АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ИСТОК» ИМЕНИ А.И. ШОКИНА»

На правах рукописи

Crepop

Богомолова Евгения Александровна

ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И ТЕПЛОРАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, Галдецкий Анатолий Васильевич

Фрязино 2021 г.

Содержание

Введение
1. ПРИБОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С
ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ТИПАМИ ЗС: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК 18
1.1 Вводные сведения
1.2 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона со спиральной ЗС 19
1.3 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона с ЗС типа
«петляющий волновод»
1.4 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона с 3С типа ЦСР 26
1.5 Выводы
2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭДХ 3С 29
2.1 Определение пространственных гармоник ЗС и их ДХ 29
2.1.1 Определение сопротивления связи ЗС
2.2 Численное моделирование дисперсионной характеристики и величины
сопротивления связи в 3С
2.2.1 Моделирование ЭДХ ЗС типа ЦСР и сравнение полученных результатов с
экспериментальными данными
2.3 Выводы
3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ТИПА «СДВОЕННАЯ ЛЕСТНИЦА» 46
3.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи
3.1.1 Влияние формы щели связи на ЭДХ многолучевой ЗС типа «сдвоенная
лестница»
3.1.2 Влияние внутреннего диаметра отверстия дополнительной диафрагмы и
ширины ее проточки на ЭДХ многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» 50
3.2 Оценка параметров ЛБВ с многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» в
режиме большого сигнала
3.3 Выводы

4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ТИПА «ПЕТЛЯЮЩИЙ ВОЛНОВОД» 64
4.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи
4.1.1 Влияние ширины и высоты прямоугольного выступа в модифицированной
ЗС типа «петляющий волновод» на ЭДХ 65
4.1.2 Влияние ширины и высоты индуктивных элементов на ЭДХ
модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»
4.2 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии модифицированной ЗС типа
«петляющий волновод»76
4.3 Локальный поглотитель СВЧ-энергии в модифицированной ЗС типа
«петляющий волновод»79
4.4 Оценка параметров ЛБВ с модифицированной ЗС типа «петляющий
волновод» в режиме большого сигнала
4.5 Выводы
5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОЙ
ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АЛМАЗНЫМ ТЕПЛООТВОДОМ 86
5.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи
5.1.1 Влияние толщины проводников на ЭДХ планарной ЗС типа «меандр» 87
5.1.2 Влияние ширины проводников на ЭДХ планарной ЗС типа «меандр» 92
5.2 Электронно-оптическая система для планарной ЗС типа «меандр»
5.3 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС типа «меандр»96
5.4 Оценка параметров ЛБВ с планарной ЗС в режиме большого сигнала
5.5 Выводы
Заключение 101
Список использованной литературы104
Приложение

Список принятых сокращений

- ЭДХ электродинамические характеристики
- ЭВП электровакуумные приборы
- ЭМП электромагнитное поле
- ЭП электронный поток
- ЛБВ лампа бегущей волны
- ЗС замедляющая система
- ЦСР цепочка связанных резонаторов
- ПС периодическая структура
- ДХ дисперсионная характеристика
- *R*_{св} сопротивление связи
- ТТП твердотельные приборы
- РЛС радиолокационные станции
- БПЛА беспилотный пилотируемый летательный аппарат
- CVD (Chemical vapor deposition) алмаз алмаз, выращенный методом осаждения

из газовой фазы при низком давлении

Введение

В настоящее время одной из задач СВЧ-электроники является создание источников электромагнитных колебаний мм- и субмиллиметрового диапазонов длин волн [1,2]. Освоение этих диапазонов помимо научного представляет практический интерес для решения задач дальней космической связи, ближней радиолокации, передачи больших объемов информации и др. [3-8].

Первоначально электронные компоненты мм-диапазона длин волн в основном предназначались для военных и космических систем, однако сегодня они активно проникают на рынки устройств гражданского назначения, в частности, телекоммуникационный стандарт – 5G [9], активно развивается новый повышающий функциональные возможности, скорость передачи данных телекоммуникационных систем и соответственно технические требования к ним на порядок. Уже сейчас системы беспроводной связи малой дальности, способные передавать данные на расстояние 3÷5 м со скоростью 5 Мбит/с, работают на частоте 60 ГГц [3]. Для систем большей дальности (до 1 км и более) со скоростью передачи 1÷2 Гбит/с предполагается использовать частоты 71÷76, 81÷86 и 92÷95 ГГц [6]. При этом, как показывают некоторые оценки [8], для создания базовых станций потребуются компактные СВЧ-усилители миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью не менее 40 Вт при ускоряющем напряжении не более 20 кВ. В ближайшие годы ожидается активное развитие сверхскоростных беспроводных мобильных сетей. Следует отметить, что данный сегмент рынка оценивается в сотни миллионов долларов. Таким образом, телекоммуникации 5-го поколения – это стратегически важная для государства группа технологий (Распоряжение Правительства РФ №1632-р от 28.07.2017г.).

Другое важное практическое применение использования радиоволн миллиметрового диапазона – в РЛС с селекцией движущихся целей, в РЛС со сжатием импульсов по длительности для повышения разрешающей способности и дальности обнаружения, в РЛС бокового обзора на летательных аппаратах для

5

увеличения угловой разрешающей способности без увеличения габаритных размеров антенны. Причем в настоящее время значение этих задач значительно выросло, в частности, с бурным развитием беспилотных пилотируемых летательных аппаратов (БПЛА). Представляется весьма привлекательным использование радиоволн миллиметрового диапазона для обнаружения и распознавания малоразмерных целей, позволяя эффективно бороться с БПЛА, включая групповые цели (рой БПЛА).

Развитие средств радиоэлектроники и усложнение выполняемых ими функций выдвигают все новые и более сложные требования к уровню мощности, стабильности колебаний, рабочей полосе частот и т.д. Электровакуумные приборы (ЭВП), обладая таким существенным преимуществом перед твердотельными приборами (ТТП), как высокая надежность в условиях воздействия внешних неблагоприятных факторов (радиация, тепловые и механические перегрузки, тяжелые климатические условия), также могут быть миниатюризированы, как и ТТП СВЧ.

Это обстоятельство стимулирует создание и исследование миниатюрных низковольтных ЭВП СВЧ, в частности, ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов в мм-диапазоне длин волн как в нашей стране, так и за рубежом. Снижение ускоряющих напряжений позволяет конструировать лампы малых габаритов и весов при сохранении их высоких электрических и эксплуатационных характеристик. Очевидно, что создание таких приборов может серьезно облегчить разработку малогабаритной и компактной радиоаппаратуры.

Этими причинами, в первую очередь, объясняется значительный интерес к особенностям физических процессов взаимодействия электронных потоков (ЭП) с электромагнитными волнами при снижении ускоряющий напряжений и выяснению возможностей создания низковольтных ЛБВ мм-диапазона длин волн.

Задачи, связанные с повышением эффективности взаимодействия ЭП с ЭМП замедляющей системы (ЗС) ЛБВ всегда занимали одно из центральных мест в СВЧэлектронике. По этим причинам во всех развитых странах идет разработка новых

6

3C, соответствующих требованиям по величине ускоряющего напряжения, сопротивления связи и широкополосности в сочетании с технологичностью, улучшенной теплорассеивающей способностью и низкими производственными затратами для возможности реализации крупносерийного производства.

В нашей стране большой вклад в развитие теории ЛБВ и разработку приборов Л.А. Вайнштейн, Д.И. Трубецков, В.А. Солнцев, внесли А.Д. Григорьев, А.С. Победоносцев, Р.А. Силин, И.Е. Роговин, А.В. Малыхин, Ю.П. Мякиньков, В.Г. Бороденко, В.И. Роговин, Б.В. Сазонов, Г.В. Рувинский, Н.М. Рыскин, С.П. Морев, Д.А. Комаров, А.В. Коннов, Е.М. Ильина, П.Д. Шалаев, О.Н. Аристархова, И.А. Накрап и другие исследователи.

Разработка ЛБВ миллиметрового диапазона сопряжена с рядом трудностей. Для обеспечения эффективного электронно-волнового взаимодействия в широкой полосе частот мм-диапазона ЗС должны иметь незначительную крутизну дисперсионной характеристики и бо́льшее сопротивление связи, чем в ЛБВ сантиметрового диапазона, для компенсации значительных омических потерь. Одним из возможных подходов при решении данной задачи является модификация известных конструкций ЗС, позволяющая улучшить электродинамические характеристики (ЭДХ), а также использование новых материалов и технологий.

Для исследования особенностей распространения электромагнитных волн в модифицированных конструкциях ЗС мм-диапазона, а также построение ЛБВ с качественно новыми параметрами, требуется с наибольшей достоверностью рассчитывать ЭДХ ЗС. Данную задачу можно решить путем разработки высокоточного и в тоже время производительного программного обеспечения для расчета ЭДХ ЗС и последующей оптимизации.

Разработке прецизионных технологий изготовления ЗС мм-диапазона посвящено большое число зарубежных работ. К сожалению, отечественные технологии сильно отстают и нуждаются в улучшении точностных характеристик и качества поверхностей. Конструкции и технологии изготовления и сборки,

хорошо себя зарекомендовавшие в ЛБВ сантиметрового диапазона, оказываются непригодными для мм- и субмиллиметровых ЛБВ.

Для получения ощутимой величины выходной мощности в миллиметровых ЛБВ приходится значительно увеличивать ускоряющее напряжение, что затрудняет их использование в бортовой аппаратуре. Одним из путей повышения уровня выходной мощности ЛБВ при уменьшении ускоряющего напряжения является переход к многолучевым ЗС. Создание мощных бортовых ЛБВ с ускоряющим напряжением не более 6 кВ требует новых технических решений, поскольку проблемы, обусловленные уменьшением размеров, становятся особенно острыми. Разработке многолучевых ЗС мм-диапазона для бортовых ЛБВ посвящено сравнительно небольшое число работ. При этом основное внимание уделялось ЗС типа «петляющий волновод» в силу ее технологичности.

Таким образом, создание новых конструкций ЗС с улучшенными ЭДХ и теплорассеивающей способностью для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона, разработка эффективных методик расчета ЗС является актуальной задачей современной вакуумной СВЧ-электроники, решение которой позволит строить компонентную базу нового поколения для радиоэлектронной аппаратуры специального и двойного назначения.

Цель диссертационной работы. Создание технологичных ЗС для низковольтных мощных ЛБВ миллиметрового диапазона, разработка эффективной методики их расчета, теоретическое и экспериментальное исследование этих систем.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

- 1. проведен анализ известных конструкций ЗС, используемых при создании однолучевых и многолучевых ЛБВ миллиметрового диапазона;
- разработана методика и программный модуль на ее основе по расчету ЭДХ ЗС, сочетающие необходимую точность с небольшими затратами вычислительных ресурсов;

- 3. разработаны технологичные конструкции ЗС с улучшенными ЭДХ;
- проведен анализ физических особенностей распространения электромагнитных волн в предложенных ЗС миллиметрового диапазона длин волн и определены параметры для расширения рабочей полосы частот и повышения сопротивления связи;
- 5. проведены теоретическое и экспериментальное исследования ЭДХ и теплового режима предложенных конструкций ЗС;
- 6. проведена оценка уровня достижимых параметров в низковольтных ЛБВ ммдиапазона при использовании предложенных ЗС.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- Разработаны методика и программный модуль анализа электродинамических характеристик ЗС различного типа на базе модели одного периода ЗС. Показана возможность оперативного расчета характеристик ЗС, в том числе не имеющих плоскостей симметрии, с отклонением по ДХ менее 0.07% и величине R_{CB} – 3÷10% по сравнению с экспериментом.
- 2. Разработана конструкция планарной 3C типа «меандр», В которой металлический проводник расположен на подвешенной диэлектрической подложке из CVD алмаза (Патент РФ №2653573 приоритет от 06.03.2017). Проведено исследование влияния размеров проводников и подложки на ЭДХ системы. Показано, что при увеличении высоты проводников полоса пропускания расширилась, а увеличение ширины проводников не влияло на ширину полосы пропускания ЗС. Выявлено, что при увеличении высоты проводников 3C уменьшение периода компенсировало уменьшение коэффициента замедления и величины сопротивления связи. Показано, что сопротивление связи в полосе прозрачности имело участки со слабой и сильной дисперсией, причем частота начала резкого спада (излома) кривой сопротивления связи в высокочастотной части определялась отношением толщины проводника к толщине подложки. Установлено, что при увеличении

данного отношения свыше 0.2 участок с высоким сопротивлением связи и слабой его дисперсией продлевался на 20 ГГц в высокочастотную область.

- 3. Разработано новое устройство ввода/вывода СВЧ-энергии для планарной ЗС «меандр» с подвешенной подложкой, выполненное в виде трансформирующего отрезка нерегулярного волновода с согласующим проводящим элементом в виде перемычки серповидной формы. Расчетный КСВН составлял не более 1.7 в полосе 7 ГГц и 1.5 в полосе 5 ГГц.
- 4. Разработана замедляющая система типа «петляющий волновод» с отрезками волновода в Е-плоскости (индуктивные элементы) и выступами в области зазора взаимодействия, в которой увеличена рабочая полоса до 1 ГГц (1.1%) и на 20% величина сопротивления связи по сравнению с традиционной конструкцией ЗС данного типа при ускоряющем напряжении 17.5 кВ.
- 5. Исследовано влияние индуктивных элементов на ЭДХ модифицированной ЗС типа «петляющий волновод». Показано, что коэффициент замедления обратно пропорционален размерам индуктивных элементов. Для обеспечения термомеханической прочности конструкции профилирование фазовой скорости волны осуществлялось за счет изменения размеров индуктивных элементов при неизменном периоде ЗС.
- 6. Разработана конструкция локального поглотителя СВЧ-энергии для модифицированной ЗС типа «петляющий волновод», в которой для увеличения механической прочности поглощающая керамика выполнена в форме «шпильки» с постоянной толщиной. Расчетное согласование секции ЗС с локальным поглотителем было на уровне -30 дБ в полосе частот 2 ГГц (2.1%).
- 7. Разработана многолучевая ЗС типа «сдвоенная лестница» с плоскими диафрагмами и дополнительными диафрагмами с симметричной проточкой для ЛБВ Ка-диапазона. Окна связи в плоских диафрагмах выполнены в виде двух симметрично расположенных щелей, имевших форму сегмента. Дополнительные диафрагмы позволили увеличить сопротивление связи рабочей пространственной гармоники на 30% в полосе частот 3% (до 1 ГГц) по

сравнению с традиционной конструкцией ЗС данного типа. Для обеспечения требуемой термомеханической прочности конструкции плоские диафрагмы имели сечение 0.5×2.4 мм.

Совокупность полученных в работе новых научных результатов позволила сформулировать следующие положения, выносимые на защиту:

- Разработанный программный модуль на основе методики решения задачи на собственные значения для одного периода замедляющей системы позволяет рассчитывать электродинамические характеристики замедляющих систем, в том числе не имеющих зеркальных плоскостей симметрии, с отклонением от экспериментальных результатов менее 0.07% по дисперсионной характеристике и 6.5% по величине сопротивления связи.
- 2. Разработанная конструкция многолучевой замедляющей системы типа «сдвоенная лестница» имеет на 30% бо́льшее сопротивление связи по сравнению с традиционной конструкцией, низкое тепловое сопротивление благодаря плоским диафрагмам с щелями связи в виде сегмента, что обеспечивает надежную работу «прозрачной» ЛБВ *Ка*-диапазона с полосой рабочих частот 3% и уровнем выходной мощности более 200 Вт при ускоряющем напряжении 5.5 кВ.
- 3. Разработанная конструкция замедляющей системы типа «петляющий волновод» имеет на 20% бо́льшее сопротивление связи по сравнению с известными аналогами за счет введения выступов в область зазора электронно-волнового взаимодействия и позволяет профилировать замедление фазовой скорости без изменения периода и теплорассеивающей способности замедляющей системы благодаря введению короткозамкнутых отрезков волновода в Е-плоскости, обеспечивая выходную мощность в ЛБВ *W*-диапазона более 80 Вт и электронный КПД до 4% в рабочей полосе частот 1.1% при ускоряющем напряжении не более 18 кВ.
- 4. Предложенная конструкция планарной замедляющей системы с подвешенной подложкой из CVD алмаза позволяет обеспечить повышенное до 25 Ом

11

сопротивление связи в рабочей полосе частот 3% и надежную работу «прозрачной» ЛБВ *W*-диапазона с непрерывной мощностью не менее 35 Вт при ускоряющем напряжении не более 16 кВ.

Практическая значимость работы.

На основе исследования особенностей распространения электромагнитных волн в замедляющих системах миллиметрового диапазона разработаны и подтверждены патентами РФ новые конструкции ЗС с улучшенной теплорассеивающей способностью для однолучевых и многолучевых ЛБВ.

Разработанная конструкция многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» с дополнительными диафрагмами и программный модуль для расчета ее ЭДХ использованы на всех этапах ОКР по созданию ЛБВ *Ка*-диапазона с выходной мощностью более 200 Вт при ускоряющем напряжении 5.5 кВ и прошли экспериментальную проверку.

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты, выводы и рекомендации имеют общий характер и могут быть использованы при проектировании и разработке ЛБВ О-типа большой мощности в мм-диапазоне.

Разработанный программный модуль по расчету ЭДХ ЗС внедрен в промышленность по производству СВЧ-приборов, а также используется в курсах лекций «Системы автоматизированного проектирования в электронике» и «Вакуумная и плазменная электроника», читаемых на кафедре конструирования СВЧ и цифровых радиоэлектронных средств в филиале РТУ МИРЭА в г. Фрязино.

Таким образом, в работе решена научная задача в области разработки низковольтных мощных ЛБВ мм-диапазона с ЗС, обладающих высокими электродинамическими характеристиками, большей механической и теплорассеивающей способностью, а главное высокой технологичностью.

Достоверность полученных научных результатов.

Научные выводы, полученные в диссертации, подтверждены теоретически и экспериментально. Научные положения диссертации аргументированы и основаны на общепринятых теоретических положениях и строгих математических моделях.

В процессе работы были проведены расчеты ЭДХ ЗС типа ЦСР с помощью предложенного программного модуля и сравнение с экспериментальными для резонаторных 3C различных модификаций, результатами взятых ИЗ обоснованность литературных источников, что подтвердило И точность теоретических расчетов.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях, школах и семинарах:

- 18th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, 24-26 April, 2017;
- Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.);
- Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (г. Саратов, 2018 г.);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ (г. Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017 гг.);
- Всероссийская объединенная научная конференция «Проблемы СВЧ-Электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ – «Инновационные решения Keysight Technologies» (г. Москва, 2015 г.);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения 2016» (г. Москва, 2015 г.);
- Научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧэлектроника» (г. Фрязино, 2013, 2016, 2018 гг.)
- Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им.Шокина» (г. Фрязино, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.)
- Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского (г. Москва, 2015 г.)

По материалам диссертации опубликовано 19 научных трудов (8 статей, 3 патента РФ, 8 докладов на научно-технических конференциях и семинарах).

Личный вклад автора. Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором. Соискателем разработаны конструкции ЗС для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн и методика расчета ЭДХ ЗС, проведены все численные расчеты основных узлов ЭВП.

Постановка задач, включенных в диссертацию, определение методов и подходов к их решению, написание части алгоритмов и программ, проведение теоретического анализа, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялась совместно с научным руководителем и к.ф.-м.н. А.Н. Савиным.

Разработка, теоретическое и экспериментальное исследования ЗС типа «сдвоенная лестница» для ЛБВ Ка-диапазона с полосой рабочих частот 3% и выходной мощностью более 200 Вт при ускоряющем напряжении 5.5 кВ проводились совместно с Б.В. Сазоновым и Г.В. Бакуниным. Исследование ЗС типа «петляющий волновод» и разработка макета ЛБВ *W*-диапазона с рабочей полосе частот 1.1% и выходной мощностью более 80 Вт при ускоряющем напряжении не более 17.5 кВ проводились совместно с Г.В. Бакуниным и Н.М. Коломийцевой. Исследования технологии изготовления макета волноведущей системы и опытных образцов ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза для ЛБВ W-диапазона с непрерывной мощностью не менее 35 Вт при ускоряющем напряжении не более 16 кВ проводились совместно с Г.В. Бакуниным, М.П. Духновским и В.А. Смирновым.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объём диссертации составляет 114 страниц машинописного текста, включая 55 рисунков и графиков, 11 таблиц и список литературы из 93 наименований. Приложение содержит 3 страницы.

14

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность проводимых в диссертации исследований; сформулирована цель и определены основные задачи, решаемые в работе; кратко отражены вопросы, излагаемые в главах диссертации; изложены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит краткий обзор современных мощных ЛБВ типа «О» мм-диапазона. Отмечены основные результаты отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных разработок. Проведен анализ известных конструкций ЗС, используемых в ЛБВ мм-диапазона и обладающих высокими электродинамическими характеристиками, механической и теплорассеивающей способностью, а также высокой технологичностью, сделаны соответствующие выводы и определены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе разработана методика моделирования ЭДХ 3С, в том числе не имеющих зеркальных плоскостей симметрии. Представлен подход, которой позволил моделировать один период 3С, где решалась 3D задача электродинамики на собственные значения с периодическими граничными условиями, и не требовал больших вычислительных ресурсов при сохранении высокой точности расчета. Проведены расчеты ЭДХ тестовых 3С, полученные результаты соответствовали экспериментальным не только качественно, но и количественно.

В третьей главе рассмотрена модифицированная ЗС типа «сдвоенная лестница» для мощной низковольтной многолучевой ЛБВ длинноволновой части мм-диапазона и представлены результаты численного моделирования ее ЭДХ на основе методики расчета, разработанной во второй главе. Проанализированы зависимости ее характеристик от геометрических параметров. Определена оптимальная геометрия ЗС, которая учитывала имеющиеся технологические возможности изготовления, обеспечивала ширину рабочей полосы 2.9% и сопротивление связи 8 Ом при возможности проведения многолучевого ЭП с большим током. Проведено моделирование многолучевой «прозрачной» ЛБВ диапазона 33÷34 ГГц с 6-ю цилиндрическими пучками с общим током 360 мА и

ускоряющим напряжением 5.5 кВ в канале диаметром 500 мкм. При длине 3С 21 мм уровень выходной мощности в импульсном режиме составил 270 Вт, коэффициент усиления 16 дБ и КПД 15.5%.

В четвертой главе представлена модифицированная ЗС типа «петляющий волновод» и результаты численного моделирования ее ЭДХ для W-диапазона на основе методики расчета, разработанной во второй главе. Проанализированы зависимости ее характеристик от геометрических параметров. Предложена 3C, учитывавшая оптимальная геометрия имеющиеся технологические возможности изготовления, обеспечившая ширину рабочей полосы 1 ГГц и сопротивление связи 20 Ом на (+1)-ой рабочей пространственной гармонике. Выполнены расчеты в режиме большого сигнала ЛБВ диапазона 93÷94 ГГц с цилиндрическим пучком с током 94 мА в канале диаметром 400 мкм при ускоряющем напряжении 17.5 кВ. Уровень выходной мощности в импульсном режиме составил более 80 Вт, коэффициент усиления 42 дБ и КПД 4%. Предложен вариант компоновки модифицированной ЗС с интегрированным устройством ввода/вывода СВЧ-энергии, обеспечивший КСВН не более 1.07 в полосе 1 ГГц.

В пятой главе представлены результаты численного моделирования дисперсионной характеристики и сопротивления связи планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой, выполненной из CVD алмаза. Рассмотрены зависимости ЭДХ ЗС от геометрических параметров системы. Предложена геометрия 3C, учитывавшая оптимальная технологические возможности изготовления на предприятии, обеспечившая ширину рабочей полосы 3 ГГц и сопротивление связи 17 Ом на 0-й рабочей пространственной гармонике. Представлены результаты моделирования ЛБВ диапазона 92÷95 ГГц с планарной ЗС и ленточным пучком с током 43 мА при ускоряющем напряжении 15.6 кВ. Показано, что выходная мощность составила более 35 Вт, усиление 16 дБ и максимальное значение электронного КПД 7% в рабочей полосе 5 ГГц при длине ЗС 24.7 мм. Предложено устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС, обеспечившее КСВН не более 1.7 в полосе 7 ГГц и 1.5 в полосе 5 ГГц.

В Заключении приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, и сделаны обобщающие выводы.

1. ПРИБОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ТИПАМИ 3С: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

1.1 Вводные сведения

Как уже отмечалось во Введении, развитие СВЧ-электроники идет по пути освоения коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, позволяя повысить технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры для многочисленных приложений. Отчасти это связано и с вытеснением ЭВП СВЧ ТТП в низкочастотных диапазонах. В ряде стран ведутся разработки твердотельных усилителей миллиметрового диапазона. Однако превосходство электровакуумных приборов над твердотельными в миллиметровом диапазоне особенно выражено в достижении максимальной мощности, стойкости к радиации и высоким температурам, широкополосности и устойчивости к перегрузкам по входу. Поэтому за последние 10-15 лет большие усилия были затрачены на разработку усилителей и источников миллиметровых колебаний резонансного типа и технологии их изготовления [10-31].

Несмотря на длительный срок исследований, посвященных разработке мощных электровакуумных усилителей миллиметрового диапазона, проблемы, связанные с тепловым режимом и высокими электродинамическими параметрами замедляющих систем, прецизионной технологией изготовления миниатюрных узлов прибора, все еще находятся в процессе решения [32-34]. Для этого разрабатываются высокоточные алгоритмы программы И расчета, предназначенные для выполнения на высокопроизводительных вычислительных системах [10-16, 35-38], а также конструкции, реализуемые с помощью новейших обработки технологий B области материалов [32, 39]. Например, В коротковолновой части миллиметрового диапазона значительные мощности (от киловатт до мегаватт в непрерывном режиме) были получены в гироклистронах и

гиротронах [40]. Однако, данный класс приборов требует значительных магнитных полей, криогенных магнитных систем, что приводит к увеличению массогабаритных параметров.

Относительно миниатюрные и при этом достаточно мощные источники миллиметрового излучения могут быть разработаны на основе ЛБВ и клистронов. Такие разработки активно ведутся в настоящее время многими компаниями в различных странах [7, 41-52].

Интерес к исследованиям ЛБВ продиктован прежде всего тем, что широкая полоса усиливаемых частот обеспечивает высокую помехоустойчивость и затрудняет обнаружение и подавление ВЧ сигнала по сравнению с узкополосными усилителями. К настоящему времени выпускаемые промышленностью ЛБВ можно разделить на несколько классов по типу используемой ЗС: спиральные ЛБВ, ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (ЦСР), с ЗС типа «петляющий волновод», с встречно-штыревой ЗС, с ЗС типа «скрещенная лестница» и с планарной ЗС типа «меандр» [53].

1.2 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона со спиральной ЗС

Спиральные ЛБВ способны обеспечить большую широкополосность по сравнению с периодическими структурами других типов. Данный класс ЛБВ исследуется и разрабатывается в *Q*-диапазоне (37.5÷42.5 ГГц) для современных нисходящих линий спутниковой связи с целью увеличения скорости и объема передачи данных.

Лидирующую позицию по выпуску отечественных спиральных ЛБВ для систем спутниковой связи традиционно занимает АО «НПП «Алмаз», г. Саратов. К настоящему времени предприятием разработаны серийные усилители *Ка*диапазона с выходной мощность до 100 Вт и КПД 65% в рабочей полосе частот 0.5 ГГц [54]. В США фирма L3 Technologies в 2017 г. завершила разработку спиральной ЛБВ (рис. 1.1а) с выходной импульсной мощностью 550 Вт в полосе рабочих частот 32÷36 ГГц с коэффициентом заполнения импульсов 30% [55].



Рисунок 1.1 Фотография ЛБВ (а) и ее характеристики (б) из работы [55]

На рис. 1.16 приведены зависимости выходной мощности (при входной мощности 14.4 дБ·мВт) и коэффициент усиления в рабочей полосе частот. Общий КПД ЛБВ превышал 55%, а коэффициент усиления составлял более 40 дБ.

Во Франции фирма Thales разработала серию бортовых спутниковых спиральных ЛБВ с выходной мощностью 40, 80 и 100 Вт [56, 57]. На рис.1.2а представлена ЛБВ с выходной мощностью 40 Вт в полосе рабочих частот 37.5÷40.5 ГГц и КПД 50% при анодном напряжении 8.5 кВ [56]. Измеренные частотные зависимости выходной мощности (при различных входных) представлены на рис. 1.26.



Рисунок 1.2 Внешний вид ЛБВ (а) и АЧХ выходной мощности (б) из работы [56]

В Пекинском НИИ электровакуумных приборов (BVERI) разработали CBЧмодуль (рис. 1.3а) с выходной непрерывной мощностью 100 Вт, усилением 50 дБ и КПД 35% в рабочей полосе мм-диапазона частот (рис. 1.3б) [58]. Главным элементом модуля является спиральная ЛБВ с анодным напряжением 8.3 кВ [59].



Рисунок 1.3 Конструкция СВЧ-модуля (а) из работы [58] и его измеренные характеристики (б) из работы [59]

В США фирма Teraphysics на протяжении нескольких лет разрабатывает спиральную ЛБВ для построения систем связи 5G [60]. В том числе, для этого была разработана специальная технология изготовления миниатюрных спиральных 3C с алмазными опорами [61].

Однако **большим недостатком спиральных ламп**, прогрессирующим с повышением частоты, является ограничение теплоотвода от спирали. Поэтому спиральные 3С имеют существенные ограничения по уровню выходной мощности при продвижении в высокочастотный диапазон [62].

1.3 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона с ЗС типа «петляющий волновод»

Классическая ЗС типа «петляющий волновод» обладает широкополосностью, высокой технологичностью, термомеханической устойчивостью внутренних элементов за счет цельнометаллической конструкции.

Основным недостатком данной системы является относительно малое сопротивление связи, что снижает эффективность взаимодействия. В последнее время, следует отметить большой интерес разработчиков ЛБВ к различным модификациям ЗС типа «петляющий волновод» [63-75], благодаря ее технологичности.

В АО «НПП «Салют» в г. Нижний Новгород разработана двухсекционная ЛБВ с оптимизированной ЗС типа «петляющий волновод» (рис. 1.4а). В [69] представлены основные результаты разработки прибора.



Рисунок 1.4 Опытный образец ЛБВ (а), эскиз модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» (б) и ее ЭДХ (в, г) из работы [69]: 1 – с регулярным сечением петляющего волновода, 2 – модифицированный петляющий волновод

В модифицированной конструкции использовалось переменное поперечное сечение петляющего волновода (рис. 1.46). Данное решение способствовало

увеличению сопротивления связи на (+1)-й пространственной гармонике (рис. 1.4г). Замедление в модифицированной ЗС составило 4.792 (рис. 1.4в), что соответствовало ускоряющему напряжению 8.5 кВ.

В Научно-исследовательской лаборатории ВМС США (NRL) разработана ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод» (рис. 1.5а) с выходной мощностью 200 Вт, усилением 29 дБ в полосе рабочих частот 87÷100 ГГц (*W*-диапазон) [71, 72].



Рисунок 1.5 Фрагмент одной из двух симметричных деталей ЗС типа «петляющий волновод» (а) из работы [71] и S-параметры волноведущей системы (б) из работы

[72]: сплошная линия – эксперимент, пунктирная линия – расчет

Детали ЗС и ввод/вывод СВЧ-энергии были изготовлены из одной заготовки на станке с нано-ЧПУ, что позволило уменьшить отражения за счет отсутствия технологических стыков и омические потери за счет малых шероховатостей (рис. 1.56).

Также в NRL рассмотрели возможность создания многолучевой (4 луча) ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод» (рис. 1.6а) [73, 74]. Величина анодного напряжения в ЛБВ составляла 6.2 кВ, а выходная мощность – 300 Вт в *Ка*-диапазоне частот.

Диаграмма Бриллюэна ЗС типа «петляющий волновод» с 4-я пролетными каналами и распределение ЭМП в рабочем зазоре для рабочей моды и ближайшей к ней представлена на рисунке 1.66.



Рисунок 1.6 Фотография многолучевой 3С (а) из работы [74] и ее диаграмма Бриллюэна (б) из работы [73]

В Научно-техническом университете по электронной технике Китая, г. Ченгду специалисты представили лабораторный образец ЛБВ *W*-диапазона с 3С типа «петляющий волновод» с гребенкой (рис. 1.7а, б) [75]. Прямоугольные выступы в виде гребней выполняли роль втулки, увеличивая сопротивление связи в области взаимодействия. ЭДХ системы в полосе 4 ГГц представлены на рис. 1.7в, г.

Выходная мощность ЛБВ в непрерывном режиме составила 25 Вт, а





Рисунок 1.7 Фотография половинки ЗС типа «петляющий волновод» с гребенкой (а) и эскиз ЗС (б) из работы [75]; дисперсионные характеристики относительно фазовой скорости (в) и сопротивление связи (г), рассчитанные для ЗС типа «петляющий волновод» с гребенкой (1) и без нее (2) из работы [75]



Рисунок 1.8 АЧХ выходной мощности (а) и коэффициента усиления (б) лабораторного образца ЛБВ из работы [75]

Страны Евросоюза с 2015 г. реализуют проект TWEETHER¹ [76], в рамках которого для связи между базовыми станциями 5G будут использоваться ЛБВусилители с 3C типа «петляющий волновод» 92÷95 ГГц (разработчик — фирма Thales Electron Devices). Проект выполняется консорциумом из 9 исследовательских и производственных организаций из Великобритании, Франции, Германии и Испании и финансируется из средств программы Horizon– 2020 [9].

1.4 Основные результаты исследований ЛБВ мм-диапазона с ЗС типа ЦСР

Классическая ЗС типа ЦСР получила широкое распространение в сантиметровом диапазоне. При переходе в миллиметровый диапазон уменьшаются диаметр пролетного канала ЗС и ток ЭП, что приводит к значительному увеличению ускоряющего напряжения. Кроме того, усложняются технологии изготовления и традиционной сборки элементов ЗС. По этой причине ЛБВ с ЗС типа ЦСР разрабатываются в *Ка*-диапазоне, а в *W*-диапазоне получили малое распространение [7].

Основные параметры пакетированных импульсных ЛБВ в диапазоне частот 33.25÷34.75 ГГц российской компании ООО «ЭлТек-96» показаны в таблице 1.1:

Таблица 1	.1 I	Іараметры	пакетированны	их с МПФС и	импульсных	ЛБВ из	работы !	[7]
,		1 1	1		2		1 1	

Наименование параметра,	Тип ЛБВ, значение параметра					
единица измерения	УВИ-157	УВИ-159	УВИ-161	Карта-03		
Выходная импульсная	30 - 40	60 - 70	1.0 - 1.5	0.2 - 0.3		
мощность, кВт	5.0 110	0.0 7.0	1.0 1.0	0.2		

¹ Полное название проекта: "Traveling wave tube for W-band wireless networks with high data rate distribution, spectrum and energy efficiency".

Выходная средняя мощность, Вт	300 - 400	400 - 450	150 - 200	50 - 75
Коэффициент усиления в режиме насыщения, дБ	47 – 49	48 - 50	46 – 48	30 - 32
Напряжение замедляющей системы, кВ	27	30.5	18.5	12.5

1.5 Выводы

Приведен краткий обзор современного (за последние 5 лет) состояния исследований и разработок ЛБВ мм-диапазона длин волн и проанализированы тенденции их развития. Показано, что разработка мощных, эффективных, широкополосных усилителей мм- и субмиллиметрового диапазонов длин волн решает проблему недостаточного освоения указанных диапазонов при применении в гражданской и военной областях. Следует отметить, что гражданские применения требуют использования именно низковольтных приборов из-за повышенных требований к безопасности, а для бортовых систем летательных аппаратов существуют ограничения по напряжению питания при полетах в высоких слоях атмосферы.

Кроме того, в более низкочастотных диапазонах происходит вытеснение ЭВП ТТП, а в миллиметровом диапазоне вакуумные приборы успешно выигрывают конкуренцию.

Задачи, связанные с повышением эффективности взаимодействия электронного потока с ЭМП в разрабатываемых ЛБВ и обеспечением требуемого теплового режима в последние несколько лет ставят перед собой ведущие научные и производственные коллективы в России, США, Южной Корее, Китае, Индии и др.

Таким образом, подтверждается актуальность выбранной темы диссертационной работы. Из результатов анализа данных, приведённых в

27

разделе, следует, что для получения больших мощностей при относительно низких (до 20 кВ) ускоряющих напряжениях в высокочастотном диапазоне длин волн необходимо разрабатывать новые конструкции ЗС, обладающие высокими электродинамическими характеристиками, большей механической и теплорассеивающей способностью, а главное высокой технологичностью. Решению данной проблемы посвящены диссертационные исследования в работе.

2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭДХ ЗС

В настоящем разделе представлены результаты разработки программного модуля и математического моделирования методом конечных элементов электродинамических характеристик различных конструкций ЗС: дисперсионной характеристики и сопротивления связи в требуемых полосах пропускания.

2.1 Определение пространственных гармоник ЗС и их ДХ

Известно, что согласно теореме Флоке [77] в периодической структуре с периодом *D* электрическое поле с гармонической временной зависимостью можно представить в виде [78]:

$$\boldsymbol{E}(x, y, z, t) = \boldsymbol{E}_0(x, y, z) e^{j(\omega t - \beta z)}, \qquad (1)$$

где функция $E_0(x, y, z)$ –периодическая с периодом *D*:

$$E_0(x, y, z + D) = E_0(x, y, z)$$
(2)

Периодическую функцию $E_0(x, y, z)$ можно разложить в ряд Фурье

$$E_0(x, y, z) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} e_n(x, y) e^{-j\frac{2\pi n}{D}z},$$
(3)

где $e_n(x,y) = \frac{1}{D} \int_{z_0}^{z_0+D} E_0(x,y,z) e^{j\frac{2\pi n}{D}z} dz$ – амплитуда *n*-й пространственной гармоники, зависящая от поперечных координат.

Таким образом, полное поле может быть представлено в виде суммы пространственных гармоник

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z},t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_n(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}) e^{-j\beta_n \boldsymbol{z}} e^{j\omega t} , \qquad (4)$$

где $\beta_n = \beta + \frac{2\pi n}{D} = \frac{\varphi + 2\pi n}{D} = \frac{\varphi_n}{D} = \frac{2\pi}{\Lambda_n}$ — фазовая постоянная (волновое число) гармоники с индексом $n, \beta = \varphi/D$ — фазовая постоянная гармоники с индексом $n = 0, \varphi$ — набег фазы этой гармоники на периоде 3C D; $\varphi_n = \beta_n D$ — набег фазы n-й пространственной гармоники на период 3C D; Λ_n — длина волны n-й пространственной гармоники в 3C. Каждой пространственной гармонике в ЗС соответствует своя фазовая скорость:

$$v_n = \frac{\omega}{\beta_n} \tag{5}$$

и одинаковая для всех гармоник групповая скорость:

$$\upsilon_{\Gamma} = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{d\omega}{d\beta_n} \tag{6}$$

При работе ЛБВ вдали от края полосы прозрачности взаимодействие электронного потока осуществляется с полем одной из пространственных гармоник 3С, скорость которой близка к скорости электронного потока. Эта гармоника называется рабочей. Для расчета выходных параметров ЛБВ необходимо знать электродинамические характеристики 3С: дисперсионную характеристику и величину сопротивления связи рабочей гармоники.

В отечественной литературе дисперсионная характеристика описывается в виде зависимости замедления *n_n* от длины волны в свободном пространстве:

$$n_n = \frac{c}{v_n} = \frac{\beta_n}{k} = \frac{\varphi_n \lambda}{2\pi D} = \frac{\lambda}{\Lambda_n}, \qquad (7)$$

где $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная волны в свободном пространстве на частоте ω ; λ – длина волны в свободном пространстве на частоте ω ; c – скорость света в свободном пространстве. В зарубежной литературе дисперсия обычно описывается зависимостью $\omega(\varphi_n)$.

Следовательно, зная зависимость фазового угла от длины волны, можно легко построить дисперсионную кривую для любой пространственной гармоники.

2.1.1 Определение сопротивления связи ЗС

Сопротивление связи является мерой эффективности взаимодействия высокочастотного поля с электронным потоком.

Для *n*-й пространственной гармоники можно определить сопротивление связи согласно Пирсу [78], как:

$$R_{n \, \rm CB} = \frac{|e_{nz}|^2}{2\beta_n{}^2 P},\tag{8}$$

где $e_{nz}(x, y)$ – амплитуда продольной составляющей электрического поля *n*-й пространственной гармоники, взаимодействующей с электронным потоком; $P = \iint_{S} \vec{S}_{z} dx dy$ – поток мощности, переносимый через любое полное поперечное сечение 3C S; $\vec{S}_{z} = \frac{1}{2} \vec{E}_{\tau}(x, y) \vec{H}_{\tau}^{*}(x, y)$ – проекция вектора Умова-Пойтинга на ось «z»; \vec{E}_{τ} и \vec{H}_{τ} – поперечные составляющие электрического и магнитного полей.

Следует отметить, что в разработанной методике поток мощности вычисляется с высокой точностью благодаря непосредственному интегрированию вектора Умова-Пойтинга в поперечном сечении ЗС в отличие от известных методик, где он находится через групповую скорость, определяемую приближенным численным дифференцированием дисперсионной кривой.

2.2 Численное моделирование дисперсионной характеристики и величины сопротивления связи в 3С

Расчет взаимодействия электронного потока с полем 3С (в том числе и нерегулярных) предполагает знание дисперсионной характеристики и сопротивления связи рабочих пространственных гармоник регулярных участков [79].

Ранее при расчетах и измерениях ДХ и сопротивления связи рассматривался закороченный отрезок ЗС из нескольких периодов. Строго говоря этот метод справедлив, если «закоротки» расположены в плоскостях симметрии ЗС. Если такие плоскости отсутствуют, метод приводит к систематической погрешности.

Геометрия и электрические характеристики регулярных ЗС независимо от конструкции определяются геометрией их периода, что позволяет моделировать только один период структуры, решая задачу на собственные значения при периодических граничных условиях.

Поскольку в полосе пропускания 3С фазовый сдвиг замедленной волны на ячейку находится в пределах $0 \le \varphi_m \le \pi$, то по формуле (7) можно вычислить дисперсионную характеристику 3С на каждом типе волны и построить

соответствующие фазовые сдвиги φ_m для точек N+1 (с учетом границ) для каждой исследуемой ее полосы пропускания, где

$$\varphi_m = 0, \frac{\pi}{N}, \frac{2\pi}{N}, \dots, \frac{m\pi}{N}, \dots, \frac{(N-1)\pi}{N}, \pi$$
(9)

Распределение электрического E(x, y, z) и магнитного H(x, y, z) полей на резонансных частотах f_m одного периода ЗС при заданных углах фазового сдвига φ_m в полосе пропускания рассчитываются с помощью метода конечных элементов [80]. Зная распределение ЭМП на одном периоде ЗС, можно рассчитать вектор Умова-Пойтинга \vec{S}_z на этих частотах, а также по продольной составляющей электрического поля E(x, y, z) определить амплитуду *n*-й пространственной гармоники $e_{nz}(x, y)$. Используя формулу (8) можно рассчитать $R_{n cB}$ *n*-й пространственной гармоники на резонансных частотах f_m одного периода ЗС различного типа, в том числе не имеющих зеркальных плоскостей симметрии.

Описанный выше алгоритм вычисления дисперсионной характеристики и величины сопротивления связи был реализован в программном модуле по расчету электродинамических характеристик ЗС. Блок-схема модуля представлена на рис. 2.1. Начало построения MM одного периода 3С в программе моделирования высокочастотных электромагнитных полей

Задание начальных и граничных условий внутренней краевой задач

Получение распределения электрического E(x, y, z) и магнитного H(x, y, z)полей на резонансных частотах f_m одного периода ЗС при заданных углах фазового слвига

$$\varphi_m = 0, \frac{\pi}{N}, \frac{2\pi}{N}, \dots, \frac{m\pi}{N}, \dots, \frac{(N-1)\pi}{N}, \pi$$

с помощью численного метода конечных элементов

НАЧАЛО ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГРАММНЫМ МОДУЛЕМ



Рисунок 2.1 Блок-схема модуля вычисления ЭДХ ЗС

2.2.1 Моделирование ЭДХ ЗС типа ЦСР и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными

Одной ИЗ важных характеристик математической модели является погрешность получаемых с ee помощью результатов. Эта погрешность складывается из составляющих, вносимых на каждом этапе численного решения. Для оценки погрешности вычисления ЭДХ ЗС предлагаемым программным модулем была выбрана ЗС типа цепочки связанных резонаторов (ЦСР), для которой экспериментально [81] определены дисперсионная характеристика и величина сопротивления связи в резонаторной и ближайшей к ней щелевой полосах пропускания ЗС ЦСР. На рисунке 2.2 представлены продольный и поперечный разрезы периодов исследуемых ЗС на ЦСР. В таблице 2.2.1 приведены физические размеры тестовых 3C с разным функциональным назначением.



Рисунок 2.2 Продольный и поперечный разрезы ЗС типа ЦСР с повернутым на 180° «фасолевидными» щелями связи с симметричным расположением трубок

дрейфа (а) и с асимметричным расположением трубок дрейфа (б)

Следует отметить, что ЗС с асимметричным расположением трубок дрейфа (втулок) не имеет плоскостей симметрии, вследствие чего традиционный метод измерения ДХ дает заметную погрешность.

№	L, мм	t, мм	2r5, мм	r4, мм	r3, мм	а (гр)	2r2, мм	2r1, мм	d, мм
1	15	4.3	50.5	23.5	13.6	105	13.6	9	5.2
2	15	3.3	46.6	21.2	11.8	74	12.5	8.3	5.2
3	15	3.3	46.6	21.2	11.8	126	11.7	7.4	4.7

Таблица 2.1 Размеры тестовых ЗС типа ЦСР

Для численного анализа были построены математические модели периода 3С типа ЦСР, соответствующие таблице 2.2.1. Для этого использовалась программа моделирования высокочастотных ЭМП CST Microwave Studio [11], в которой, в частности, реализован метод конечных элементов (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 Расчётная модель одного периода ЗС типа ЦСР с симметричным расположением трубок дрейфа (а) и с асимметричным расположением трубок дрейфа (б) в программе CST Microwave Studio

ЭДХ рассматриваемых Определение 3C осуществлялось на этапе постпроцессорной обработки результатов расчета резонансных частот И соответствующих распределений полей одного периода ЗС, полученных в программе CST Microwave Studio. На рис. 2.4 - 2.9 представлены зависимости дисперсионной характеристики и величины сопротивления связи от частоты в исследуемых ЗС при заданных углах фазового сдвига. В таблицах 2.2.2 и 2.2.3 приведены экспериментальные и расчетные результаты тестовых ЗС типа ЦСР с симметричным и асимметричным расположением трубок дрейфа, а также отклонения ДХ и величины сопротивления связи от экспериментальных

результатов в рассматриваемом классе ЗС. Экспериментальные результаты получены резонансным методом [82], погрешность определения дисперсионных характеристик не превышала 0.02%, сопротивления связи – 10% [81].



Рисунок 2.4 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №1 с симметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]


Рисунок 2.5 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №2 с симметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]



Рисунок 2.6 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №3 с симметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]



Рисунок 2.7 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №1 с асимметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]



Рисунок 2.8 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №1 с асимметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]



Рисунок 2.9 Дисперсионная характеристика (а) и величина сопротивления связи (б) для (-1)-й пространственной (рабочей) гармоники тестовой 3С типа ЦСР №3 с асимметричным расположением трубок дрейфа: — расчет, • эксперимент [81]

Полученные результаты качественно и количественно соответствовали экспериментальными: при выбранном сдвиге фазы на период (при *N*=6) совпадали собственные частоты в резонаторной и ближайшей к ней щелевой полосах ЗС ЦСР, расположение и топология дисперсионных кривых на рисунках.

Таблица 2.2 Сравнение экспериментальных [81] и расчетных результатов ЭДХ ЗС с симметричным расположением трубок дрейфа, определение погрешности вычисления ЭДХ

Макет №1							
φ_m ,	$f_{ m эксп},$	$f_{\rm pacy},$	$\frac{f_{\text{pacy}}-f_{\text{эксп}}}{f},$	$R_{n { m cb} { m эксп}}$,	$R_{n { m cb} { m pacy}}$,	$\frac{R_{n \operatorname{cb} pacy} - R_{n \operatorname{cb} \operatorname{skcn}}}{P},$	
рад	ГГц	ГГц	Јэксп %	Ом	Ом	м _{п св эксп} %	
$5\pi/6$	2.7987	2.8005	0.061	31.14	34.21	9.86	
$4\pi/6$	2.9505	2.9521	0.054	-	11.65	-	
$3\pi/6$	3.1790	3.1799	0.028	4.89	4.92	0.6	
$2\pi/6$	3.4536	3.4544	0.023	-	3.55	-	
$1\pi/6$	3.7251	3.7252	0.003	-	3.11	-	
Макет	<i>№2</i>						
$5\pi/6$	3.4940	3.4954	0.040	76.2	83.31	9.34	
$4\pi/6$	3.5945	3.5957	0.033	-	29.35	-	
$3\pi/6$	3.7428	3.7439	0.029	14.1	15.37	9	
$2\pi/6$	3.9080	3.9085	0.013	-	10.56	-	
$1\pi/6$	4.0460	4.0462	0.005	-	11.01	-	
Макет №3							
$5\pi/6$	2.6435	2.6454	0.072	36.29	37.02	2.01	
$4\pi/6$	2.8400	2.8412	0.042	-	13.57	-	
$3\pi/6$	3.1308	3.1313	0.016	5.35	5.41	1.12	
$2\pi/6$	3.4735	3.4739	0.012	-	4.88	-	
$1\pi/6$	3.8090	3.8091	0.003	-	4.60	-	

Таблица 2.3 Сравнение экспериментальных [81] и расчетных результатов ЭДХ ЗС с асимметричным расположением трубок дрейфа, определение погрешности вычисления ЭДХ

Макет №1							
φ_m ,	$f_{\mathfrak{s}\mathfrak{K}\mathfrak{C}\Pi},$	$f_{\rm pac4},$	$\frac{f_{\text{pacy}}-f_{\text{эксп}}}{c}$	$R_{n { m cb} { m эксп}}$,	$R_{n \mathrm{cb} \mathrm{pacy}}$,	$\frac{R_{n \text{св расч}} - R_{n \text{св эксп}}}{R},$	
рад	ГГц	ГГц	<i>Ј</i> эксп 0/	Ом	Ом	<i>К_{п св экс}</i> п	
			%0			<i></i> %0	
$5\pi/6$	2.7049	2.7074	0.297	32.07	34.05	2.95	
$4\pi/6$	2.8512	2.8507	0.439	-	11.58	-	
$3\pi/6$	3.0705	3.0662	0.309	5.09	5.24	6.17	
$2\pi/6$	3.3307	3.3204	0.140	-	3.67	-	
$1\pi/6$	3.5753	3.5596	0.018	-	3.54	-	
Макет	№2		L				
$5\pi/6$	3.3030	3.3018	0.036	82.70	83.59	1.08	
$4\pi/6$	3.3973	3.3913	0.177	-	28.54	-	
$3\pi/6$	3.5320	3.5219	0.286	15.52	15.47	0.32	
$2\pi/6$	3.6780	3.6641	0.377	-	10.37	-	
$1\pi/6$	3.7987	3.7802	0.487	-	13.58	-	
Макет №3							
$5\pi/6$	2.5135	2.5145	0.040	33.66	36.49	8.42	
$4\pi/6$	2.6965	2.6970	0.019	-	13.52	-	
$3\pi/6$	2.9615	2.9643	0.095	6.98	7.51	7.59	
$2\pi/6$	3.2645	3.2703	0.178	-	5.25	-	
$1\pi/6$	3.5420	3.5508	0.248	-	5.28	-	

Анализ результатов, рассчитанных методом конечных элементов, резонансных частот периода ЗС типа ЦСР с симметричным расположением трубок дрейфа в программе CST Microwave Studio, приведенных в табл.2.2.2 и дальнейшая постобработка программным модулем показал, что разработанная методика позволяет математически моделировать электродинамические характеристики 3С с погрешностью по дисперсионной характеристике не более 0.07% и по сопротивлению связи не более 10% от экспериментальных результатов.

Применение предложенного алгоритма вычисления ЭДХ ЗС позволило снять ограничение на наличие зеркальных плоскостей симметрии в 3С, присущие методу. При одностороннем расположении трубок дрейфа резонансному относительно диафрагмы поперечные плоскости зеркальной симметрии отсутствуют, и эквивалентность измерительных макетов бесконечной ЗС нарушается [81]. Для уменьшения отклонения измеренных частот резонансных видов макета от дисперсионной характеристики ЗС, необходимо увеличивать число периодов в резонаторе, что может приводить к значительному повышению стоимости экспериментальных исследований и большим затратам вычислительных ресурсов при математическом моделировании ЭДХ резонансным методом. Анализ результатов, приведенных в таблице 2.2.3, показывает, что отсутствие зеркальных плоскостей симметрии при 6 ячейках в резонансном макете приводит к различиям ~ 0.5% при экспериментальном определении дисперсионной характеристики и ~ 10% в определении сопротивления связи, причем эти различия, по-видимому, обусловлены систематической погрешностью эксперимента.

2.3 Выводы

Разработана методика численного расчета электродинамических характеристик ЗС различного типа, в том числе не имеющих зеркальных плоскостей симметрии, основанная на анализе модели одного периода ЗС. Предложенный метод позволил с высокой точностью определять не только дисперсионную характеристику, но и величину сопротивления связи. Методика является универсальной и, благодаря моделированию только одного периода ЗС, не требует больших вычислительных ресурсов и времени. На основе разработанной методики создан программный модуль для CST Microwave Studio, который позволил рассчитывать ЭДХ в полосе пропускания 3С на произвольно заданных углах фазового сдвига для пространственных гармоник поля одного периода 3С, оперативно выбирать необходимую рабочую гармонику по требуемым ЭДХ и ускоряющему напряжению [83].

Проведенное тестирование программного модуля показало хорошее соответствие между рассчитанными ЭДХ тестовых 3С и экспериментальными результатами.

Использование программного модуля совместно с CST Microwave Studio позволило полностью автоматизировать процесс анализа ЭДХ ЗС и синтезировать ЗС с требуемыми ЭДХ.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТИПА «СДВОЕННАЯ ЛЕСТНИЦА»

3.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи

В данном разделе представлены результаты численного моделирования ЭДХ многолучевой замедляющей системы типа «сдвоенная лестница» для широкополосной низковольтной ЛБВ *Ка*-диапазона длин волн (рис. 3.1) [84].



Рисунок 3.1 Конструкция многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница»

Предложенная многолучевая ЗС выполнена в виде продольного ряда плоских диафрагм (1) с симметричными щелями связи (2) в виде сегмента и дополнительных диафрагм (3) с проточкой шириной *t* для компрессии электромагнитного поля в области рабочего зазора.

Для получения требуемого уровня выходной мощности в ЛБВ при более 6 кВ необходимо ускоряющем напряжении не использовать высопервеансный ЭП, транспортировка которого в мм-диапазоне затруднена из-за небольшого диаметра пролетного канала ЗС. Для уменьшения микропервеанса количество пролетных каналов N было выбрано равным 6-ти. Центры каналов расположены на одинаковом радиусе 625 мкм от оси ЗС. Для обеспечения эффективного электронно-волнового взаимодействия многолучевого ЭП и требуемой теплорассеивающей способности ЗС диаметр пролетных каналов был выбран *2а* = 0.5 мм.

3.1.1 Влияние формы щели связи на ЭДХ многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница»

В многолучевых 3С требуется иметь равномерное распределение электрического поля по сечению рабочего зазора, чтобы каждый парциальный ЭП одинаково эффективно взаимодействовал с полем 3С. Разработанная конструкция 3С с использованием двух симметрично расположенных щелей связи позволила увеличить однородность электрического поля в области взаимодействия (рис. 3.2).

Были рассмотрены щели связи в виде сектора кольца (рис. 3.2а) и в виде сегмента (рис. 3.2б), реализованные путем уменьшения ширины диафрагмы *L* с 2.4 до 1 мм.



Рисунок 3.2 Поперечный разрез 3С типа «сдвоенная лестница» с щелью связи виде сектора кольца (а) (L=1 мм) и в виде сегмента (б) (L=2.4 мм)

На рис. 3.3 приведены результаты расчета АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи рабочей пространственной гармоники ЗС типа «сдвоенная лестница» с щелями связи, изображенными на рис.3.2.



Рисунок 3.3 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи 3С (в) с формой щели связи в виде сегмента (красная кривая) и сектора кольца (черная кривая)

Анализ результатов, представленных на рис.3.3а, показал, что ширина полосы прозрачности ЗС сильно изменялась от формы щели связи. При секторной щели связи полоса расширялась как за счет низкочастотной, так и высокочастотной отсечки и составляла 18.9%. Полоса прозрачности в ЗС с сегментной щелью связи уменьшалась в основном за счет высокочастотной отсечки и составляла 10.1%. На основе анализа дисперсионной характеристики, представленной на рис.3.3б видно, что крутизна кривой замедления для системы с секторной щелью связи меньше на 0.207, чем с сегментной щелью связи. Однако сопротивление связи в системе с сегментной щелью связи в 2 раза больше (таблица 3.1.1).

Таблица 3.1 Основные параметры замедляющей системы с различной формой щелей связи, соответствующие фазовому сдвигу ϕ_m в полосе прозрачности

Форма щели	Ширина полосы прозрачности, %		Иа, кВ		<i>Rсв, Ом</i>		
		$arphi_m,$ рад		$arphi_m,$ рад			
		$3\pi/6$	$4\pi/6$	$5\pi/6$	$3\pi/6$	$4\pi/6$	$5\pi/6$
Секторная	18.9	6.4	6.1	5.9	5.289	3.514	2.574
Сегментная	10.1	6.3	5.7	5.3	10.466	6.356	4.180

Анализ результатов, представленных в таблице 3.1.1, показал, что в ЗС с щелями связи в виде сектора кольца обеспечивалась широкополосная система, у которой длина лампы увеличивалась на 19.5% из-за небольшой величины усиления Пирса. В многолучевых системах параметра транспортировка парциальных электронных пучков усложняется за счет влияния радиальной составляющей магнитного поля на траектории движения электронов в пучке. Увеличение длины пространства взаимодействия может привести к токооседанию ЭП в некоторых парциальных каналах и существенно увеличить тепловую нагрузку на ЗС. Следует заметить, что при такой форме щелей связи ширина диафрагмы *L* не превышала 1 мм, что также затрудняло отвод тепла.

Таким образом, при использовании в 3С щелей связи в виде сегмента обеспечивалось высокое токопрохождение во всех парциальных каналах системы на относительно небольшой длине 3С. Для изготовления сегментной щели диафрагма выполнялась в виде пластины шириной L = 2.4 мм. Это позволило существенно улучшить теплорассеивающую способность 3С по сравнению с диафрагмами с щелью связи в виде сектора кольца.

3.1.2 Влияние внутреннего диаметра отверстия дополнительной диафрагмы и ширины ее проточки на ЭДХ многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница»

В исследуемой конструкции 3С между плоскими диафрагмами, не имеющими втулок, была расположена дополнительная диафрагма (3) (рис. 3.1), ширина которой, соответствовала высоте рабочего ВЧ-зазора h. Для увеличения концентрации электрического поля в области рабочего зазора дополнительная диафрагма имела внутренний диаметр отверстия Dk и симметричную проточку шириной t (рис. 3.1). Внутреннее отверстие с диаметром Dk дополнительной диафрагмы частично перекрывало сегментную щель связи.

На рис. 3.4 приведены рассчитанные АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС при *Dk* в диапазоне 2.5 ÷ 3.5 мм.





Рисунок 3.4 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи 3С (в) при: *Dk*= 2.5 мм (черная кривая), *Dk*= 3 мм (красная кривая), *Dk*= 3.5 мм (синяя кривая)

Анализ результатов, приведенных на рис. 3.4а, показал, что при увеличении внутреннего диаметра отверстия *Dk* дополнительных диафрагм электромагнитная связь между соседними резонаторами увеличивалась, поэтому полоса прозрачности расширялась. Расширение полосы происходило в основном за счет низкочастотной отсечки. Крутизна замедления и сопротивление связи (рис. 3.4б, в) увеличивались при уменьшении *Dk*.

На рис. 3.5 приведены рассчитанные АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС при изменении ширины проточки *t* в диапазоне от 80 до 120 мкм.



Рисунок 3.5 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в) при *t*= 80 мкм (синяя кривая), *t*= 100 мкм (красная кривая), *t*= 120 мкм (зеленая кривая)

На основе анализа результатов, представленных на рис. 3.5а, показано, что ширина полосы прозрачности не изменялась при различных значениях t, но происходило смещение полосы в низкочастотный диапазон при увеличении толщины проточки дополнительных диафрагм t. С увеличением t коэффициент замедления увеличивался (рис.3.5б), соответственно ускоряющее напряжение уменьшалось. Сопротивление связи уменьшалось (рис.3.5в) при увеличении t на 9.5%.

В таблице 3.1.2 приведены результаты расчета чувствительности контролируемых электродинамических параметров 3C – коэффициента замедления n, сопротивления связи $R_{c_{\theta}}$ рабочей гармоники, полосы прозрачности Δf в зависимости от ширины проточки t дополнительных диафрагм и их внутреннего диаметра отверстия Dk.

	Коэффициент	замедления п	Сопротивление связи <i>R</i> _{се}			
φ_m , рад	∂n	дn	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$		
	$\overline{\partial t}$	∂Dk	∂t	∂Dk		
	1/мм	1/мм	Ом/мм	Ом/мм		
$3\pi/6$	0.015	0.54	-0.016	-6.291		
$4\pi/6$	0.015	0.42	-0.011	-3.353		
$5\pi/6$	0.014	0.27	-0.014	-1.81		
	Полоса проз	врачности Δf				
	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$				
	∂t	∂Dk				
	%/мм	%/мм				
	0.043 9.7					

Таблица 3.2 Динамика изменения контролируемых электродинамических параметров 3С в зависимости от геометрии дополнительных диафрагм

Анализ результатов, представленных в таблице 3.1.2, показал, что наибольшее влияние на ЭДХ ЗС оказывала величина внутреннего диаметра отверстия дополнительной диафрагмы *Dk*.

В длинноволновой части мм-диапазона длин волн для увеличения сопротивления связи трубка дрейфа (втулка) может быть выполнена за счет уменьшения толщины диафрагмы. На рис. 3.6 представлены исследуемые конструкции ЗС типа «сдвоенная лестница» с трубкой дрейфа (втулкой) и без нее.



Рисунок 3.6 Продольный и поперечный разрезы 3С типа «сдвоенная лестница»
а) – без трубки дрейфа (толщина диафрагмы *ho*= 0.5 мм); б) – с симметричным расположением трубки дрейфа (толщина диафрагмы *ho*=0.3 мм);
в) – с асимметричным расположением трубки дрейфа (толщина диафрагмы *ho*=0.3 мм); г) – с сегментными щелями связи

На рисунке 3.7 представлены результаты расчета АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС для конструкций на рис. 3.6.



Рисунок 3.7 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи 3С (в): сплошная синяя линия – с асимметричным расположением трубки дрейфа и Do= 4.75 мм; пунктирная синяя линия – с асимметричным расположением трубки дрейфа и Do= 5.4 мм; сплошная зеленая линия - с симметричным расположением трубки дрейфа и Do= 4.65 мм; пунктирная зеленая линия - с красная линия – с симметричным расположением трубки дрейфа и Do= 5.4 мм; сплошная зеленая линия мактирия зеленая линия - с симметричным расположением трубки дрейфа и Do= 4.65 мм; пунктирная зеленая линия – с симметричным расположением трубки дрейфа и Do= 5.4 мм; сплошная красная линия – Do=5.4 мм и без трубки дрейфа

Анализ результатов, представленных на рис. 3.7а, показал, что при введении трубок дрейфа (втулок) полоса прозрачности смещалась в сторону низких частот. Потребовалось уменьшить диаметр *Do* 3C не менее чем на 14 % для получения требуемой полосы в нужном частотном диапазоне. В таблице 3.1.3 приведены основные параметры 3C, представленных на рис. 3.6.

Таблица 3.3 Основные параметры ЗС типа «сдвоенная лестница» с дополнительными диафрагмами при введении в их конструкцию трубок дрейфа и без них

Конструкция	Ширина	<i>Ua</i> , кВ		<i>Rсв</i> , Ом			
ЗС типа «сдвоенная	полосы	$\varphi_m,$ рад			$arphi_m,$ рад		
лестница»	прозрачности, %	3π/6	4π/6	5π/6	3π/6	4π/6	5π/6
Без трубок дрейфа	10.1	6.3	5.7	5.3	10.522	6.356	4.180
С симметричными трубками дрейфа	14.2	6.3	5.9	5.6	9.881	5.957	4.009
С асимметричными трубками дрейфа	12.8	6.3	5.8	5.5	10.881	6.639	4.555

Анализ результатов, приведённых в таблице 3.1.3, показал, что полоса прозрачности расширялась при введении симметричных трубок дрейфа (втулок) в конструкцию. Однако значение сопротивления связи становилось меньше, чем в конструкции без трубок дрейфа. При этом возрастала и тепловая нагрузка, так как толщина диафрагмы уменьшилась на 200 мкм. Наибольшее значение сопротивления связи наблюдалось в конструкции 3С с асимметричными трубками дрейфа на фазовых сдвигах от $3\pi/6$ до $5\pi/6$ (в рабочей полосе частот) по сравнению с другими конструкциями (R_{ce} на 3-8% больше). Это позволило увеличить коэффициент усиления в ЛБВ.

С учетом всех технологических ограничений и требований к теплорассеивающей способности многолучевой ЗС для разрабатываемой ЛБВ,

была выбрана конструкция ЗС без трубок дрейфа с толщиной диафрагмы *ho* = 500 мкм. Были подобраны оптимальные с точки зрения ЭДХ параметры данной многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» (Таблица 3.1.4), которые использовались при дальнейших расчетах.

Таблица 3.4 Размеры оптимизированной многолучевая ЗС типа «сдвоенная лестница» для ЛБВ *Ка*-диапазона длин волн

Период <i>Hs</i> , мм	1.76
Диаметр резонатора Do , мм	5.4
Диаметр пролетного канала 2 <i>а</i> , мкм	500
Количество электронных пучков N, шт.	6
Толщина диафрагмы <i>ho</i> , мкм	500
Ширина диафрагмы <i>L</i> , мм	2.4
Толщина дополнительных диафрагм h , мкм	180
Ширина проточки дополнительных диафрагм <i>t</i> , мкм	100
Внутренний диаметр дополнительных диафрагм Dk, мм	3
Форма щели связи	сегментная

На рис. 3.8 представлены: АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС с оптимальной геометрией.





Рисунок 3.8 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи (в) ЗС типа «сдвоенная лестница»

В диапазоне изменения фазового сдвига от $0 \le \phi \le \pi$ синхронизм обеспечивается между электронным пучком и (+1)-й прямой пространственной гармоникой 1-й моды, которая распространяется в направлении движения электронного пучка при ускоряющем напряжении 6 кВ и имеет более высокое сопротивление связи по сечению электронного пучка, чем для других пространственных гармоник (рис. 3.8 в).

58

3.2 Оценка параметров ЛБВ с многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» в режиме большого сигнала

Для многолучевой ЛБВ с 3С типа «сдвоенная лестница» выбрана фокусирующая магнитная система, обеспечивавшая однородное распределение продольной составляющей магнитного поля в рабочем зазоре. Для обеспечения высокой величины токопрохождения уровень продольной компоненты магнитного поля в парциальных пролетных каналах составлял величину 2.85 кГс. Рабочий зазор между полюсами магнитной фокусирующей системы ЛБВ составил 24.6 мм, что позволило достигнуть высокую однородность продольной компоненты и минимальные значения поперечной компоненты магнитного поля, приводящей к дополнительным пульсациям ЭП и искривлению его траекторий при движении к коллектору. Как показал 3D траекторный анализ, во всех каналах достигается 100% токопрохождение (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 Траектории парциальных ЭП в пролетных каналах

Поскольку распределение продольной составляющей магнитного поля на оси пролетных каналов слабо отличалось от поля на оси 3С, расчет режима большого сигнала проводился в однолучевом приближении с помощью программы TWT2D

[85]. Анализ результатов расчета показал, что для получения высокой величины токопрохождения в динамическом режиме требовалось обеспечить начальное заполнение канала пучком 0.35, а на выходе из пространства взаимодействия – 0.86 (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 Профиль распределения продольной составляющей магнитного поля на оси пролетного канала (а) и траектории электронов в динамическом режиме (б) (на нижней частоте рабочего *Ка*-диапазона)

Таким образом, за счет выбранных оптимальных условий формирования парциального электронного пучка в межполюсном зазоре протяженностью 24.6 мм ЭП имел 100% токопрохождение на коллектор.

На рисунке 3.11 представлены экспериментальная и расчетные зависимости АЧХ выходной мощности в импульсном режиме работы ЛБВ, усиления и КПД.



Рисунок 3.11 АЧХ выходной мощности и усиления ЛБВ

результатов, представленных рис. 3.11, Анализ на показывает, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными. Выходная мощность многолучевой миниатюрной широкополосной (3%) ЛБВ Ка-диапазона с разработанной многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» составила не менее 220 Вт, коэффициент усиления – 16 дБ при ускоряющем напряжении – 5.5 кВ. На основе предложенной многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» была разработана импульсная ЛБВ 8-мм диапазона длин волн, обеспечивающая выходную мощность более 200 Вт в полосе 1 ГГц при ускоряющем напряжении 5.5 кВ (рис. 3.12), что по совокупности параметров ЛБВ Ка-диапазона превышает достигнутый мировой уровень [74].

61



Рисунок 3.12 ЛБВ с многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница»

3.3 Выводы

На основе разработанной во 2-м разделе методики проведены исследования ЭДХ многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница», содержащей продольный ряд плоских диафрагм, в каждой из которых выполнены две диаметрально расположенные щели связи в форме сегмента, и дополнительных диафрагм с проточкой для увеличения концентрации электромагнитного поля в области рабочего зазора. Наличие двух щелей связи позволило получить равномерное распределение электрического поля в 6-ти пролетных каналах, расположенных на одинаковых радиусах 625 мкм. Сегментная форма щелей связи позволила выполнить диафрагму с размерами $2.4 \times 0.5 \times 5.4$ мм, обеспечивая требуемые условия по тепловому режиму ЛБВ при выходной мощности более 200 Вт. Наличие дополнительных диафрагм с внутренним радиусом 3 мм и проточкой 100 мкм позволило получить в многолучевой конструкции ЗС высокие значения сопротивления связи в *Ка*-диапазоне частот.

Исследован характер влияния основных параметров (формы щели связи, внутреннего диаметра дополнительных диафрагм и ширины их проточки, наличия симметричной и асимметричной трубки дрейфа) на ЭДХ 3С. В результате проведенного цикла расчетов предложена геометрия 3С, которая учитывала технологические возможности изготовления, обеспечивала в миллиметровом диапазоне длин волн рабочую полосу 1 ГГц и обладала требуемой теплорассеивающей способностью.

Для уменьшения тепловой нагрузки на 3С типа «сдвоенная лестница» была обеспечена высокая величина токопрохождения в каждом парциальном пролетном канале диаметром 500 мкм с током ЭП 60 мА при ускоряющем напряжении 5.5 кВ за счет магнитного поля 2.85 кГс, которое в 6 раз больше бриллюэновского поля.

Проведено моделирование динамического режима работы в 2.5D приближении многолучевой ЛБВ 8-мм диапазона длин волн в режиме большого сигнала. Показано, что выходная мощность при протяженности области взаимодействия 21 мм (12 периодов) составила не менее 318 Вт, усиление 18 дБ в полосе частот 2.9% при ускоряющем напряжении 5.5 кВ.

Характеристики разработанной и изготовленной на основе предложенной многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» импульсной ЛБВ 8-мм диапазона длин волн соответствуют расчётным характеристикам.

4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТИПА «ПЕТЛЯЮЩИЙ ВОЛНОВОД»

4.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи

В данном разделе представлены результаты численного моделирования ЭДХ модифицированной замедляющей системы типа «петляющий волновод» для широкополосной ЛБВ *W*-диапазона длин волн [41] (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 Конструкция модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

Предлагаемая модификация классической ЗС типа «петляющий волновод» заключается в добавлении выступов (1) в зазорах взаимодействия и индуктивных элементов (2) в виде короткозамкнутых отрезков волновода в Е-плоскости.

Выступы (1) предназначены для увеличения сопротивления связи, а индуктивные элементы (2) – для коррекции ДХ.

С учетом имеющихся технологических возможностей изготовления и обеспечения эффективности электронно-волнового взаимодействия диаметр пролетного канала ЗС был выбран равным 0.4 мм.

4.1.1 Влияние ширины и высоты прямоугольного выступа в модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» на ЭДХ

В каждом периоде модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» выполнены выступы (втулки) (1) (рис. 4.1) в области зазоров электронноговолнового взаимодействия, которые обеспечивали более высокую концентрацию электрического поля, чем в остальной части волновода, и соответственно, более эффективное электронно-волновое взаимодействие. Такая модификация ЗС позволила повысить сопротивление связи в рабочей полосе частот, по сравнению с классической ЗС типа «петляющий волновод» (рис. 4.2в).



Фазовый сдвиг на период, град



Рисунок 4.2 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи (в): классической ЗС (фиолетовая кривая) и модернизированной ЗС (красная кривая)

Анализ результатов, представленных на рис. 4.2, показал, что обе конструкции ЗС обеспечивали синхронизм в рабочей полосе частот 93÷94 ГГц при ускоряющем напряжении *U* в диапазоне от 16 до 18 кВ. Однако сопротивление связи в классической ЗС в 3 раза меньше, чем в модернизированной ЗС (рис. 4.2в), соответственно параметр усиления Пирса в конструкции с прямоугольными выступами на 5% больше, что позволило сократить длину пространства взаимодействия на 20 мм.

На рис. 4.3 приведены АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС, рассчитанные при значениях ширины прямоугольного выступа *V1* в диапазоне 0.9 ÷ 1.2 мм.



Рисунок 4.3 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в): V1=0.9 мм (фиолетовая кривая), V1=1 мм (красная кривая) и V1=1.2 мм (черная кривая)

Как показал анализ результатов, представленных на рис. 4.3, полоса прозрачности, величина замедления (ускоряющего напряжения) и сопротивление связи слабо зависели от ширины прямоугольных выступов V1.

На рис. 4.4 приведены АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС, рассчитанные при значениях высоты прямоугольного выступа *t1* в диапазоне 170 ÷ 370 мкм.





Рисунок 4.4 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в): *t1*= 170 мкм (фиолетовая кривая), *t1*= 330 мкм (красная кривая) и *t1*= 370 мкм (черная кривая)

Анализ результатов, представленных на рисунке 4.4а, показал, что увеличение высоты прямоугольных выступов *t1* приводило к уменьшению полосы прозрачности системы. Это связано с тем, что ЗС типа «петляющий волновод» приобретала более «резонансный» характер, т.к. в рабочем зазоре формировалась область с явно выраженной концентрацией электрического поля. Соответственно, эквивалентной ячейки этом случае, увеличение емкости уменьшало В высокочастотную отсечку. Однако, при высоте прямоугольных выступов t1=330 мкм происходила концентрация электрического поля в рабочем зазоре системы, а полоса прозрачности уменьшалась в основном за счет низкочастотной отсечки, а высокочастотная отсечка слабо изменялась. Таким образом, введение прямоугольных выступов в область взаимодействия «петляющего волновода» увеличивало сопротивление связи в широкой рабочей полосе на 25% без существенного изменения фазовой скорости в рабочем диапазоне частот. Ускоряющее напряжение при увеличении высоты прямоугольных выступов t1 уменьшалось пропорционально коэффициенту замедления.

4.1.2 Влияние ширины и высоты индуктивных элементов на ЭДХ модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

Каждый период модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» содержал индуктивные элементы в виде короткозамкнутых отрезков волновода в Е-плоскости (2) (рис. 4.1), позволивший обеспечить синхронизм в более широкой полосе частот, за счет уменьшения крутизны дисперсионной кривой.

На рис. 4.5 представлены АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС, рассчитанные при значениях ширины индуктивных элементов V2 в диапазоне 0 ÷ 900 мкм.





Рисунок 4.5 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в): *V2*=0 мкм (фиолетовая пунктирная кривая), *V2*=700 мкм (фиолетовая сплошная кривая), *V2*=800 мкм (красная кривая) и *V2*=900 мкм (черная кривая)

При увеличении ширины индуктивных элементов V2 полоса прозрачности системы увеличивалась за счет смещения высокочастотной отсечки, а сопротивление связи незначительно уменьшалось.

На рис. 4.6 представлены АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС, рассчитанные при значениях параметра *t*2 в диапазоне 0 ÷ 330 мкм, определяющего толщину индуктивных элементов.



71



Рисунок 4.6 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи (в): *t*2=0 мкм (фиолетовая пунктирная кривая), *t*2=250 мкм (фиолетовая сплошная кривая), *t*2=290 мкм (красная кривая) и *t*2=330 мкм (черная кривая)

Из анализа результатов, представленных на рис.4.6 следует, что увеличение высоты индуктивных элементов не привело к уменьшению полосы прозрачности системы и сопротивления связи, однако крутизна дисперсионной кривой и замедление уменьшились (рис.4.6а, б). Таким образом, изменение фазовой скорости замедленной волны без изменения периода позволило поддержать синхронизм вдоль системы при замедлении пучка в результате взаимодействия и, тем самым, повысило КПД и выходную мощность ЛБВ. При этом возможность фиксации периода по длине лампы без уменьшения толщины теплоотводящих
элементов повысило термостойкость внутренних элементов конструкции замедляющей системы и ее эксплуатационную надежность.

Оценка влияния размеров модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» на ее ЭДХ проводилась с помощью анализа чувствительности коэффициента замедления фазовой скорости n и сопротивления связи R_{ce} (+1)-ой рабочей гармоники, а также полосы пропускания Δf . Значения чувствительности контролируемых электродинамических параметров, представляющие собой производные, вычисляемые центральным методом второго порядка приведены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1 Динамика изменения контролируемых электродинамических параметров замедляющей системы в зависимости от ее основных размеров

Øm.	Замедление п							
Ŧ IIL'	дn	дn	дп	дп	дn	дп	дп	дп
рад	$\partial V1$	$\overline{\partial t1}$	$\partial V2$	$\partial t2$	∂L	∂V	∂b	$\overline{\partial h_s}$
	1/мм	1/мм	1/мм	1/мм	1/мм	1/мм	1/мм	1/мм
$3\pi/6$	0.012	2.3	-0.02	-0.075	0.06	-0.215	2.27	-3.729
$4\pi/6$	0.015	2.9	-0.045	-0.112	0.097	-0.260	2.323	-3.886
$5\pi/6$	0.018	3.75	-0.075	-0.187	0.143	-0.316	2.36	-4.018
	Сопротивление связи <i>R</i> _{се}							
	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm cb}$	$\partial R_{\rm CB}$	$\partial R_{\rm CB}$
	$\partial V1$	$\partial t1$	$\partial V2$	$\partial t2$	∂L	∂V	∂b	∂h_s
	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм	Ом/мм
$3\pi/6$	-2.98	188.4	-12.96	-3.51	7.93	6.32	-22.66	50.35
$4\pi/6$	-1.72	84.4	-7.70	-3.2	3.52	7.16	-12.81	33.47
$5\pi/6$	-1.03	34.9	-5.23	-2.66	2.97	5.85	-8.05	23.80

		Пол	оса проп	ускания 🛽	f		
$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$	$\partial \Delta f$
$\overline{\partial V1}$	$\partial t1$	$\partial V2$	$\partial t2$	∂L	∂V	∂b	∂h_s
%/мм	%/мм	%/мм	%/мм	%/мм	%/мм	%/мм	%/мм
0	-60	2.5	5	-6.25	5	7.25	-4.286

На основе анализа информации из табл. 4.1.1 была выбрана оптимальная геометрия модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» (табл. 4.1.2), удовлетворявшая требованиям электронно-оптической системы и технологии изготовления, параметры которой использовались при дальнейших расчетах.

Таблица 4.2 Модифицированная ЗС типа «петляющий волновод» с оптимальными параметрами для ЛБВ W-диапазона длин волн

Период <i>Hs</i> , мм	1.04
Ширина волновода <i>L</i> , мм	3.2
Высота волновода <i>b</i> , мм	1.67
Диаметр пролетного канала 2 <i>а</i> , мкм	400
Ширина встречной пластины V, мм	2.033
Толщина встречной пластины <i>t</i> , мкм	170
Толщины прямоугольных выступов <i>t1</i> , мкм	330
Ширина прямоугольных выступов V1, мкм	690
Ширина индуктивных элементов V2, мкм	800
Толщина индуктивных элементов <i>t</i> 2, мкм	290
Диаметр электронного пучка, мкм	160
Ускоряющее напряжение, кВ	17.5

На рис. 4.7 представлены результаты расчета АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС с оптимальной геометрией.



Рисунок 4.7 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи (в) модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

Анализ результатов, представленных на рис. 4.7, показал, что в диапазоне изменения фазового сдвига от $\pi/6 \le \varphi \le \pi$ синхронизм обеспечивался (при $n \sim 3.9$) между электронным пучком и (+1)-ой прямой пространственной гармоникой 1-й моды, которая распространялась в направлении движения ЭП при ускоряющем напряжении 17.5 кВ с сопротивлением связи более 11 Ом в рабочей полосе частот. На (-1)-ой обратной пространственной гармонике 1-й моды сопротивление связи более 100 Ом в рабочей полосе, однако напряжение синхронизма для получения генерации требовалось более 48 кВ, что исключало возникновение паразитного самовозбуждения.

4.2 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии в модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» представляет собой отрезок прямоугольного волновода, являющийся продолжением линии замедления, соединенный с клинообразным волноводным переходом на стандартное сечение 1.2×2.4 мм (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии в модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

Рассчитанная характеристика согласования клинообразного волноводного перехода приведена на рисунке 4.9, максимальное значение КСВН в рабочей полосе 1.05.



Рисунок 4.9 АЧХ КСВН клинообразного волновода

В области стыка клинообразного волновода с ЗС высота волновода составила всего 500 мкм. При пайке волновода с ЗС в этой области (что соответствует традиционной технологии сантиметровых ЛБВ) из-за возможных погрешностей сборки и затекания припоя с обеспечение низкого КСВН вывода энергии затруднено. По этой причине рассматривалась электроэрозионная технология изготовления волноведущей системы ЛБВ, предполагавшая выполнение из единой медной заготовки входного/выходного согласующих волноводов и самой ЗС. При этом вакуумная часть согласующих волноводов имела расширение сначала в плоскости XY, а затем в плоскости ZY с выходом на стандартное сечение 1.2×2.4 мм. Волноведущая система закрывалась двумя боковыми крышками с помощью термодиффузионной пайки. Использование такого интегрированного устройства ввода/вывода СВЧ-энергии (рис.4.8) исключило его пайку с мелкоструктурной 3С, и позволила уменьшить технологические уходы в местах стыка волноведущей системы ЛБВ [86].

Рассматривалось несколько вариантов выполнения вакуумно-плотного окна вывода энергии в ЛБВ мм-диапазона. Один из предложенных вариантов – баночное окно с вакуумно-плотной перегородкой из диэлектрического материала, в котором электрическое поле на поверхности керамического диска формировалось модами ТЕ₁₁ и ТМ₁₁ круглого волновода (рис. 4.10а) [87]. С целью повышения запаса прочности В отношении перепада давлений И получения надежного металлокерамического соединения толщина керамического диска имела вдвое большую величину по сравнению с конструкцией [87]. В мм-диапазоне материал обладать керамического диска должен комплексом противоречивых характеристик: малая диэлектрическая проницаемость є' и величина тангенса угла диэлектрических потерь ε″, значительная механическая и электрическая высокая теплопроводность термостабильность прочности, И И хорошая технологичность обработки и пайки. Для расширения полосы пропускания на входе и выходе окна использовались индуктивные диафрагмы, которые позволили компенсировать влияние на АЧХ технологических отклонений размеров элементов конструкции и параметров керамического диска. При нахождении керамического диска в минимуме электрического поля всего окна диэлектрические потери и соответственно нагрев диска снижались. Поверхностные токи в области металлокерамического спая имели незначительные величины – не более 0.4 кА/м при 100 Вт входной мощности. Рассчитанный КСВН входа баночного окна с диэлектрическим диском из нитрида бора (BN) в рабочей частотной области приведён на рис. 4.10б.

a)





Рисунок 4.10 a) Конструкция баночного окна вывода энергии и б) расчетная зависимость КСВН от частоты

Исследование предложенной конструкции баночного окна вывода СВЧэнергии с диэлектрической перегородкой из различных материалов для ЛБВ ммдиапазона показало, что использование BN обеспечивало широкую рабочую полосу частот и малые потери, повышая надежность работы узла. Кроме того материал BN является доступным и безопасным.

4.3 Локальный поглотитель СВЧ-энергии в модифицированной ЗС типа «петляющий волновод»

С целью получения высокого коэффициента усиления (42 дБ) ЛБВ с модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» необходимо обеспечить СВЧразвязку между входной и выходной секциями прибора, исключающую самовозбуждение. Разработана конструкция локального поглотителя, располагающегося в Е-плоскости волновода (рис. 4.11а), выполненная из керамики АН-МКХ2. Характеристики данной керамики были измерены в диапазоне (80÷120) ГГц. Получены значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 22$ и тангенса потерь tg $\delta = 0.16$.



Рисунок 4.11 Конструкция (а) и фотография изготовленного (б) локального поглотителя СВЧ-энергии

Форма поглотителя имела вид «шпильки» постоянной толщины (рис. 4.116), обеспечивая хороший тепловой контакт и согласование в широкой полосе частот (рис. 4.12). В отличие от традиционной клиновидной формы поглотителя [88], при пайке которого возникали трудности в *W*-диапазоне из-за мелкоструктурности, предложенная конструкция поглотителя имела постоянную толщину и прецизионно изготавливалась с помощью лазерной резки. Расчетный коэффициент отражения секции с локальным поглотителем |S₁₁| составил около -30дБ, обеспечивая надежную работу прибора (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 Расчетная АЧХ КСВН секции с локальным поглотителем

Расчетный КСВН секции с локальным поглотителем предложенной формы в рабочей полосе частот имел максимальное значение не более 1.14 (рис. 4.12).

4.4 Оценка параметров ЛБВ с модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» в режиме большого сигнала

Как известно, в *W*-диапазоне наблюдаются повышенные омические потери в 3C, вследствие чего снижаются коэффициент усиления и выходная мощность лампы. Для выравнивания АЧХ прибора, повышения выходной мощности и КПД требуется профилирование шага замедляющей системы, при котором происходит его плавное уменьшение к концу пространства взаимодействия. Как уже отмечалось во Введении, с увеличением рабочей частоты прибора уменьшаются размеры 3C, поэтому реализовать профилирование по длине мелкоструктурной 3C в ЛБВ *W*-диапазона труднее, чем в сантиметровых ЛБВ. В п.4.1.2 было показано, что в модифицированной 3C типа «петляющий волновод» реализовано плавное изменение фазовой скорости за счет изменения геометрии индуктивных элементов (рис. 4.5 и 4.6), при этом период 3C оставался неизменным на всей длине пространства взаимодействия для обеспечения хорошей теплорассеивающей способности, механической прочности конструкции 3C и для возможности использования ЭП с большим током.

Для профилирования фазовой скорости на трех участках пространства взаимодействия на основе результатов численного моделирования были подобраны оптимальные величины введенных индуктивных элементов 3С, обеспечившие требуемые ДХ и сопротивление связи (рис. 4.13а).



Количество периодов по длине ЗС, шт

б)



Рис. 4.13 Коэффициент замедления по длине пространства взаимодействия (а); конструкция и изготовленный опытный макет исследуемой 3С (б)

На основе траекторного анализа по программе TWT2D [85] пространства взаимодействия установлено, что 100% транспортировка ЭП с током 94 мА обеспечивалась при заполнении пучком пролетного канала на входе в область взаимодействия, равном (b/a)= 0.45 и на выходе из пространства взаимодействия – 0.85 (рис. 4.14). Требуемое заполнение обеспечивалось с помощью магнитного периодического фокусирующего поля с амплитудой первой гармоники В₁=0,39 Тл и периодом 9.6 мм.



Длина пространства взаимодействия, мм

Рисунок 4.14 Траектории электронов в пространстве взаимодействия в динамическом режиме, рассчитанные в TWT2D на центральной частоте

Расчет по программе TWT2D в 2.5D приближении [85] выходных характеристик ЛБВ с предлагаемой модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» (рис. 4.15) производился с помощью разработанного во Втором разделе программного модуля с использованием электродинамических характеристик, полученных в результате численного моделирования в CST.



Рисунок 4.15 Рассчитанные АЧХ выходной мощности и усиления ЛБВ

Как показал анализ результатов, представленных на рис. 4.15, уровень выходной мощности достигался более 80 Вт, коэффициент усиления 42 дБ и КПД 4% в полосе частот 1 ГГЦ (1.1 %) при ускоряющем напряжении 17.5 кВ.

4.5 Выводы

На основе методики, разработанной во 2-м разделе, проведены исследования ЭДХ модифицированной ЗС типа «петляющий волновод», выполненной с постоянным периодом, а каждая встречная пластина имела прямоугольный выступ и короткозамкнутый отрезок волновода в Е-плоскости. Предложенные модификации позволили расширить рабочую полосу ЛБВ и обеспечили незначительную крутизну дисперсионной характеристики, а также увеличили сопротивление связи на 25 % по сравнению с классической конструкцией ЗС типа «петляющий волновод».

84

Исследовано влияние размеров 3С на ЭДХ. В результате проведенных исследований предложена оптимальная геометрия 3С, которая обеспечила в миллиметровом диапазоне длин волн рабочую полосу 1 ГГц и учитывала технологические возможности изготовления.

Разработано интегрированное устройство ввода/вывода СВЧ-энергии модифицированной ЗС, в котором замедляющая система и согласующие волноводы изготовлены из единой заготовки и двух крышек прецизионным пайкой. электроискровым способом с последующей термодиффузионной Показано, что в предложенном устройстве ввода/вывода СВЧ-энергии КСВН не превосходил величину 1.14 в полосе частот 1.6 ГГц. Данная технология предназначена обеспечения воспроизводимости параметров 3C для И необходимого для промышленного производства процента выхода годных изделий.

Расположение локальных поглотителей СВЧ-энергии вблизи оси ЗС обеспечивало достаточную толщину стенок и механическую прочность конструкции при сохранении небольшого внешнего диаметра всей системы.

В режиме большого сигнала проведены расчеты двухсекционной ЛБВ на длине пространства взаимодействия 62.4 мм (60 периодов), имевшей три участка с разным замедлением $n_1 < n_2 < n_3$ рабочей гармоники вдоль центральной оси по направлению ЭП (при этом шаг системы оставался постоянным на всей длине лампы и составляет 1.04 мм). Профилирование фазовой скорости за счет изменения геометрии индуктивных элементов модифицированной ЗС типа «петляющий волновод» при ускоряющем напряжении прибора U=17.5 кВ и коэффициентами пропорциональности k между коэффициентом замедления n и ускоряющим напряжением U равными $k_1 = 506,5, k_2 = 508,8$ и $k_3 = 523,6$, позволил в полосе частот 1 ГГц обеспечить уровень выходной импульсной мощности более 80 Вт, коэффициент усиления 42 дБ и электронный КПД - 4%.

5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АЛМАЗНЫМ ТЕПЛООТВОДОМ

5.1 Дисперсионная характеристика и сопротивление связи

Представлены результаты численного моделирования электродинамических характеристик планарной замедляющей системы с теплоотводом из CVD алмаза для мощной ЛБВ *W*-диапазона длин волн (рис. 5.1) [89].



Рисунок 5.1 Конструкция ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза

Разработанная замедляющая система планарного типа содержала волновод, в котором размещалась диэлектрическая подложка с периодической системой проводников с топологией меандра. Вторая подложка с идентичной системой проводников располагалась параллельно первой, причем между проводниками подложек был образован пролетный канал вдоль продольной оси волновода. Ширина каждой подложки не превышала $\lambda/2$, где λ – длина волны, и была закреплена на расстоянии h от внутренней стенки волновода. Величина h выбиралась из условия $h \ge \frac{\lambda}{\epsilon \pi \sqrt{n^2 - 1}}$, где n – коэффициент замедления ($n = c/v_{\phi}$), c – скорость света, v_{ϕ} - фазовая скорость волны в системе. Для обеспечения требуемого теплоотвода в качестве материала диэлектрических подложек предложено использовать CVD алмаз.

В рассмотренной ЗС предполагается использовать ленточный ЭП с заданным 400×108 мкм, необходимым сечением для вычислении усредненного сопротивления связи ЗС. Эффективность взаимодействия ЭП с полем ЗС увеличением обеспечивается электрического поля И повышением его равномерности в области поперечного сечения пучка путем минимизации параметра уа, где а – полувысота пролетного канала, у – поперечная постоянная распространения рабочей пространственной гармоники. С учетом заданных размеров поперечного сечения пучка И технологических возможностей изготовления высота пролетного канала была выбрана 2a = 240 мкм.

5.1.1 Влияние толщины проводников на ЭДХ планарной ЗС типа «меандр»

В результате численного моделирования установлено, что толщина проводника d должна была быть не менее $p_0/17$, где p_0 – расстояние между соседними проводниками на подложке, т.к. при меньшей толщине происходило токооседание ЭП на поверхность диэлектрика, приводившее к накоплению заряда в подложке, появлению паразитных электростатических полей и инициализации процессов вторичной эмиссии.

Для снижения вызываемой диэлектрической подложкой нагрузки на проводники, приводящей к уменьшению концентрации электрического поля в области пучка, и с учетом имеющихся технологических возможностей была выбрана минимально возможная толщина подложки *t* = 150 мкм.

На рис. 5.2 приведены АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи ЗС, рассчитанные при значениях толщины проводников *d* в диапазоне 6 ÷ 80 мкм.



Рисунок 5.2 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи ЗС (в): *d*=6 мкм (зеленая кривая), *d*=30 мкм (голубая кривая), *d*=50 мкм (красная кривая) и *d*=80 мкм (черная кривая)

Анализ результатов, представленных на рис. 5.2а, показал, что полоса прозрачности расширялась с 147% до 156% при увеличении толщины проводников d от 6 до 80 мкм за счет смещения высокочастотной границы. Увеличение толщины проводников d приводило также к уменьшению замедления (рис. 5.2б) и следовательно, к увеличению ускоряющего напряжения. Сопротивление связи в высокочастотной области значительно уменьшалось при всех рассмотренных толщинах проводников d, однако в низкочастотной области наблюдалось высокое сопротивление связи с незначительной дисперсией (рис. 5.2в). Это связано с тем, что замедленная длина волны велика по сравнению с толщиной подложки t, и большая часть энергии волны распространялась в вакууме, а при укорочении длины волны большая часть энергии поля находилась в диэлектрике (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 Величина мощности в диэлектрических подложках (красная кривая) и в пролетном канале (зеленая кривая) как функция фазового сдвига

Для продления участка с высоким сопротивлением связи и слабой его дисперсией (см. рис. 5.2в) в высокочастотную область исследовалось влияние отношения толщины проводников к толщине подложки $d/_t$ (рис.5.4). При соотношении $d/_t = 0.2$ начало спада АЧХ сопротивления связи находилось на частоте ~ 70 ГГц, а при $d/_t = 0.04$ частота начала спада (излома) кривой

сопротивления связи смещалась в низкочастотную область (рис.5.4). Таким образом, частотная область излома кривой сопротивления связи зависела от отношения $d/_t$, что дало возможность расширять участок с высоким сопротивлением связи и слабой его дисперсией в высокочастотную область путем увеличения величины $d/_t$.



Рисунок 5.4 АЧХ сопротивления связи в 3С при толщине проводников d и толщине подложки t:d=6 мкм и t=150 мкм (d/t = 0.04) — красная кривая, d=6 мкм и t=30 мкм (d/t = 0.2) — синяя кривая, d=30 мкм и t=150 мкм (d/t = 0.2) — зеленая кривая

Как отмечалось выше, увеличение толщины проводников *d* приводило к уменьшению сопротивления связи и замедления (рис. 5.26, в), ухудшая тем самым ЭДХ ЗС. В результате исследования было установлено, что уменьшение периода ЗС *Hs* компенсировало недостатки связанные с увеличением толщины проводников *d* (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 АЧХ замедления (а) и сопротивления связи ЗС (б) при толщине проводников *d* и периоде ЗС *Hs*: *d*=50 мкм и *Hs* =190 мкм (красная кривая), *d*=80 мкм и *Hs* =190 мкм (сплошная черная кривая), *d*=80 мкм и *Hs* =170 мкм (пунктирная черная кривая)

Анализ результатов, представленных на рис. 5.5а, показал, что при периоде 3С Hs = 190 мкм и толщине проводников d = 50 мкм и d = 80 мкм замедление уменьшалось, например, на частоте 100 ГГц с 4.5 до 3.8, соответственно ускоряющее напряжение изменялось с 13 до 18 кВ. Уменьшение периода 3С до 170 мкм при толщине проводников 80 мкм компенсировало изменение сопротивления связи и замедления (на рис. 5.5а, б кривые для d = 50 мкм и Hs = 190 мкм практически совпадают). Однако уменьшение периода 3С *Hs* приводило к усложнению технологии изготовления и увеличению тепловой нагрузки на нее. Таким образом, толщина проводников *d* выбиралась с учетом имевшихся технологических возможностей, позволявших получить высокие ЭДХ 3С, точность и качество поверхностей.

5.1.2 Влияние ширины проводников на ЭДХ планарной ЗС типа «меандр»

Исследование влияния ширины проводников *d*₁ на ЭДХ планарной ЗС типа «меандр» показало, ЧТО увеличение ширины проводников приводило К значительному уменьшению замедления И следовательно К увеличению ускоряющего напряжения в высокочастотной области. При этом полоса прозрачности ЗС не зависила от ширины проводников d_l (рис. 5.6а).





Рисунок 5.6 АЧХ замедления (а) и сопротивления связи (б): *d*₁=20 мкм (голубая кривая), *d*₁=25 мкм (красная кривая) и *d*₁=30 мкм (зеленая кривая)

Анализ результатов, представленных на рис. 5.66, показал, что при уменьшении ширины проводников d_1 с 30 до 20 мкм сопротивление связи увеличивалось в низкочастотной области на 14%, однако при углах фазового сдвига от $\pi/2$ до π (рабочих) сопротивление связи слабо зависило от ширины проводников.

Таким образом, с учетом всех технологических ограничений и требований к параметрам электронно-оптической системы (ускоряющее напряжение не более 15 кВ при плотности тока с катода 100 А/см²), были подобраны оптимальные параметры планарной ЗС типа «меандр» (Таблица 5.1.1), которые использовались при дальнейших расчетах.

Таблица 5.11.5.1 Планарная ЗС типа «меандр» с оптимальными параметрами для ЛБВ *W*-диапазона длин волн

Период <i>Hs</i> , мкм	190
Ширина волновода <i>L</i> , мм	0.8
Высота пролетного канала 2а, мкм	240
Толщина алмазной подложки <i>t</i> , мкм	150

Ширина проводников d1 , мкм	25
Толщина проводников <i>d</i> , мкм	50
Расстояние от внутренней стенки волновода <i>h</i> , мм	0.5
Ширина электронного пучка, мкм	400
Высота электронного пучка, мкм	108

На рис. 5.7 представлены: АЧХ диаграммы Бриллюэна, замедления и сопротивления связи планарной ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза с оптимизированными параметрами.





Рисунок 5.7 АЧХ диаграммы Бриллюэна (а), замедления (б) и сопротивления связи (в) планарной ЗС типа «меандр» с оптимальными параметрами

В диапазоне изменения фазового сдвига от $0 \le \phi \le \pi$ синхронизм обеспечивался между электронным пучком и 0-й прямой пространственной гармоникой 1-й моды (рис.5.7б), которая распространялась в направлении движения электронного пучка при ускоряющем напряжении 15.6 кВ и имела более высокое сопротивление связи (рис. 5.7в) по сечению электронного пучка, чем для других пространственных гармоник, что исключало возникновение паразитных генераций.

5.2 Электронно-оптическая система для планарной ЗС типа «меандр»

В разработанной планарной ЗС предполагалось использовать ленточный ЭП, формируемый металлосплавным плоским неэкранированным катодом с плотностью тока 100 A/см². Ранее такой катод использовался в субмиллиметровых ЛОВ. Как известно [90], для тонких высокопервеансных электронных потоков требуется повышенная фокусирующего величина магнитного полю, удовлетворяющая соотношению $B/B_0 \ge 6$, где B_0 – индукция магнитного поля Бриллюэна, В – индукция магнитного поля. Это связано с возмущениями поперечного сечения ленточного ЭП в процессе его движения в продольном однородном магнитном поле в виде S-образного загиба краев и его монотонного

95

поворота по мере приближения к коллектору. Таким образом, для 100% токопрохождения в пролетном канале планарной ЗС типа «меандр» магнитная фокусирующая система должна обеспечивать постоянное распределение профиля продольной составляющей магнитного поля на оси ЗС с амплитудой 0.8 Тл.

На рисунке 5.8 представлены расчетные траектории ЭП с заданным сечением 400×108 мкм и током 43 мА при ускоряющем напряжении 15.6 кВ [91].



Рисунок 5.8 Траектории ЭП в канале планарной ЗС типа «меандр»

В результате численного моделирования [11] установлено, что при соотношении $B/B_0 = 8.8$ обеспечивалось полное токопрохождение ЭП на коллектор. Для уменьшения массогабаритных параметров магнитной фокусирующей системы потребуется разработать электронно-оптическую систему с экранированным катодом, а для уменьшения плотности тока с катода – с компрессией ЭП.

5.3 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС типа «меандр»

С целью повышения эффективности использования рассматриваемой планарной ЗС в ЛБВ предложено устройство для ввода-вывода СВЧ-энергии, представлявшее собой трансформатор типа волны ЗС, расположенный перпендикулярно ее оси и содержащий проводящий согласующий элемент в виде перемычки серповидной формы, соединяющей широкую стенку отрезка прямоугольного волновода и крайний волноведущий элемент ЗС (рис. 5.9)



Рисунок 5.9 Устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС [92]

Разработанный переход обеспечивал требуемый уровень согласования в широкой полосе пропускания ЗС.

Предлагаемое устройство ввода/вывода СВЧ-энергии спроектировано на стандартное сечение прямоугольного волновода 1.2×2.4 мм. Рассчитанный КСВН планарной ЗС с данными выводами приведен на рисунке 5.10.



Рисунок 5.10 Расчетный КСВН в полосе прозрачности ЗС типа «меандр»

Анализ результатов, приведенных на рисунке 5.10, показал, что максимальный КСВН в рабочей полосе 7 ГГц составлял 1.7, а в полосе 5 ГГц – 1.5, что значительно ниже КСВН известных аналогов [93].

5.4 Оценка параметров ЛБВ с планарной ЗС в режиме большого сигнала

В качестве примера применения планарной ЗС на подвешенной алмазной подложке была рассчитана односекционная «прозрачная» ЛБВ с заданным усилением не более 16 дБ.

Расчет выходных параметров ЛБВ осуществлялся с использованием одномерной программы, предназначенной для расчета пространства взаимодействия широкополосных ЛБВ в режиме анализа и оптимизации. Рассчитывались амплитудно-частотная и амплитудно-фазовая характеристики ЛБВ. Одномерная модель взаимодействия основана на «волновом методе» (разложение динамических переменных в ряд Фурье по фазе влета) и позволяла достаточно полно описывать существенные нелинейности ЛБВ. Процесс взаимодействия ЭП с полем 3С описывался системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Входными данными для одномерной программы были ЭДХ используемой ЗС из пункта 5.1.2 в рабочей полосе частот 92÷95 ГГц.

Моделирование режима большого сигнала позволило получить зависимости выходной мощности и усиления от продольной координаты в пространстве взаимодействия (24.7 мм) при фиксированной входной мощности 1 Вт во всем рабочем диапазоне (рис. 5.11).



Рисунок 5.11 АЧХ выходной мощности и усиления ЛБВ

Результаты моделирования показали возможность достижения в мини-ЛБВ *W*диапазона с планарной ЗС типа «меандр» на подвешенной подложке рабочей полосы 3% при выходной непрерывной мощности более 35 Вт, усилении 15 дБ и ускоряющем напряжении всего 15.6 кВ.

5.5 Выводы

На основе методики, разработанной в разделе 2, проведены исследования ЭДХ планарной 3С типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза. Использование CVD алмаза в качестве материала диэлектрических подложек позволило закрепить их в волноводе на определенном расстоянии от его внутренней стенки, что, в свою очередь, способствовало существенному увеличению сопротивления связи на оси замедляющей системы.

Исследован характер влияния основных параметров (толщина и ширина проводников) на ЭДХ ЗС. В результате проведенного цикла расчетов опеределены

99

параметры 3С, которые обеспечили в миллиметровом диапазоне длин волн рабочую полосу 3 ГГц с учетом технологических возможностей изготовления.

Проведены расчеты электронно-оптической системы. Показано, что для 100% токопрохождения ленточного ЭП с током 43 мА при ускоряющем напряжении 15.6 кВ требовалось обеспечить запас по фокусирующему магнитному полю не менее, чем в 8 раз.

Разработано устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС. Показано, что геометрия согласующего элемента, выполненного в виде перемычки серповидной формы, соединявшей широкую стенку отрезка прямоугольного волновода и крайний волноведущий элемент ЗС, обеспечила КСВН не более 1.7 в полосе частот 7 ГГц.

Проведен расчет параметров ЛБВ мм-диапазона длин волн в одномерном приближении в режиме большого сигнала. Показано, что выходная мощность при длине взаимодействия 24.7 мм (130 периодов) составила не менее 35 Вт с усилением 16 дБ в рабочей полосе частот 5 ГГц при низком ускоряющем напряжении – 15.6 кВ.

Заключение

В диссертационной работе проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований, связанный с изучением характеристик и параметров сложных электродинамических структур миллиметрового диапазона длин волн и разработкой технологии их проектирования для мощных (35÷110 Вт) низковольтных (5.5÷18 кВ) ЛБВ.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- Разработана методика анализа и на ее основе программный модуль для расчета ЭДХ ЗС различного типа, в том числе не имеющих зеркальных плоскостей симметрии, позволяющая сочетать высокую точность расчета с небольшими затратами вычислительных ресурсов. Программа осуществляет расчет дисперсионной характеристики и сопротивления связи в основной и высших полосах пропускания на любой пространственной гармонике с погрешностью не более 0.07% по длине волны и 3÷10% по сопротивлению связи. Полученные результаты дали возможность подтвердить второе, третье и четвертое научные положения, выносимые на защиту.
- 2. Предложен ряд новых конструкций ЗС и выработаны практические рекомендации по выбору их конкретных конструктивных параметров, обеспечивающих эффективное взаимодействие потока с полями ЗС в ЛБВ ммдиапазона длин волн с увеличенной выходной мощностью и расширенной рабочей полосой усиления, а также обладающих высокими технологичностью и теплорассеивающей способностью: планарная ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой из CVD алмаза, модифицированная ЗС типа модифицированная «петляющий волновод» И многолучевая 3C типа «сдвоенная лестница».
- Показано, что использование подвешенной подложки в планарной ЗС позволило получить широкополосную систему и обеспечило высокое сопротивление связи в области взаимодействия. Полоса прозрачности

планарной ЗС типа «меандр» при коэффициенте замедления (0)-й пространственной гармоники замедляющей системы, равном 2.8÷6 достигала 156%, а сопротивление связи 26÷1.5 Ом. Данную ЗС целесообразно использовать при коэффициентах замедления ЭМВ, равных 4÷4.28. При этом рабочая полоса составляет 5%, а сопротивление связи в ней – 21.3÷17.8 Ом. Изготовленные образцы макетов такой ЗС показали возможность ее промышленной реализации при условии дальнейшей отработки технологии.

- 4. Проведен численный анализ АЧХ взаимодействия в односекционной «прозрачной» ЛБВ с предложенной ЗС типа «меандр». Показано, что в ЛБВ 3мм диапазона длин волн с планарной ЗС типа «меандр» выходная мощность составляла более 35 Вт и усиление 16 дБ в рабочей полосе 5 ГГц при напряжении питания не более 15.6 кВ. Максимальное расчетное значение электронного КПД достигало 7%.
- 5. Проведено теоретическое исследование возможности существенного увеличения электронного КПД в ЛБВ *W*-диапазона путем профилирования замедления фазовой скорости с постоянным периодом ЗС типа «петляющий волновод» за счет изменения геометрии введенных индуктивных элементов.
- 6. Разработана двухсекционная ЛБВ 3-мм диапазона с модифицированной ЗС типа «петляющий волновод». Выходная мощность составила более 80 Вт, усиление 42 дБ в полосе рабочих частот 1 ГГц при напряжении питания 17.5 кВ. По комплексу параметров ЛБВ соответствует уровню лучших мировых образцов. Макет ЛБВ в настоящее время находится в процессе испытаний.
- 7. На основе анализа взаимодействия экспериментальной мощной односекционной «прозрачной» многолучевой ЛБВ 8-мм диапазона длин волн с ЗС типа «сдвоенная лестница» с дополнительными диафрагмами показано, что при напряжении питания 5.5 кВ выходная мощность составила 220 Вт в полосе частот 1 ГГц при усилении 13.4 дБ, а электронный КПД 15.5%. ЛБВ подготовлена к выпуску в серийное производство.

Разработанный программный модуль по расчету ЭДХ ЗС внедрен в на предприятии АО «НПП «Исток» им.Шокина» (г. Фрязино), а также используется в курсах лекций «Системы автоматизированного проектирования в электронике» и «Вакуумная и плазменная электроника», читаемых на кафедре конструирования СВЧ и цифровых радиоэлектронных средств в филиале РТУ МИРЭА (г. Фрязино).

Основные результаты диссертационной работы применены на предприятии АО «НПП «Исток» им.Шокина» (г. Фрязино) для разработок опытных образцов ЛБВ, предназначенных для использования в качестве усилителей передатчиков РЛС мм-диапазона длин волн нового поколения, а также могут найти применение на родственных предприятиях отрасли АО «НПП Алмаз» (г. Саратов), АО «НПП Торий» (г. Москва) и АО «НПП «Салют» (г. Нижний Новгород).

глубокую благодарность В заключение, выражаю плодотворное за сотрудничество поддержку при написании работы моему научному И руководителю Анатолию Васильевичу Галдецкому, а также сотрудникам НПК-2 Борису Викторовичу Сазонову, Григорию Валентиновичу Бакунину, Василия Александровича Смирнова, Наталью Михайловну Коломийцеву, сотрудникам Отдела 220 Михаилу Петровичу Духновскому и Юрию Юрьевичу Федорову Выражаю благодарность сотруднику отделения 10 Александру Николаевичу Савину за обсуждение результатов и полезные советы.

Список использованной литературы

- W.D. Palmer et al. Advances in vacuum electronics at DAPRA. 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), 2013.
- Graham Finnie. Chief analyst heavy reading. European FTTH Forecast, 2013-2018.
 Presentation to the FTTH Council Europe Conference
- 3. Final Report of the Project MiWaveS «Beyond 2020 heterogeneous wireless network with millimeter-wave small-cell access and backhauling»
- 4. Grigoriev A.D [Design of TWT in millimeter and sub-millimeter wavebands] // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika, 2015, V. 4(527), P. 28-34. (in Russian).
- 5. Rakova E.A. [Design of W-band with slow-wave structure on diamond wafer] // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki, 2016, No. 2, P. 51. (in Russian).
- F. Andre et al., "Fabrication of W-band TWT for 5G small cells backhaul," in Proc. 18th Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC), London, U.K., Apr. 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/IVEC.2017.8289653.
- Белявский Б.А., Бородин В.А., Носовец А.Ф. Мощные импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона // Сборник статей четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2015, том 1, с. 176-179
- F. Andre et al., "Technology, Assembly, and Test of a W-Band Traveling Wave Tube for New 5G High-Capacity Networks" in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 67, no. 7, pp. 2919–2924, July 2020, doi: 10.1109/TED.2020.2993243
- C. Paoloni et al., "TWEETHER future generation W-band backhaul and access network technology," in Proc. Eur. Conf. Netw. Commun. (EuCNC), Oulu, Finland, Jun. 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/EuCNC. 2017.7980684.
- 10. Wang J., Zhang D., Liu C.и др. UNIPIC code for simulations of high power microwave devices // Physics of Plasmas. 2009. Т. 16. № 3. с. 0331081-03310810.
- 11. CST STUDIO SUITE ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION
 SOFTWARE : Dassault Systemes. URL: <u>https://www.3ds.com/products-</u>

services/simulia/products/cststudiosuite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301
&utm_campaign=cst.

- Understand, Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics : Comsol. URL: <u>https://www.comsol.com/comsolmultiphysics</u>.
- Starinshak D.P., Smith N.D., Wilson J.D. Using COMSOL Multiphysics software to model anisotropic dielectric and metamaterial effects in folded-waveguide travelingwave tube slow-wave circuits. in Vacuum Electronics Conference, 2008. IVEC 2008. IEEE International, 6 2008. pp. 162-163.
- HFSS 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design : Ansys. URL: <u>https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS</u>.
- Antonsen T.M.J., Levush B. CHRISTINE: A Multifrequency Parametric Simulation Code for Traveling Wave Tube Amplifiers. : NRL Internal report, 1997. — 39.
- 16. Chernyavskiy I.A., Chernin D., Vlasov A.N.и др. Modeling of the wide-band coupled-cavity TWTS with the large-signal code TESLA-CC. in Plasma Science (ICOPS), 2011 Abstracts IEEE International Conference on, 6 2011. pp. 1-1.
- 17. Chernyavskiy I.A., Cooke S.J., Vlasov A.N.и др. Parallel Simulation of Independent Beam-Tunnels in Multiple-Beam Klystrons Using TESLA // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. T. 36. № 3. — с. 670-681.
- Chernyavskiy I.A., Petillo J.J., Vlasov А.N.и др. End-to-end analysis using MICHELLE and TESLA codes. in Plasma Science - Abstracts, 2009. ICOPS 2009. IEEE International Conference on, 6 2009. pp. 1-1.
- Chernyavskiy I.A., Vlasov A.N., Antonsen Т.М.и др. Validation study of the TESLA model for extended interaction klystron. in Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2011 IEEE International, 6 2011. pp. 89-90.
- 20. Cooke S.J., Vlasov A.N., Levush В.и др. GPU-accelerated 3D time-domain simulation of vacuum electron devices. in 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 6 2011. pp. 305-306.

- 21. Vlasov A.N., Cooke S.J., Levush В.и др. 16.1: 2D modeling of beam-wave interaction in coupled cavity TWT with TESLA. in Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2010 IEEE International, 6 2010. pp. 405-406.
- 22. Borisov A.A., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V.и др. The development of vacuum microwave devices in Istok. in Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2011 IEEE International, 6 2011. pp. 437-438.
- Dayton J.A., Kory C.L., Mearini G.T. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul. in Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015 IEEE International, 6 2015. pp. 1-2.
- 24. Zaginaylov G.I., Gandel Y.V., Kamyshan O.P.и др. Full-wave analysis of the field distribution of natural modes in the rectangular waveguide grating based on singular integral equation method // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. T. 30. № 3. c. 1151-1159.
- Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А.и др. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8. — с. 601-613.
- 26. Бушуев Н.А.: ' Расчет собственных мод диафрагмированного волновода для гиро-приборов с замедленными волнами'. Ргос. Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике (Proceedings of the 4-th IEEE Saratov-Penza Chapter Workshop. 26 sept. 1999), Саратов2000 pp. 87-91
- 27. Гольденберг Б.Г. Базовые принципы LIGA-технологии. URL: www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lections/Theory_of_LIGA-tecnology.pdf.
- 28. Thevenoud J.M., Mercier B., Bourouina Т.и др. DRIE TECHNOLOGY: FROM MICRO TO NANOAPPLICATIONS. 2017.
- 29. MEMS and MOEMS Technology and Applications.Rai-Choudhury P., 2000. 528.
- Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. T. 50. № 3. — c. 910-928.

- 31. Carlsten B.E., Russell S.J., Earley L.M.и др. Technology development for a mm-wave sheet-beam traveling-wave tube // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005.
 T. 33. № 1. c. 85-93.
- 32. T. Horn, I. Karakurt, C. Ledford, M. Gonzalez, D. Gamzina, N. C. Luhmann, Jr., and L. Lin, "Additively Manufactured WR-10 Copper Waveguide," Proceedings of the 19th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 409-410, Monterey, CA, USA (2018).
- 33. A. M. Cook, C. D. Joye, R. L. Jaynes, and J. P. Calame, "W-band TWT Circuit Fabricated by 3D-Printed Mold Electroforming," Proceedings of the 19th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 331332, Monterey, CA, USA (2018).
- 34. N. M. Jordan, G. B. Greening, S. C. Exelby, R. M. Gilgenbach, Y. Y. Laqu, and B. W Hoff, "Additively Manufactured Anodes in a Relativistic Planar Magnetron," Proceedings of the 17th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, USA (2016).
- 35. S. J. Cooke, I. A. Chernyavskiy, G. M. Stantchev, B. Levush, T. M. Antonsen Jr., "GPU-Accelerated Large-Signal Device Simulation Using the 3D Particle-in-Cell Code 'Neptune'," 39th IEEE International Conference on Plasma Science, Edinburgh, UK, July 8-12, (2012).
- 36. J.J. Petillo et al., "The MICHELLE threedimensional Electron gun and collector design tool: Theory and Design," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 30, Iss. 3, pp. 1238, June 2002.
- 37. Stellar Science Ltd Co. Galaxy Simulation Builder (GSB) User Guide, Version 6.6. High Power Electromagnetic Division, Air Force Research Lab, Kirtland, NM (2017).
- 38. AWR ANALYST-MP code: http://www.awrcorp.com/products/analyst/analystmp
- 39. C. D. Joye, et al., "Circuit Fabrication Methods for Millimeter-Wave Vacuum Electronics,", IEEE proceedings of the IVEC 2019.

- 40. Glyavin M.Y, Idehara T., Sabchevski S.P. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and highpower THz technologies // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5. No. 5. P. 788-797.
- 41. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Сапрынская Л.А.и др. Мощная ЛБВ миллиметрового диапазона с прецизионной технологией изготовления согласующих элементов конструкции // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7(10). с. 73-82.
- 42. Белявский Б.А., Фокин К.Л.: 'Мощная усилительная цепочка миллиметрового диапазона'. Ргос. Сборник статей Всероссийской конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ", С-Петербург2018 pp. 138-142
- 43. Ulisse G., Krozer V. W-Band Traveling Wave Tube Amplifier Based on Planar Slow Wave Structure // IEEE Electron Device Letters. 2017. T. 38. № 1. c. 126-129.
- J.Feng, J.Cai, Y.Hu, X.Wu, Y.Du, J.Liu, P.Pan, and H.Li, "Development of W-Band Folded Waveguide Pulsed TWTs", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 61, no. 6, pp. 1721–1725, 2014. doi: 10.1109/TED.2014.2307476.
- 45. R. K. Sharma, A. Grede, S. Chaudhary, V. Srivastava, and H. Henke, "Design of Folded Waveguide Slow-Wave Structure for W-Band TWT", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 42, no. 10, pp. 3430–3436, 2014. doi: 10.1109/TPS.2014. 2352267.
- 46. Fabrication of microstructured optical elements for visible light by means of LIGA-technology / B. G. Goldenberg [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Sec. A. 2009. Vol. 603, № 1/2: Proceedings of the XVII International Synchrotron Radiation conference: SR-2008, Novosibirsk, Russia, June 15-20, 2008. P. 157-159.
- 47. Xianbao Shi, Laxma R. Billa1, Yubin Gong, and all. High Efficiency and High Power Staggered Double Vane TWT Amplifier Enhanced by Velocity-Taper Design// Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 66, 39–46, 2016.
- 48. Y. Du, et al. "Experimental Investigation of an Ultrawide Bandwidth WBand Pulsed Traveling-Wave Tube With Microfabricated FoldedWaveguide Circuits," IEEE Trans. Plasma Science, vol. 47, no. 1, pp. 219–225 (2019).
- 49. R. Kowalczyk, et al., "A 100 Watt W-Band MPM TWT," Proceedings of the 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Paris, France (2013).
- 50. C. M. Armstrong, et al. "A Compact Extremely High Frequency MPM Power Amplifier," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 65, no. 6, pp. 2183–2188 (June 2018).
- 51. В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев, А.П. Онищенко Исследование эффективности отбора СВЧ-энергии от электронного потока в четырехзазорном фотоннокристаллическом резонаторе миниатюрного многолучевого клистрона Кдиапазона // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 3(546) – 2020, стр. 58-65
- 52. А.И. Тореев, В.К. Федоров Усилительный клистрон с распределённым взаимодействием миллиметрового диапазона //Прикладная физика.-2008.-№5.-С.117-121
- 53. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова, Г.В. Рувинский, И.Г. Солдатенко ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления // Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 3(546) – 2020, стр. 66-83
- 54. Кириченко Д.И., Шалаев П.Д., Роговин В.И.: 'Направления разработки и производства в АО «НПП «Алмаз» ламп бегущей волны для спутниковой связи'. Ргос. материалы XXII Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения», Москва2018 рр. 309-311
- 55. C.K. Chong et al. 550-W Ka-band pulsed helix TWT for radar applications. IEEE Proceedings of the IVEC, 2018.
- 56. T. Barsotti, J. Gastaud, J. Pontic, and M. Barentin, "40W Q wideband space TWT," in 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 2018, pp. 15–16.
- 57. N. Robbins, D. Eze, H. Cohen, X. Zhai, W. McGeary, W. Menninger, M. Chen, and E. Rodgers, "Space qualified 200-Watt Q-band linearized traveling-wave tube

amplifier," in 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), April 2018, pp. 13–14

- Yanjun Cui et al. Reliability of a Ka-band airborne millimeter wave power module. IVEC Digest, 2015.
- 59. Bo Chen et al. Development of a Ka-band helix travelling wave tube for millimeter wave power moduls. IVEC Digest, 2015.
- 60. Dayton J.A., Kory C.L., Mearini G.T. Microfabricated mm-wave TWT platform for wireless backhaul // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015). April 27-29, 2015, Beijing, China.
- 61. Lueck M.R., Malta D.M., Gilchrist K.H., Kory C.L., Mearini G.T., Dayton J.A. Microfabrication of diamond-based slow-wave circuits for mm-wave and THz vacuum electronic sources // J. Micromech. Microeng. 2011. Vol. 21. No. 6. 065022.
- 62. Н.А. Бушуев Проблемы разработки широкополосных ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Журнал Радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, № 11, 2016
- D. Chernin, T.M. Antonsen, Jr., A.N. Vlasov, I.A. Chernyavskiy, K.T. Nguyen, B. Levush, "1-D Large Signal Model of Folded-Waveguide Traveling Wave Tubes," IEEE Trans. on Electron Devices, V. 61, No. 6, 2014, p. 1699.
- 64. I.A. Chernyavskiy, T.M. Antonsen, D.Chernin, A.N. Vlasov, B. Levush, "Timedependent 2D Large Signal Modeling of Folded-waveguide Traveling Wave Tubes", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 63, No. 6, pp.2531-2537, June 2016.
- 65. H. Gong, Y. Gong, T. Tang, J. Xu and W. Wang, "Experimental Investigation of a High-Power Ka-Band Folded Waveguide TravelingWave Tube," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 58, no. 7, pp. 2159-2163, July 2011.
- 66. Tieyang Wang, Kaifang Chen, T. Tang, H. Gong and Jinjun Feng, "Large signal beam-wave interaction analysis of folded waveguide traveling wave tube," 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, 2016, pp. 1-2.

- 67. Aksenchyk A.V, Kurayev A.A., A. A. Kirinovich I.F. "Folded waveguide TWT Frequency Characteristics in the range 600-3000 GHz", IVEC2009, pp. 461-462, 2009.
- 68. Fei Li, Tianjun Ma and Yongliang Liu, "Design of W Band Three-section Folded Waveguide Traveling Wave Tube", IVEC2016, pp.155-156,2016.
- 69. Ivanov A.A., Nagornyuk M.S., Smirnov A.E.и др. W-band Pulsed TWT Family with Different Output Power. in 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 6 2019. pp. 1-1.
- 70. E. Bogomolova, A. Savin, M. Davidovich Investigation of electromagnetic wave propagation in a decelerating system of the «Double two-step comb» type// 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020), September 24-25, 2020, Saratov, Russia, pp.146-148
- 71. A.M. Cook et al. W-band TWT component fabrication and testing. IEEE Proceeding of the IVEC, 2019.
- 72. Jaynes et al. Characterization of W-band serpentine waveguide TWT circuits. IEEE Proceedings of the IVEC 2019.
- Alexander N.Vlasov et al. Design of a low voltage folded waveguide four beam mini-TWT. Proceedings of the IVEC, 2018
- 74. Reginald L.Jaynes et al. Fabrication and testing of Ka-band multi-beam TWT circuits. Proceedings of the IVEC, 2018
- 75. Wei Y., Guo G., Gong Y.и др. Novel W-Band Ridge-Loaded Folded Waveguide Traveling Wave Tube // IEEE Electron Device Letters. 2014. Т. 35. № 10. — с. 1058-1060.
- 76. Tweether. [Online]. Available: <u>https://tweether.eu/</u>
- 77. Ю.Г. Альтшулер, А.С. Татаренко Лампы малой мощности с обратной волной//Изд. Советское радио, Москва 1963, 296 с.
- 78. Р.А. Силин Периодические волноводы // М.: ФАЗИС, 2002. X+438с., ISBN 5-7036-0073-1

- 79. А.А. Кураев, А.В. Аксенчик Мощные приборы с дискретным взаимодействием (теория и оптимизация)//-Мн.:Бестпринт, 2003.-376 с.
- А.Д. Григорьев Методы вычислительной электродинамики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 432 с. – ISBN 978-5-9221-1450-9.
- 81. А.Н. Савин Исследование электродинамических характеристик структур вакуумной электроники и магнитоэлектроники СВЧ на основе регрессионных моделей: Дис. на соискание...канд. физ.-мат. наук. Саратов: СГУ, 2003. –184 с.
- Horsley W. Measurement of dispersion and interaction impedance characteristics of slow-wave structures by resonance methods. / Horsley W. and Pearson A. // IEEE Trans. Electron Devices. 1966. Vol. ED-13, pp. 962–969.
- 83. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова Модуль для расчета дисперсионной характеристики и сопротивления связи замедляющих систем в программе моделирования высокочастотных электромагнитных полей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619311 от 08.06.2021
- 84. Г.В. Бакунин, А.А. Батраков, А.В. Галдецкий, И.П. Натура, Е.А. Ракова, Л.А. Сапрынская, И.М. Соколова, И.П. Чепурных Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона// Науч.-техн. сб. «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 1(524) 2015, стр. 54-67
- 85. A.S. Pobedonostsev et al. New 2.5D code for modeling of nonlinear multisignal amplification in a wideband helix traveling wave tube // Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference IEEE Cat. No.04EX786, 2004, pp. 144-145, doi:10.1109/IVELEC.2004.1316240
- 86. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова, Н.М. Коломийцева Лампа бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн. Заявка на изобретение № 2021119150 от 29.06.2021г.
- Prokofiev B.V., Martynenko M.A. A Simple Pillbox-Type Mixed-Mode Window for High Power Microwave Devices // in 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2017. pp. 1 – 2.

- 88. Zhigang Lu, a Zhicheng Su, and Yanyu Wei Design and cold test of period-tapered double-ridge-loaded folded waveguide slow wave structure for Ka band TWTs //AIP ADVANCES 8, 055105 (2018)
- 89. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А. Замедляющая система планарного типа. Патент RU2653573, Россия 06.03.2017
- 90. И.В. Алямовский Электронные пучки и электронные пушки//Изд.М.: Советское радио, 1966, стр. 454
- 91. Е.А. Ракова Проектирование ЛБВ W-диапазона с замедляющей системой на алмазном теплоотводе // Научно-технический сборник «Успехи современной радиоэлектроники» № 2' 2016, стр. 51
- 92. Е.А. Ракова, Галдецкий А.В. ЛБВ W-диапазона с планарной замедляющей системой на алмазном теплоотводе //25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Материалы конференции в двух томах 6-12 сентября 2015г., г. Севастополь, Крым, Россия, том 1, стр. 176
- 93. Р.А. Торгашов, Н.М. Рыскин, А.Г. Рожнев и др. Исследование миниатюрной замедляющей системы на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона// Материалы VIII Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 3 июня 6 июня 2019г., г. С.-Петербург, стр. 117-121 ISBN 978-5-7629-2456-6

Приложение

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора директор по научной работе АО «НПП «Исток» им. Шокина» на **С.В.** Щербаков «15» июля 2021 г.

АКТ

об использовании в разработках предприятия АО «НПП «Исток» им. Шокина» результатов, полученных Е.А. Богомоловой и включенных в ее диссертацию на соискание ученой степени к.т.н. «Замедляющие системы с улучшенными электродинамическими параметрами и теплорассеивающей способностью для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона»

Настоящий акт составлен в том, что исполнителем ОКР «Вакуум-24» и ОКР «ЛБВ- 3» Е.А. Богомоловой получены и внедрены на предприятии следующие результаты путем:

1. проектирования широкополосной модифицированной низковольтной замедляющей системы типа «петляющий волновод» и расчета соответствующих характеристик замедляющей системы и ЛБВ в целом (дисперсионных кривых, частотных зависимостей сопротивления связи и потерь, зависимостей выходной мощности, коэффициента усиления и КПД в рабочей полосе частот, траекторный анализ движения электронного потока в пространстве взаимодействия в динамическом режиме). В ОКР «Разработка ЛБВ импульсного действия в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью 40Вт и полосой рабочих частот не менее 1 ГГц», предназначенной для применения в перспективных высокоскоростные радиотехнических системах, включая системы СВЯЗИ И радиолокационные системы высокого разрешения, шифр «ЛБВ-3», Приказ №3546 от 05.12.2016 по представленным эскизам была изготовлена и испытана замедляющая система, результаты измерений которой хорошо соответствуют расчету;

2. проектирования многолучевой низковольтной широкополосной замедляющей системы типа «скрещенная лестница» и расчета соответствующих характеристик замедляющей системы и ЛБВ в целом (дисперсионных кривых, частотных зависимостей сопротивления связи, зависимостей выходной мощности, коэффициента усиления и КПД в рабочей полосе частот, траекторный анализ движения электронных потоков в пространстве взаимодействия в динамическом режиме), использованных при разработке ОКР «Разработка мощной многолучевой односекционной ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн», предназначенной для работы в усилительных цепочках передатчиков бортовой аппаратуры, шифр «Вакуум-24», Приказ №488 от 07.06.2013г.

Начальник НПК-2

ВОСТРОВ М.С. А.Н. Юнаков Alle

Начальник Отделения 10

А.В. Галдецкий



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454 тел.: (499) 215 65 65 доб. 1140, факс: (495) 434 92 87 e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru

20.07.2021 Nº 0401 2021

СПРАВКА

Дана Богомоловой Евгении Александровне в том, что она работает в должности старшего преподавателя базовой кафедры № 143 – конструирования СВЧ и цифровых радиоэлектронных средств в филиале РТУ МИРЭА в г. Фрязино с 21.09.2019 г. по настоящее время.

При проведении учебных занятий по курсам дисциплин «Системы автоматизированного проектирования в электронике» и «Вакуумная и плазменная электроника» для студентов, обучающихся по специальностям: 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, Богомоловой E.A. использованы результаты, включенные в её диссертацию на соискание ученой степени к.т.н. «Замедляющие системы с улучшенными электродинамическими параметрами и теплорассеивающей способностью для низковольтных ЛБВ миллиметрового диапазона» в качестве программного модуля для расчета дисперсионной характеристики и сопротивления связи замедляющих систем в программе моделирования высокочастотных электромагнитных полей (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619311 от 08.06.2021 г.).

Справка выдана для предоставления по месту требования.

Директор филиала РТУ МИРЭА в г. Фрязино



Л.А. Макарова