

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

ЕГОРОВ Роман Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛИСТРОНОВ
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ – ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

Специальность:

01.04.03 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Саввин Владимир Леонидович**
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Черепенин Владимир Алексеевич**
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией математических методов радиофизики Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН)

Шешин Евгений Павлович
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники факультета физической и квантовой электроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)

Коннов Александр Викторович
кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории отдела разработки клистронов Научно-производственного предприятия «ТОРИЙ» (АО «НПП «ТОРИЙ»)

Защита диссертации состоится « 12 » декабря 2019 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.08 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://istina.msu.ru/dissertations/239209829/>

Автореферат разослан « 24 » октября 2019 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.01.08
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru

О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Главными задачами при исследовании процессов с последующей практической реализацией современных приборов СВЧ электроники в микроволновом диапазоне длин волн на текущий момент являются:

- 1) Повышение эффективности преобразования энергии электронных пучков в энергию электромагнитных колебаний и волн; повышение КПД СВЧ приборов.
- 2) Повышение выходной мощности СВЧ приборов, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режиме.
- 3) Уменьшение питающего напряжения высоковольтного источника.
- 4) Уменьшение массы и габаритов микроволновых усилителей и генераторов.
- 5) Уменьшение стоимости производства вакуумных устройств.

В настоящее время в микроволновой электронике вопрос повышения эффективности и выходной мощности приборов решается применением многолучевой технологии на основе пучков круглого или кольцевого сечения, а также применением ленточного пучка. Такие подходы дают возможность осуществить одновременно большой общий ток пучков и низкую плотность пространственного заряда (меньший первеанс пучка), а также снизить энергопотребление магнитной системой или избежать его использованием постоянных магнитов, тем самым обеспечив высокую эффективность СВЧ устройств.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведённые в последние годы, продемонстрировали перспективность клистронов с новыми методами группировки электронного потока. На текущий момент существуют образцы клистронов, использующие СОМ – метод (core oscillation method) группировки пучка, предложенный Байковым А. Ю. и Петровым Д. М. в 90-е годы 20 столетия [1-2].

Большое внимание в работе уделяется БАК – методу или по-английски ВАС – метод группировки электронов, происходящий от слов «bunching» (группировка), «alignment» (выравнивание), «collecting» (сбор), предложенного Гузиловым И. А. в 2014 году [3-4]. Теоретические и экспериментальные работы, результаты которых изложены в предлагаемой диссертации, продемонстрировали возможность и перспективность применения БАК – метода для увеличения эффективности, выходной мощности применительно к мощным приборам СВЧ, таких как клистроны. Рассмотрению этого метода выделена одна из глав диссертации.

Цель и задачи работы

- теоретическое и экспериментальное изучение нового метода группирования электронного потока для повышения эффективности мощных многолучевых и однолучевых клистронов;
- проведение теоретических расчётов электродинамической системы БАК – клистрона в одномерных, двумерных и трёхмерных программах, определение модового состава и структуры мод резонаторов электродинамической системы клистрона в трёхмерных программах, исследование распределения характеристического сопротивления в каналах резонаторов, оптимизация электродинамической системы, включая способы подавления «паразитных» видов колебаний и вакуумную «подстройку» частот резонаторов;
- проведение расчётов «электронно-оптической» системы пролётного клистрона, определение необходимого профиля магнитного поля в рабочих промежутках между полюсными наконечниками;
- проведение «холодных измерений» частот и характеристических сопротивлений всех резонаторов, выравнивание распределения характеристического сопротивления во всех каналах резонаторов;
- экспериментальное исследование разработанных клистронов большой мощности, проведение динамических испытаний в диодном режиме и в режиме СВЧ;
- сравнение характеристик разработанного клистрона с параметрами клистрона, взятого за прототип, и с современными зарубежными аналогами того же уровня выходной мощности;
- возможность повышения выходной мощности БАК – клистронов на основе разработанной конструкции и возможность применения нескольких БАК – колебаний для получения эффективности выше 80%;
- трехмерное моделирование электронных процессов в мощных многолучевых клистронов с целью выявления физических ограничений на эффективность усиления;
- выработка рекомендаций к условиям группирования на основе полученных исследований.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования выбрана разработка физических основ высокоэффективного усиления электромагнитных волн СВЧ диапазона. Предметом исследования являются механизмы формирования электронных сгустков высокой плотности в пролётных клистронов большой мощности, принципы высокоэффективного преобразования энергии электронных пучков в энергию электромагнитных колебаний и

волн в многолучевых конструкциях О – типа.

Научная новизна

1) Впервые проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование БАК – метода группировки электронного потока в мощных клистронных усилителях, предложенного И.А. Гузиловым.

2) Впервые в мире был разработан, сконструирован и испытан импульсный многолучевой БАК – клистрон в S – диапазоне длин волн с выходной импульсной мощностью 6 МВт.

3) Результаты динамических испытаний БАК – клистронов значительно превосходили результаты испытаний клистрона, взятого за прототип, а также характеристики зарубежных однолучевых аналогов. Показано, что эффективность новых клистронов выше на 15-20%, энергопотребление меньше в 1,5 раза, рабочее напряжение ниже в 2,5 раза по сравнению с зарубежными однолучевыми клистропами, в 2 раза меньше масса и габариты, ниже уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора.

4) Показана возможность увеличения выходной импульсной мощности разработанных БАК – клистронов.

5) Проведено исследование и определены условия реализации оптимальной группировки электронных сгустков для реализации КПД выше 80% в клистропах L-диапазона частот.

6) Впервые создана трёхмерная модель мощного многолучевого клистрона, проведено трехмерное моделирование процессов группировки и отбора энергии в выходном резонаторе, выявлены физические факторы, ограничивающие КПД в многолучевых клистропах.

Научная и практическая значимость работы

1) Теоретически и экспериментально подтверждена перспективность БАК – метода группировки электронного потока для разработки широкого класса клистронных усилителей в L, S – диапазонах частот.

2) Сконструированные и испытанные клистроны обладают большой выходной мощностью (6 МВт и более), высокой эффективностью (КПД более 60%), работают при меньшем питающем напряжении по сравнению с зарубежными аналогами, используя фокусирующую систему на базе постоянных магнитов.

3) Внедрение результатов работы позволит создать новое поколение мощных клистронов, превосходящих отечественные и зарубежные аналоги. Разработанные многолучевые БАК - клистроны S – диапазона могут быть использованы в ускорительной

технике, в радиолокационных системах, системах радиоэлектронной борьбы.

Методология исследований

Проведенные в диссертационной работе исследования опираются на численные модели, которые используются отечественными и зарубежными специалистами при разработке экспериментальных образцов усилителей и генераторов СВЧ, и на впервые разработанную трехмерную модель взаимодействия многолучевого потока с высокочастотными полями многорезонаторного клистрона. Результаты расчётов и экспериментов непосредственно сравнивались в различных существующих программах, а также с характеристиками опытных образцов.

Основные положения, выносимые на защиту

1) БАК – метод группировки электронного потока демонстрирует увеличение эффективности до 64% клистронных усилителей с уровнем выходной мощности 6 МВт в S – диапазоне длин волн, что на 15-20% выше по сравнению с прототипом и зарубежными аналогами.

2) Применение нескольких БАК – колебаний для группировки электронов повышает КПД однолучевых клистронов L-диапазона до 80% и выше при сохранении габаритов усилителей.

3) Трёхмерная модель мощного многолучевого клистрона, созданная впервые, позволяет проводить трехмерный анализ процессов группировки в многолучевых клистропах.

4) Трёхмерное моделирование процессов энергообмена в выходном резонаторе многолучевых клистронов показывает, что основным физическим ограничением эффективности усиления является интерференция волн в щели связи сверхразмерных кольцевых выходных резонаторов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных российских и международных конференциях и семинарах: Международный семинар CLIC Workshop – 2016 (Женева, 2016), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2016 (Москва, 2016), XV Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2016») (Красновидово, 2016), Международная конференция вакуумных электронных источников IVESC – 2016 (Сеул, Южная Корея, 2016), Международная конференция вакуумной электроники IVEC – 2017 (Лондон, 2017),

Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2017 (Москва, 2017), факультетский конкурс научных студенческих работ имени Р. В. Хохлова (Москва, 2017), 61 Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2018), XVII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова («Волны-2019»).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 13 печатных работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 1 статье в нерецензируемом журнале и 5 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список работ автора приведен в конце автореферата перед списком литературы.

Достоверность представленных в диссертационной работе, подтверждается экспериментами, проведёнными с двумя образцами разработанных многолучевых клистронов с выходной мощностью 6 МВт в S – диапазоне частот, а также теоретическими расчётами с использованием одномерных, двумерных и трёхмерных программ, применяемых при разработке однолучевых и многолучевых клистронов.

Ценность научных работ соискателя состоит в том, что в опубликованных работах отражены результаты научных теоретических и экспериментальных исследований, подтвердивших перспективность нового метода группирования электронных пучков. Достигнутый в эксперименте уровень эффективности мощных многолучевых клистронов значительно (на 15-20%) превышает КПД лучших отечественных и зарубежных аналогов. Разработанные в диссертации подходы и предложения с применением различных программных комплексов, используемых для практической реализации клистронов, можно внедрять для увеличения выходной мощности и эффективности существующих однолучевых и многолучевых клистронов.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены лично автором либо при его определяющем участии. Соискателем самостоятельно проводились расчеты группирователя в усилительной части клистрона, высокочастотных полей в резонаторах электродинамической системы, токопрохождения и электронной оптики многолучевого потока, профиля магнитного поля в каналах резонаторов, высокочастотного поля в выходном резонаторе, оптимизация группирователя клистрона. Автор самостоятельно проводил настройку частот и распределения высокочастотных полей на «холодных» измерениях и участвовал в динамических испытаниях новых клистронов большой мощности. Впервые автор самостоятельно создал трёхмерную

модель многолучевого клистрона для изучения физических процессов группировки и отбора энергии. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, шесть глав, заключение и список литературы из 134 наименований. Объем диссертации: страниц – 155, число рисунков – 120, число таблиц – 10.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** содержится обоснование актуальности темы исследований, сформулированы предмет исследования, цель и задачи диссертационной работы, приводится краткое содержание, отмечается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов работы. Также во введении приведен краткий обзор работ, посвященных современным методам группировки в клистронных усилителях.

Первая **глава** диссертации носит обзорный характер. В ней представлены краткая история развития, текущее состояние и перспективы клистронных технологий, применение клистронных усилителей, отличительные особенности однолучевого клистрона от многолучевого с преимуществами многолучевой технологии, а также проблемы, с которыми сталкиваются разработчики, и решаемые при этом задачи.

Клистроны являются основными источниками мощности СВЧ для современных ускорителей, включая большой адронный коллайдер (LHC), для ускорителей медицинского назначения, для передачи энергии на большие расстояния, для радаров, энергетических передатчиков и для многих других устройств, использующих СВЧ энергию.

Многолучевые клистроны в диапазоне частот от сотен МГц вплоть до 100 ГГц обладают очевидными преимуществами по сравнению с однолучевыми клистроном с цилиндрическими электронными пучками. Совместно с высокой эффективностью, усилением, выходной мощностью значительный интерес представляет низкое действующее напряжение. Низкие напряжения существенно уменьшают длину и вес клистронов, устраняют необходимость использования масляных баков для трансформатора, питающего модулятор, а также массогабаритные параметры источника высокого напряжения. Поскольку низкие напряжения пучков приводят к меньшему уровню рентгеновского излучения на коллекторе, вес экранировки на коллекторе может

быть значительно снижен.

Разработка мощных пролётных клистронных усилителей требует решения ряда сложных задач, в числе которых: формирование мощных электронных пучков, которые должны с меньшим токооседанием проходить пролётные каналы и зазоры резонаторов; обеспечение электрической прочности изоляторов, междуэлектродных промежутков, зазоров резонаторов при очень высоких напряжениях; рассеяние в виде тепла высокой средней мощности на коллекторе, а также применение системы охлаждения для отвода тепла; экранирование рентгеновского излучения со стороны коллектора; вывод большой микроволновой мощности из выходной системы клистрона; конструирование резонаторов с возможностью регулировки их частот и волновых сопротивлений.

Более 50 лет компьютерное моделирование применяется для проектирования и теоретических исследований физических процессов в клистронных усилителях. Основными задачами, которые необходимо решать при теоретических исследованиях процессов в клистронных усилителях, являются: задача группирования электронного пучка в усилительной части клистрона, задачи на собственные значения для резонаторов клистрона для определения собственных частот, добротности, характеристического сопротивления, распределения электрических и магнитных полей рабочих и высших мод колебаний, задачи электронной оптики и формирования электронного пучка в электрическом и магнитном полях, задачи энергообмена в выходной системе прибора, задачи вывода «отработанного» после выходной системы пучка в коллекторную систему и решение задачи равномерного осаждения пучка на её поверхности. Современное развитие вычислительной техники позволяет решать эти задачи отдельно за разумное время.

Во второй главе рассмотрены различные современные методы группирования электронов в клистронных усилителях. К ним относятся COM – метод группировки, CSM – метод группировки, 3D – метод группировки, а также рассмотрена традиционная группировка электронов.

Динамический способ управления током в настоящее время применяется во всех устройствах СВЧ с прямолинейным электронным потоком. Три процесса (скоростная модуляция электронного потока, группирование электронов и отбор энергии от потока) составляют основу явлений в приборах со скоростной модуляцией – клистронных усилителях.

Чтобы получить высокую эффективность, клистрон должен собрать основную часть электронов в сгусток. Как правило, ядро сгустка состоит из группы быстрых частиц «хвосте» и группы медленных частиц в области «головы» сгустка. Электроны ядра подвергаются действию больших высокочастотных полей и имеют сравнительно большую

разницу скоростей. При группировании наблюдается другая часть частиц, находящихся на расстоянии примерно половины электронной длины волны $L_e/2$. Назовем эту часть электронов «частицы-аутсайдеры» или «антисгусток». Влияние «антисгустка» на эффективность очень велико. «Частицы-аутсайдеры» подвергаются действию слабых полей в зазорах резонаторов и имеют небольшие изменения скоростей. Эти частицы прилетают в зазор выходного резонатора в ускоряющей фазе поля и отбирают энергию поля с дальнейшим ускорением, что приводит к снижению эффективности клистрона. Эффективность клистрона зависит от доли собранных периферийных электронов в основной сгусток.

В клистронах с традиционной группировкой используются резонаторы, частоты которых близки к частоте входного сигнала, а также используются резонаторы второй гармоники. Как правило, при проектировании такого клистрона не применяют больше восьми резонаторов. Каждый последующий резонатор не вносит существенного вклада в конечную эффективность. При этом конструкция клистрона становится сложнее. Небольшое отклонение частоты какого-нибудь резонатора после пайки нивелирует преимущество в КПД, полученное в расчёте.

В СОМ – методе группировки (core oscillation method), который был предложен Петровым Д.М. и Байковым А.Ю., используются осцилляции ядра сгустка электронов за счёт разгруппирующих сил пространственного заряда. В этом методе во время группировки электроны периодически приближаются к центру сгустка и удаляются от него. В то же время периферийные частицы продолжают монотонно приближаться к основному сгустку. Метод позволяет получить высокую эффективность на значительно большей длине пространства взаимодействия, что является основным недостатком такого подхода [1-2].

При использовании CSM – метода (core stabilization method) возможно существенно уменьшить длину группирования за счёт резонаторов второй и третьей гармоники. При этом в процессе группирования благодаря воздействию резонаторов гармоник создается «зона стабилизации» для ядра сгустка. Конфигурация клистрона с резонатором третьей гармоники была предложена зарубежными специалистами V. Hill, C. Marrelli, D. Constable. Рабочая частота клистрона составляет 1 ГГц, напряжение пучка 115 кВ, ток пучка 8,2 А, расчётная эффективность при этом равна 88,65%. Длина анодного блока при этом составляет примерно 1,6 м [3]. Практическая реализация возможна только в длинноволновых клистронах (частота до 3 ГГц), поскольку резонаторы третьей гармоники будут иметь маленькие геометрические размеры [5].

Принципиальное отличие пространственного метода группировки электронов от

группировки при продольном движении электронов заключается в том, что формирование сгущений электронов при таком способе группирования может осуществляться без существенного увеличения плотности пространственного заряда. Из-за трёхмерности траекторий электронов сгущения будут распределены по площади поперечного сечения группирователя. Эффект пространственной группировки электронов можно применить при создании клистронных усилителей с циклотронным вращением электронов. Исследования проводились студентами и аспирантами в МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством Саввина В.Л.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию БАК – метода группирования электронов в пролётных клистронах, предложенного Гузиловым И.А [3-4]. В этой главе приведены описание БАК – метода, проведенные автором расчёты в различных одномерных и двумерных программах, предложен клистрон с двумя БАК – колебаниями для ускорительной техники с эффективностью выше 80%, показана теоретическая оптимизация первых экспериментальных БАК – клистронов. Приведено сравнение БАК – метода с СОМ – методом группировки электронов.

В настоящее время существует большое количество программ, моделирующих клистроны (одномерные – Klys 4.5, DEV 5.1, KlypWin, AJDisk, двумерные – Klys2D, Klys, трёхмерные пакеты). Особо следует отметить, что перед тем, как использовать ту или иную программу для практического применения, необходимо постоянно проводить сравнение расчётов этой программы с результатами экспериментальных испытаний, с другими программами или аналитическими моделями и решениями.

В качестве основного инструмента исследований взаимодействия электронов с СВЧ полями резонаторов группирователя в клистронных усилителях использовались программные комплексы DEV 5.1 [6], Klys 4.5 [7], позволяющие корректно решать задачи взаимодействия электронного пучка с электромагнитными полями. Распределения продольных компонент электрических полей в зазорах резонаторов были внесены из трёхмерной программы с целью увеличения точности расчётов. Программы DEV 5.1, Klys 4.5 позволяют оценить выходные характеристики усилителей, такие как: КПД, выходная мощность, коэффициент усиления, а также проводить анализ амплитудно – частотной характеристики прибора.

В одномерных программах (Klys 4.5, DEV 5.1) автором были рассчитаны фазовые траектории электронов, распределения амплитуд конвекционного тока, высокочастотного напряжения на стенках зазоров резонаторов, амплитудно – частотные характеристики, зависимости выходной мощности от уровня входного сигнала, а также скорости всех электронов при влёте и вылете каждой полости электродинамической системы.

В программном комплексе DEV 5.1 электродинамические системы приборов О – типа представляются методом декомпозиции, в котором каждая ячейка (резонатор) представляется в виде шестиполюсника, а сама нерегулярная электродинамическая система – в виде многополюсника (каскадного соединения шестиполюсников). Обычно для шестиполюсника строится схема замещения в виде схемы с сосредоточенными элементами. Этот метод позволяет построить матрицу возбуждения секций электродинамической системы, связывающую наведенные токи и напряжения в зазорах взаимодействия.

Для решения самосогласованной задачи необходимо по значениям напряжения на трубках дрейфа зазора определить распределение высокочастотных электрических полей, решить уравнение движения электронных пучков в высокочастотных и кулоновских полях, вычислить в зазоре наведенные токи. Самосогласованное СВЧ-поле в зазорах с учетом наводимого пучком СВЧ-напряжения в DEV 5.1 ищется методом итераций.

Электронный пучок в программе DEV 5.1 моделируется последовательностью дисков, влетающих в пространство взаимодействия в течение нескольких СВЧ-периодов (в программе их может быть 9). Силы кулоновского отталкивания каждой крупной частицы (диска) вычисляются по двумерной модели, путем разбиения каждого диска на 10 соосных радиальных колец.

Расчет кулоновских полей проводится на основе алгоритма быстрого решения уравнения Пуассона (1) в аксиально-симметричной области $\{[0, Z_{max}]; [0, R_{max}]\}$:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{\rho(r, z)}{\varepsilon_0}; \quad \frac{\partial U}{\partial r}(0, z) = 0 \quad (1)$$

, где U – искомый потенциал, $\rho(r, z)$ – плотность пространственного заряда.

В одномерном приближении уравнения движения пучка (2) и уравнение для произвольной гармоники наведенного тока (3) в зазоре резонатора имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{e}{m} (E_s + E_c); \quad \frac{dz}{dt} = v \quad (2)$$

, где v – скорость частицы, E_s – кулоновское поле, E_c – СВЧ-поле резонатора, действующее на частицу, $z|_{t=t_0} = 0$, $v|_{t=t_0} = v_0$.

$$I_p^k = \frac{I_0}{\pi} \int_0^{2\pi} d(\omega t_0) \int_{t_1^k(t_0)}^{t_2^k(t_0)} E^k(t_0, t) v(t_0, t) e^{-j p \omega t} d(\omega t) \quad (3)$$

, где v_0 — скорость инжектированного пучка, I_0 – ток пучка, $E^k(z)$ – функция

распределения СВЧ-поля в k -ом зазоре, ωt_0 – фаза влета частицы в пространство взаимодействия, t – текущее время, $t_1(t_0)$ – время влета частицы в поле зазора, $t_2(t_0)$ – время вылета частицы из зазора. Для последовательности дисков формула (3) принимает вид:

$$I_p^k = \frac{\omega q_0}{\pi} \sum_{i=1}^{N_p} \int_{t_1^k(t_0)}^{t_2^k(t_0)} E^k(t_0, t) v(t_0, t) e^{-jp\omega t} d(\omega t) \quad (4)$$

, где q_0 – заряд диска, N_p – количество дисков, приходящихся на период СВЧ-колебания.

В программе Klys 4.5 реализованы следующие методы и модели: 1) для областей с осевой симметрией численно определяется поле диска (методом крупных частиц в варианте Хокни) и распределение электрического поля резонатора для его реальных размеров; 2) для вычисления полей пространственного заряда используется 3-х периодная модель пучка, решается релятивистское уравнение движения частиц и учитывается их возвратное движение; 3) расчёт самосогласованного взаимодействия проводится с помощью итерационных процедур, использующих методы нелинейного преобразования числовых последовательностей (типичная относительная погрешность расчёта самосогласованного режима 0,01-0,1% по КПД); 4) при расчёте высокочастотного взаимодействия учитывается форма огибающей электронного пучка в статическом режиме.

Методами компьютерного моделирования автором исследован новый БАК – метод (BAC - «bunching, alignment, collecting») группирования электронов, предложенный Гузиловым И.А., в котором плотность конечного сгустка увеличивается с помощью его разгруппировок и сбора периферийных (крайних) электронов сгустка электрическими полями дополнительных резонаторов как первой, так и второй гармоники. Во время разгруппировки сгустка замедленные электроны попадают в ускоряющую фазу высокочастотного поля разгруппирующего резонатора, а ускоренные электроны сгустка встречают замедляющую фазу высокочастотного поля (рис. 1).

При этом принудительно уменьшается амплитуда конвекционного тока разгруппирующими резонаторами (рис. 1). Результаты моделирования подтвердили обоснованность и перспективность данного метода.

Метод основан на вынужденных колебаниях ядра пучка, то есть электроны ядра сгустка совершают колебательные движения, приближаясь к центру сгустка и удаляясь от него. Это необходимо, чтобы ядро сгустка не было разрушено во время сбора в сгусток периферийных электронов. То есть в этом методе происходит ослабление группировки

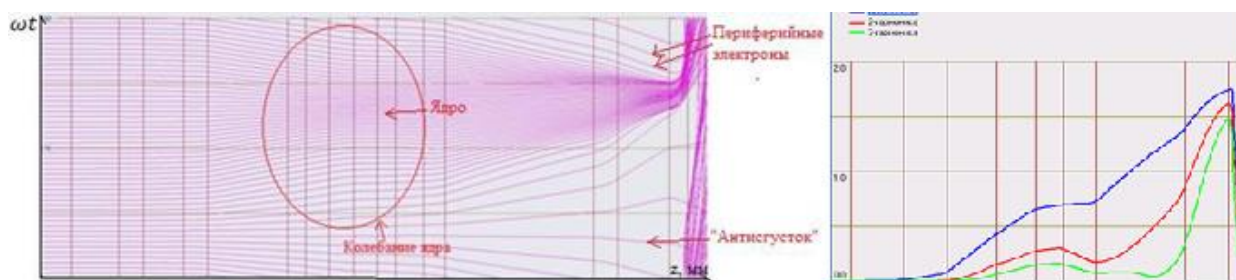


Рис. 1. Фазовые траектории электронов и распределение амплитуд конвекционного тока в клистроне ВТ258 (DEV 5.1).

ядра сгустка разгруппирующими резонаторами (резонаторами, частоты которых существенно ниже частоты входного сигнала), пока периферийные электроны догоняют сгусток. В одном таком колебательном движении принимают участие три резонатора.

Показано, что частота разгруппирующего резонатора БАК – клистрона с одним колебанием ядра должна быть существенно ниже частоты основного сигнала, и выбрана из диапазона $0,7 f_0 < f_5 < f_0$, где f_0 – частота основного сигнала [8]. В распределении скоростей электронов после вылета из разгруппирующего резонатора происходит выравнивание их скоростей (электроны встречаются с противоположной фазой высокочастотного поля). В оптимизированном варианте на третьей стадии («collecting») БАК – метода амплитуды первой гармоники высокочастотного напряжения предвыходных резонаторов находятся на уровне $0,3 U_0$ и $0,4 U_0$ соответственно.

Показано, что с помощью БАК – метода может быть достигнут рост эффективности на 12% исходного клистрона, взятого за прототип. Несмотря на разброс результатов расчётов (67-72% в эффективности) различных одномерных и двумерных программ, все они хорошо предсказывают эффективность выше значения в 60%.

Было предложено использовать два БАК – колебания для получения максимальной эффективности однолучевого клистрона, работающего на частоте 800 МГц (L – band) при силе тока 12,6 А и напряжении пучка 133,55 кВ с уровнем непрерывной выходной мощности 1,5 МВт. Клистрон состоит из 13 однозачорных резонаторов, включая две группы БАК – резонаторов по 3 штуки в каждой (рис. 2). Зазоры резонаторов (сетки) на рисунке фазовых траекторий обозначены парными линиями. Максимальное значение амплитуды конвекционного тока первой гармоники в выходном резонаторе достигает значения $1,8 \div 1,82 I_0$ (рис. 2). Эффективность клистрона при этом находится на уровне 82-83%.

Полученные результаты могут быть использованы с целью модернизации клистронов для разрабатываемого в настоящее время перспективного сверхмощного коллайдера Future Circular Collider (FCC). Клистроны с эффективностью выше 80% -

ключевые устройства для будущего поколения крупных ускорителей. Вопрос о КПД таких клистронов является крайне важным.

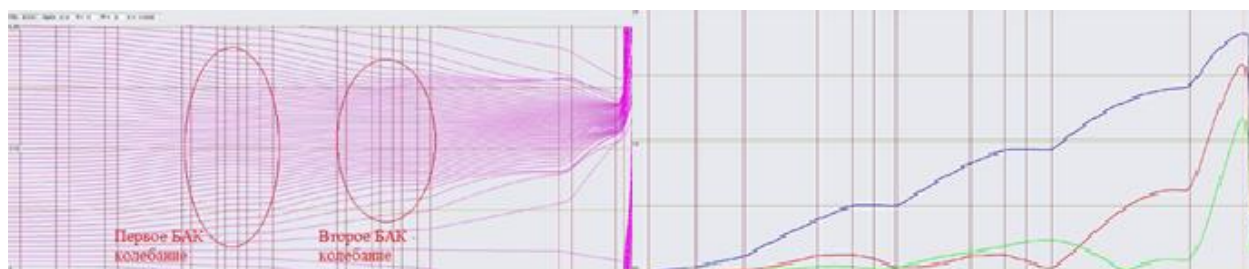


Рис. 2. Фазовые траектории электронов и распределение амплитуд конвекционного тока в оптимизированном клистроне с двумя БАК – колебаниями.

Проведено сравнение БАК – метода группировки электронов с двумя колебаниями ядра и СОМ – метода группировки в клистронах с одинаковой эффективностью (80%), работающих на одной и той же частоте при одном и том же питающем напряжении. Во втором случае длина пространства взаимодействия составляет около 13 электронных длин волн, в первом – около 6. Таким образом, БАК – метод позволяет получить такую же высокую эффективность на сравнительно меньшей длине пространства взаимодействия. Длина пространства взаимодействия в БАК – методе сравнима с традиционными способами группировки ($4-8 L_e$), что позволяет использовать предлагаемый способ на практике без увеличения массы и габаритов клистрона.

В четвертой главе рассмотрены электродинамические и электронно-оптические задачи, которые необходимо было решать автору при построении первого БАК – клистрона.

По результатам оптимизации электродинамической системы принято решение в первом экспериментальном БАК – клистроне использовать девять кольцевых резонаторов, два из которых настроены на вторую гармонику с целью уменьшения длины электродинамической системы. Резонаторы обладают осевой симметрией. В полости резонатора имеются ёмкостная часть, содержащая 40 каналов, расположенных в два ряда по азимуту, а также две индуктивные части. Вариант конструкции кольцевого резонатора был предложен Фрейдовичем И.А. Геометрические размеры индуктивной части резонаторов подбираются таким образом, чтобы создать одинаковое характеристическое (волновое) сопротивление для внутреннего и внешнего рядов каналов (создать одинаковые условия для группировки электронов всех пучков). Электродинамическое моделирование проводилось в трехмерных программных комплексах, в которых решаются сеточные уравнения Максвелла.

Важным преимуществом клистронного усилителя является применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид. Такой

выбор позволяет уменьшить потребление энергии, вес и стоимость клистрона. Проведён выбор оптимальных значений магнитного поля в рабочих промежутках магнитной системы для получения 100% токопрохождения электронов через каналы резонаторного блока до коллектора. Значения магнитных полей достигают величины 1400 Гс в третьем рабочем промежутке. Увеличение магнитного поля в каждом последующих рабочих промежутках необходимо для компенсации поперечных скоростей электронов в сгустке, а также повышения плотности пространственного заряда в сгустке при группировке.

Для уменьшения влияния высшего типа колебаний на рабочий вид колебаний в выходном резонаторе было предложено подрезать резонатор с той стороны, с которой наблюдается максимум электрического поля этого вида колебаний. Также предложены механизмы перестройки частоты и добротности выходного резонатора. Перестройка осуществляется стержнями, расположенными в волноводном тракте выходного резонатора. Стержни, расположенные в максимуме напряженности электрического поля, изменяют частоту, а стержни, расположенные в минимуме, – нагруженную добротность.

Было рассмотрено распределение электронов на коллекторе в СВЧ – режиме. Размер электронных пятен в коллекторе электронов из внутренних каналов приблизительно в 5 раз больше размера электронных пятен электронов внешних каналов, поскольку электроны внутренних каналов проходят большее расстояние до оседания и распределены на большей площади коллектора, то есть создают меньшую тепловую нагрузку по сравнению с электронами внешних каналов.

В пятой главе представлен обзор экспериментальной проверки теоретических идей в первых многолучевых БАК – клистронах большой мощности, разработанных и сконструированных в организации «Базовые технологии и компоненты вакуумных приборов». Испытания, в которых автор принимал участие, проводились в ОИЯИ и в ЦЕРН'е.

На «холодных» измерениях автором настраивались частоты всех резонаторов в соответствии с расчётом ВТ258 (рис. 1), КПД которого в одномерной программе составило 72,9%. Также на «холодных» измерениях проводилось выравнивание характеристического сопротивления в пролётных каналах резонаторов для создания одинаковых условий группировки электронов.

Динамические испытания первого образца БАК – клистрона ВТ – 258 первоначально были проведены в ОИЯИ г. Дубна (рис. 3). При перестройке катодного напряжения от 48 до 55 кВ токопрохождение электронов от катода до коллектора в статическом (диодном) режиме изменялось в пределах от 94 до 96 %. На вход клистрона подавался высоковольтный импульс длительностью 5 мкс и частотой

повторения 10 Гц.

Максимальная выходная мощность 7 МВт была измерена на частоте 3,004 ГГц при

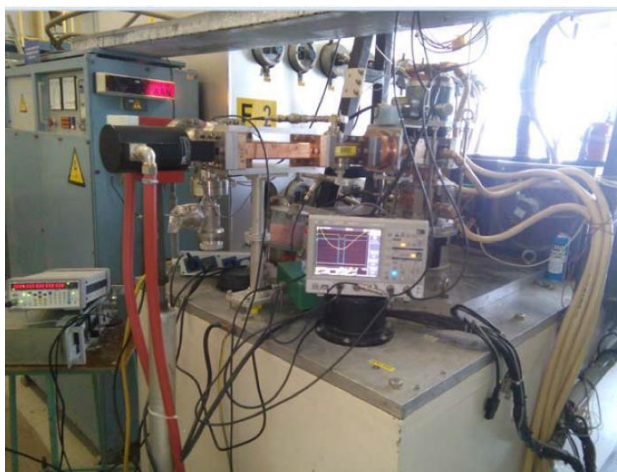


Рис. 3. БАН многолучевой клистрон на испытательном стенде.

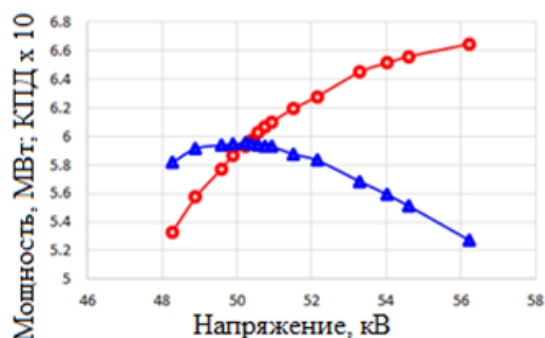


Рис. 4. График зависимости эффективности (треугольники) и выходной СВЧ-мощности (кружки) в насыщении при 3,003 ГГц от напряжения.

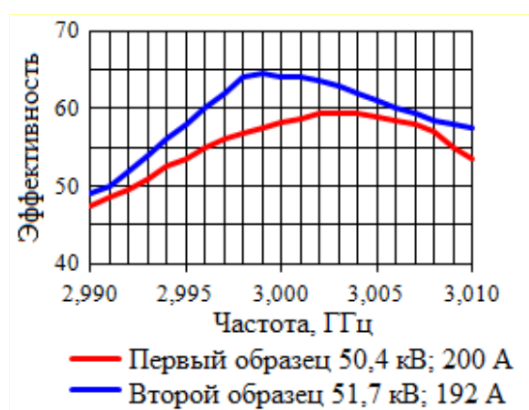


Рис. 5. Частотная характеристика первого и второго клистронов.

сравнению с прототипом – клистроном КИУ-147 с 42 до 64%. Повышение КПД по сравнению с прототипом позволило в 1,5 раза снизить рабочий ток прибора (с 300 А до 200 А) и сократить в 1,5 раза потребляемую энергию при сохранении рабочего

напряжении пучка 51,7 кВ и силе тока 205 А, мощность СВЧ сигнала, поступающего с предусилителя равнялась 105 Вт. КПД на этой частоте составляет чуть больше 60 %.

В ЦЕРН'е первый БАН – клистрон был испытан с частотой повторения импульсов 110 Гц и длительностью импульса, достигающей до 7,5 мкс. Самая большая эффективность в насыщении 59,7% была измерена на частоте 3,003 ГГц при напряжении пучка 50,25 кВ и силе тока 195 А (рис. 4).

Также в ЦЕРН'е были проведены калориметрические измерения. Грубая оценка без учёта интеграла в недействующей части осциллограммы показывает эффективность клистрона на уровне 55%.

Максимальная эффективность 64% была достигнута во втором клистроне. Испытания

второго клистрона проводились в ОИЯИ г. Дубна с частотой повторения импульсов 10 Гц и длиной импульса 3 мкс. Рабочее напряжение и сила тока в рабочей точке составили 51,7 кВ и 192 А соответственно. На рисунке 5 показано сравнение частотных характеристик первого и второго клистрона. Эффективность второго БАН-клистрона оказалась выше, чем у первого БАН – клистрона, что подтвердило корректность идей.

КПД клистрона ВТ-258 было повышено по сравнению с прототипом – клистроном КИУ-147 с 42 до 64%. Повышение КПД по сравнению с прототипом позволило в 1,5 раза снизить рабочий ток прибора (с 300 А до 200 А) и сократить в 1,5 раза потребляемую энергию при сохранении рабочего

напряжения 50 кВ. Изменения коснулись резонаторного блока, в котором были представлены БАК резонаторы. Впервые в мире экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности многолучевого клистрона за счет применения нового метода группирования (БАК – метода).

Три известных мировых поставщика CPI (США), Thales (Франция), Toshiba (Япония), поставляющие клистроны для современных ускорителей частиц, серийно выпускают однолучевые клистроны S – диапазона с выходной мощностью 6 МВт. Климстроны показаны на рисунке 6. Сравнение характеристик однолучевых клистронов этих поставщиков и разработанного многолучевого БАК клистрона ВТ258 приведено в таблице 1.



Рис. 6. Прототипы клистронов Toshiba, CPI, Thales, БТКВП.

Таблица 1. Параметры клистронов.

Клистрон	VKS – 8262	TH 2173K	E3779	«BT258»
Производитель	CPI	Thales	Toshiba	БТКВП
Страна	США	Франция	Япония	Россия
Частота, ГГц	2,9985	2,9985	2,9985	2,9985
Пиковая выходная мощность, МВт	6	5	6	7
КПД, %	45	50	42	64
Средняя выходная мощность, кВт	36	36	6	30
Пиковая входная мощность, Вт	200	40	75	125
Усиление, дБ	45	51	49	46,7
Пиковое напряжение, кВ	135	130	145	<52
Пиковый ток, А	109	90	105	190
Количество пучков	1	1	1	40
Длина импульса, мксек	17	17	2,5	17
Масса, кг	200	160	240	95
Длина, мм	1000	975	1000	800

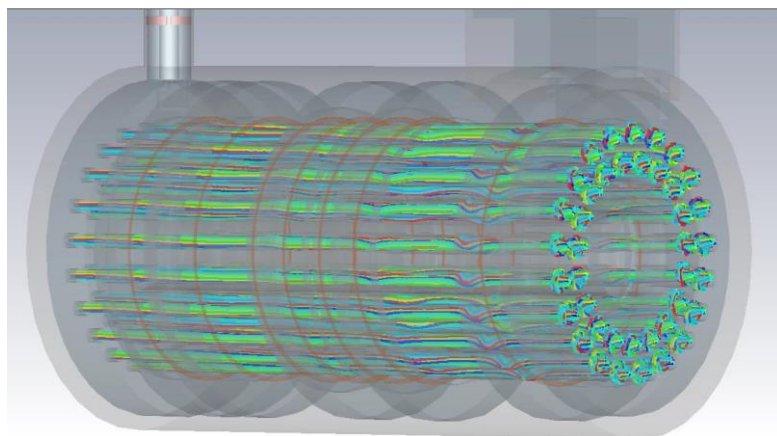
Климстроны, представленные в таблице 1, работают в одном диапазоне частот с одинаковой импульсной выходной мощностью. При этом следует подчеркнуть преимущества разработанного многолучевого клистрона «BT258»: 1) эффективность клистрона существенно выше эффективности аналогов; 2) низкое рабочее напряжение (ниже 60 кВ); 3) применение постоянных магнитов с периодической фокусировкой, заменяющие фокусирующий соленоид, что позволяет уменьшить массу всей системы, а

также избежать энергопотребления магнитной системой; 4) самая маленькая длина из представленных клистронов; 5) низкий уровень рентгеновского излучения со стороны коллектора.

Идеи СОМ и ВАС группировки электронов были восприняты научным сообществом положительно, после этого исследователи и разработчики по всему миру начали применять эти идеи при создании мощных высокоэффективных клистронов. Активно ведутся работы, использующие ВАС и СОМ методы группировки электронов за рубежом (Китай, Япония, США, Франция).

Увеличение выходной мощности клистронов всегда являлось актуальной задачей современной СВЧ электроники. С этой целью автором были изучены возможности реализации разработанной конструкции БАК-клистрона для повышения выходной мощности СВЧ до уровня 10 МВт и более. Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции. Выходная мощность 20 МВт вполне достижима. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью 10 – 20 МВт составляет порядка 70%. КПД клистронов с уровнем выходной мощности 30-40 МВт, конструкция которых будет существенно отличаться, составляет 66-68%. Обоснованность расчётов подтверждена результатами испытаний клистронов.

В шестой главе автором исследованы трёхмерные физические процессы в многолучевом клистроне, выявлены физические факторы, которые приводят к значительным затруднениям при стремлении повысить КПД разработанных многолучевых клистронов до значений 70-80%. Причинами необходимости трёхмерного рассмотрения физических процессов в многолучевом приборе О-типа являются: заниженные на 10-20% эффективности экспериментальных приборов по сравнению с расчётными значениями (невыявление одномерным анализом объективных причин такого

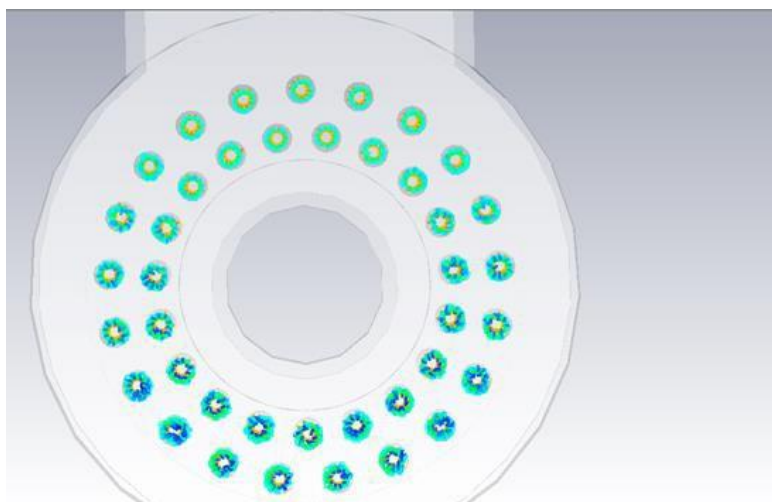


расхождения результатов); экспериментальные расстройке характеристических параметров и частот резонаторов; изменение модового состава СВЧ колебаний при увеличении числа пучков и диаметров кольцевых (сверхразмерных)

Рис. 7. Модель многолучевого клистрона в трёхмерном резонаторов мощных многолучевых клистронов с искажени-

ем результирующего поля; рассмотрение путей улучшения выходных характеристик разработанного БАК – клистрона с выходной мощностью 6 МВт (рис. 7). Для решения поставленной задачи был выбран метод «Частица в ячейке». «Частица в ячейке» – трёхмерный пакет для расчёта динамики электронов и других заряженных частиц в трёхмерных электромагнитных полях во временной области. Этот метод позволяет выполнить моделирование траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях с учетом влияния сил пространственного заряда, релятивистских поправок и т.д. Электромагнитные поля вычисляются в узлах сетки по схеме с перешагиванием, при этом электроны движутся в непрерывном фазовом пространстве.

Впервые получен опыт постановки задачи, определения времени расчёта, сетки разбиения, количества заряженных частиц в трёхмерных программных пакетах, поскольку до этого исследователи и разработчики использовали только одномерные и двумерные программные комплексы.



Результирующее значение КПД клистрона (рис. 7) при трёхмерном анализе оказывается существенно ниже экспериментального из-за недостаточной величины внешнего фокусирующего магнитного поля вдоль длины клистрона и неравномерности характеристического сопротивле-

Рис. 8. Неравномерное торможение электронов после ния в различных пролётных **прохождения зазора выходного резонатора (КПД 71%).** каналов входного и выходного резонаторов в использованной методике расчёта. Результаты проведенного трёхмерного моделирования процессов усиления волн СВЧ показали, что в различных каналах электроны группируются по-разному (рис. 8). Распределение электромагнитного поля является неравномерным, заметное влияние оказывает несимметричность устройств связи для ввода и вывода энергии, что приводит к фазовым набегам бегущих волн со стороны противоположной устройству связи в применяемых кольцевых (сверхразмерных) резонаторах.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты** диссертации, заключающиеся в следующем:

1. Проведенные в процессе выполнения диссертационной работы численные расчеты

группирователя клистрона, высокочастотных полей в резонаторах, электронной оптики многолучевого потока, профиля магнитного поля в каналах резонаторов и распределения тепловой нагрузки в коллекторе с применением современных пакетов программ позволили определить параметры конструкции первых многолучевых БАК – клистронов.

2. Проверена в расчётах и впервые в мире подтверждена в экспериментах возможность повышения эффективности многолучевого клистрона за счет применения нового метода группирования (БАК – метода). Динамические испытания первых БАК-клистронов, проведенные в ОИЯИ (г. Дубна) и в ЦЕРН (г. Женева), показали впервые усиление СВЧ с максимальной выходной мощностью 7 МВт и эффективностью 64%.

3. Результаты практических испытаний доказывают, что КПД новых клистронов, в которых представлены БАК – резонаторы, может быть выше на 20% по сравнению с прототипами, в которых используется традиционная группировка электронного потока, выше на 15-20% по сравнению с зарубежными однолучевыми аналогами, рабочее напряжение при этом ниже в 2,5 раза, энергопотребление меньше в 1,5 раза. Внедрение результатов работы позволит создать новое поколение клистронов, превосходящих мировые аналоги.

4. Расчётная эффективность модифицированных БАК – клистронов с выходной мощностью от 10 до 40 МВт находится на уровне $67 \div 70\%$. Клистрон с уровнем выходной мощности 10 МВт может быть спроектирован без изменения конструкции. Конструкция клистронов с уровнем выходной мощности 30-40 МВт будет существенно отличаться.

5. Проведенные теоретические исследования с применением нескольких БАК – колебаний показывают, что КПД существующих однолучевых клистронов в ускорительной технике может быть выше 80% при сохранении габаритов клистронов.

6. Проведенное сравнение БАК – метода группировки электронов с двумя колебаниями ядра и СОМ – метода группировки в клистронах с одинаковой эффективностью (80%), работающих на одной и той же частоте при одном питающем напряжении, показывает возможность значительного уменьшения длины группирователя.

7. Трёхмерный анализ показал, что основными физическими ограничениями эффективности многолучевого клистрона являются интерференция волн в сверхразмерных кольцевых выходных резонаторах, влияние пространственного заряда и недостаточный уровень внешнего фокусирующего магнитного поля.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих

Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова

[A1] Егоров Р. В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю. Импульсный 6 МВт БАК

многолучевой клистрон // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, № 7. **IF = 0,354.**

[A2] Егоров Р.В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. О возможности повышения выходной мощности БАК-клистронов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2017, № 10. **IF = 0,354.**

[A3] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Егоров Р.В., Ву К.Т.Ч. Динамика ленточного электронного потока в циклотронном преобразователе энергии // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2018, № 4. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.4.2. **IF = 0,354.**

[A4] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Егоров Р.В., Ву К.Т.Ч. О возможности создания клистронов с 3D-группировкой электронного потока // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2018, № 4. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.4.1. **IF = 0,354.**

[A5] Егоров Р.В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. О возможности применения двух БАК-колебаний в клистроне с высокой эффективностью // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2018, № 9. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.9.15. **IF = 0,354.**

[A6] Егоров Р.В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. БАК-клистроны — новое поколение клистронов в вакуумной электронике // Вестник Московского Университета. Серия 3: Физика и Астрономия, 2019, №1, с. 36-39. / Egorov R.V., Guzilov I.A., Maslennikov O.Yu., Savvin V.L. BAC-Klystrons: A New Generation of Klystrons in Vacuum Electronics // Moscow University Physics Bulletin, 2019, Vol. 74, No. 1, pp. 38-42. DOI: 10.3103/S0027134919010077. **IF = 0,933.**

[A7] Егоров Р.В., Саввин В.Л. Трёхмерное моделирование процессов усиления в многолучевом клистроне // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2019, № 6. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.6.1. **IF = 0,354.**

Публикация в рецензируемом научном журнале

[A8] Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Кобец В.В., Сумбаев А.П., Егоров Р.В. Испытания высокоэффективного импульсного многолучевого БАК – клистрона 10 – см диапазона. Журнал «Сообщения ОИЯИ», категория «Ускорители», № Р9-2017-78, с. 1-13, 2017.

Тезисы докладов в сборниках конференций

[A9] Михеев Д.А., Саввин В.Л., Ву К.Т.Ч., Егоров Р.В., Шуваев И.И. «Распространение высокопереванских ленточных электронных потоков с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях», Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2016, т. 2, с.242-246.

[A10] Егоров Р.В. «Многолучевой клистрон S – диапазона для ЦЕРН’а» // Сборник

- докладов «Ломоносов – 2016», МГУ им. М.В. Ломоносова, Секция «Физика», 2016, с. 94.
- [A11] Guzilov I., Egorov R., Maslennikov O., Mcmonagle G., Syrathev I., Woolley B. Commercial Prototype of High Efficiency S-band Pulsed BAC MBK. *Proceeding of 11th International Vacuum Electron Sources Conference*, p. 44-45, Seoul, Korea, October 18-20, 2016.
- [A12] Егоров Р.В. «Многолучевой высокоэффективный клистрон S – диапазона» // Сборник докладов «Ломоносов – 2017», МГУ им. М.В. Ломоносова, Секция «Физика», 2017, с. 506.
- [A13] Guzilov I., Maslennikov O., Egorov R., Syrathev I., Kobets V., Sumbaev A. Comparison of 6 MW S-band Pulsed BAC MBK with the Existing SBKs. 18th International Vacuum Electronics Conference, p. 68-69, London, April 24-26, 2017.

Список цитируемой литературы

- [1] A.Yu. Baikov, D.M. Petrov. «Problems of creation powerful and super-power klystrons with efficiency up to 90%» // *Proc. of International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-high Frequencies"*, May 24-28, 1999. - St. Petersburg, 1999. - P. 5-8.
- [2] Baikov, A. Yu., Grushina, O. A., and Strikhanov, M. N., “Simulations of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons”, *Technical Physics*, 59(3), pp. 421-427, 2014.
- [3] I.A.Guzilov. L and S-band high-efficiency multi beam klystron development. BAC – method of increasing efficiency. *CLIC workshop*, Geneva, CERN, 3-7 February, 2014.
- [4] Guzilov I.A. BAC method of increasing the efficiency in klystrons // 2014 *Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*, p. 1-2, St. Petersburg, Russia, 30 June – 4 July, 2014.
- [5] V. Hill, C. Marrelli, D. Constable, C. Lingwood. Particle-in-Cell Simulation of the Third Harmonic Cavity F-Tube Klystron. 17th International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, USA, April 19-21, 2016.
- [6] Konnov A.V. and Malykhin A.V.// Frequency-domain code Dev. 5.0 for analysis of coupled cavity traveling wave tubes, klystrons and their hybrids, IVEC 2005, Noordwijk, Netherlands, pp. 195-198.
- [7] A.V. Malykhin, E. P. Yakushkin, A.V. Konnov "Validation of klystrons development code - KLYS 4.5". *Proceedings of IV International Vacuum Electronics Conference IVEC2003*, Seoul, Korea, 2003.
- [8] Патент RU2654537. Гузилов И.А., Масленников О.Ю. Способ формирования сгустков высокой плотности энергии в электронном потоке и пролетный клистрон, 2017.