандалов А.Н. - Об оптимальных параметрах группирователей многорезонаторных клистронов. Электр. техника, сер. I: Электр. СВЧ, 1971, в. I, с. 29 - 38.
 12. Бурнейка К.П., Канавец В.И., Ни Н.П., Сандалов А.Н. - Исследование двухсекционного умножителя частоты на ЛБВ. Электр. техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1970, в. 6, с. 31-41.
 13. Васильев Е.И., Голубев С.Н., Сандалов А.Н., Тербилов А.В. СЭ, 1985, в.3, с. 24-28.
 14. Васильев Е.И., Сандалов А.Н. - Особенности коллективных процессов в выходных системах релятивистских клистронов. РЭ, 1999, т.44, № 6, с. 728-731.
 15. Динг Я.Г., В.Е. Родякин, А.Н. Сандалов. - Особенности разработки и создания широкополосных клистронных усилителей. Труды VIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», 26-30 мая 2001, Звенигород, МО, ч. 1, стр. 74-75.
 16. Канавец В.И., Кандабаров В.Н., Сандалов А.Н. - Колебания и волны в цепочках шестиполюсников дискретно связанных с электронным потоком. Р Э, 1979, № II, т. 24, с. 2308-2312.
 17. Канавец В.И., Лебединский С.В., Васильев Е.И., Гранит Я.Ш., Журавлев С.В., Кучугурный В.И., Сандалов А.Н. - Мощные многорезонаторные клистроны (оптимизация параметров): Электронная техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1976, в. 11, с. 33-43.
 18. Канавец В.И., Лопухин В.М., Сандалов А.Н. - Нелинейные процессы в мощных многорезонаторных клистролах и оптимизация их параметров. Лекции по электр. СВЧ, книга УП, изд. СГУ, 1974, 253 с.

19. Канавец В.И., Павлов О.И., Сандалов А.Н. -Эффект расслоения и максимальный КПД мощного многорезонаторного клистрона: Электронная техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1974, в. 3, с. 13 - 23.
20. Канавец В.И., Пикунов В.М., Сандалов А.Н. - Приближенная нелинейная теория многочастотных приборов с продольным взаимодействием: Р Э, 1978, т. 23, № I, с. 132-140.
21. Канавец В.И., Сандалов А.Н. - Исследование одномерной модели многорезонаторного группирователя электронов при дополнительном воздействии на частоте второй гармоники: Электронная техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1971, в. 3, с. 11-20.
22. Канавец В.И., Сандалов А.Н. - Релятивистские генераторы и усилители СВЧ излучения. Итоги науки и техники, сер. Электроника т. 17: М., ВИНТИ, 1985, с. 82-110.
23. Канавец В.И., Сандалов А.Н. - Исследование многорезонаторных группирователей с дополнительной модуляцией на частоте второй гармоники сигнала при учете эффекта расслоения: Электронная техника, сер. I, Электроника СВЧ, 1971, в. 9, с. 62-73.
24. Канавец В.И., Сандалов А.Н., Слепков А.И., Терембилов А.В. - Группирование электронов в мощных широкополосных клистронах с высоким КПД: Р и Э, 1978, т. 23, № 11, с. 2379-2388.
25. Канавец В.И., Сандалов А.Н., Терембилов А.В. Функция влияния кулоновских сил пространственно развитых электронных потоков. Р Э, 1982, т. 27, № 7, с. 1437-1447.
26. Лебединский С.В., Канавец В.И., Васильев Е.И., Гранит Я.Ш., Кучугурный В.И., Сандалов А.Н. - Мощные многорезонаторные клистроны: Электр. техника, сер. I, Электр. СВЧ, 1977, в. 1, с. 41-53.
27. Лопухин В.М., Родякин В.Е., Сандалов А.Н. - Теоретические исследования коллекторных систем СВЧ приборов: Изв. ВУЗов, Радиоэлектроника, 1985, № 10, с. 22-33.
28. Марченко С.А., Сандалов А.Н., Стогов А.А. - Измерительно-вычислительный комплекс для исследования электродинамических систем СВЧ приборов. Труды VIII Всерос. школы-семинара «Физика и применение микроволн», 26-30 мая 2001, Звенигород, Моск. область, ч. 2, стр. 173-175.
29. Михеев В.В., Сандалов А.Н., Стогов А.А., Терембилов А.В. - Экспериментальное исследование многопучкового релятивистского устройства. Препринт физ. факультета, 1982, № 10, 5с.
30. Пикунов В.М., Прокопьев В.Е., Сандалов А.Н. - Ускоренный метод расчета нелинейных процессов в приборах с продольным взаимодействием: Р Э, 1985, т. 30, № 4, с. 774-786.
31. Пикунов В.М., Родякин В.Е., Сандалов А.Н. - Структура электромагнитных полей релятивистского электронного сгустка в трубе дрейфа. В кн.: Физика и применение микроволн, Изд. МГУ, 1991, ч. 2, с. 177-180.
32. Пикунов В.М., Сандалов А.Н. - Усиление двух близких по частоте сигналов в многорезонаторном клистроне: РЭ, 1986, т. 31, № 5, с. 968-975.

33. Родякин В.Е., Сандалов А.Н. - Исследование отбора и рекуперации энергии электронного пучка в клистроне. XI Всес. Конф. по электронике СВЧ. Орджоникидзе, 1986, ч. I, с. 81-83.
34. Родякин В.Е., Сандалов А.Н. - Численное моделирование конвекционных коллекторов. Межвуз. научно-технический сборник "Моделирование электронных потоков": Томск, 1986, с. 16-21.
35. Сандалов А.Н. - Численное моделирование физических процессов в мощных приборах сверхвысоких частот. В кн.: Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках. Под. ред. В.М. Лопухина, М., Изд. МГУ, 1987, с. 28-37.
36. Сандалов А.Н. - Коллективные процессы при усилении электромагнитных волн интенсивными электронными потоками. Сборник тезисов научной конференции "Ломоносовские чтения", апрель 2001 г., МГУ, физ. факультет, с. 112-118.
37. Сандалов А.Н., Пикунов В.М., Родякин В.Е. - Программные комплексы для разработки мощных высокоэффективных клистронных усилителей. В сборнике «Российская СВЧ электроника». НН, Изд. ИПФ, 2002, с. 97-102.
38. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. - Коллекторные системы приборов СВЧ с продольным взаимодействием: Зарубежн. радиоэлектр., 1984, № 9, с 63-78.
39. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. - Комплексная программа анализа динамики электронного потока в клистроне. Межвуз. сборник "Вопросы электронной техники", Саратов, 1988, 15с.
40. Сандалов А.Н., Родякин В.Е., Чашурина А.Н., Динг Я.Г., Шен Б. - Оптимизация сверхширокополосного многолучевого клистронного усилителя. Электромагнитные волны и электронные системы, т. 8, № 11-12 2003 г. стр. 70-75.
41. Сандалов А.Н., Стогов А.А. - Исследование релятивистских клистронных усилителей. Физика и примен. Микроволн. Изд. МГУ, 1991, ч. 2, с. 48-51.
42. Сандалов А.Н., Стогов А.А., Штейн Ю.Г. - Теоретическое и экспериментальное исследование клистронного усилителя. XI Всес. Конф. по элект. СВЧ, Орджоникидзе, 1986, ч. I, с. 48-50.
43. Сандалов А.Н., Тербилов А.В. - Особенности группирования и энергообмена в релятивистском многорезонаторном клистроне: Р Э, 1983, т. 28, № 9, с. 1803-1812.
44. Balakin V.E., Arapov L.N., Chashurin V.I., Khavin F.D., Kazakov S.Yu., Sandalov A.N. and all. - Prototype of VLEPP Relativistic Klystron, LC'91, 17-27 Sept. 1991, BINP, Protvino, p. 70-78.
45. Ding Yaogen, Xiao Xianghui, Rodyakin V.E., Sandalov A.N. - Theoretical and experimental investigations of the high power MBK, based on 2.5 D Arsenal - MSU Computer Code. Proc. of the 2nd ICMWWT, September 2000, Beijing, China pp. 299 - 302.
46. Fedyaev D.V., Pikunov V.M., Sandalov A.N. - Investigation of TW output circuit for relativistic klystrons, XVI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 23-30 May 1994, SPIE Proceedings Series, v. 2259, pp. 561-564.

47. Lavrinenko A.V., Pikunov V.M., Sandalov A.N. 3D Investigation of the output structure of the relativistic klystron. Proc. of the International Seminar on Modern Problems of Computational Electrodynamics (MPCE-04), July 1-3, 2004, Saint Peterburg, p. 15-17.
48. Sandalov A.N. - Comparison of RF Characteristics of High Power Sources for LC, LC'91, 17-27 September 1991, BINP, Protvino, pp. 118-124.
49. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. - Investigation of Multycavity Relativistic Klystrons with TW output section. Proc. EUROEM'94, Bordeaux, France, May 1994 v. II pp. 3435-3443.
50. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. - High Efficiency and Relativistic Klystrons. Proc. of 1996 Pulsed RF Sources for Linear Colliders Workshop (RF'96), April 1996, Kanagawa, Japan, KEK report 1/1997 pp 175-184.
51. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. - Power extraction in relativistic klystron amplifier. SPIE proc., 1995, v. 2557 pp. 434-442.
52. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E., Faillon G., Thaler Y. - Animation of Nonlinear Electron-Wave Interaction in Klystrons. Proc. of 1996 Pulsed RF Sources for Linear Colliders Workshop (RF'96), April 1996, Kanagawa, Japan, KEK report 1/1997 pp. 185-194.
53. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E., Stogov A.A. - Relativistic High Power Klystrons. Proc. of 9th Int. Conference on High Power Particle Beams (BEAMS'92). Wash. DC, may 1992, v. III, pp. 1673-1679.
54. Sandalov A.N., Pikunov V.M., Rodyakin V.E. and all. - Status of Experiment on Relativistic Klystron based on Linear Induction Accelerator, Proc. of 1994 Pulsed RF Sources for Linear Colliders Workshop, AIP Conf. proc. 337 pp. 134 -145.
55. Sandalov A.N., Terebilov A.V., Vasili'ev Y.I. - Relativistic Effects in Multy-cavity Klystrons. Proc. of 6 Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS'86), Kobe Japan, 1986. pp. 566-570.