

На правах рукописи



Богомолова Евгения Александровна

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

2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Фрязино – 2021

Работа выполнена в АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Научный руководитель: **Галдецкий Анатолий Васильевич**, кандидат физико-математических наук, начальник теоретического отдела АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Официальные оппоненты: **Рыскин Никита Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, главный научный сотрудник

**Мануилов Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», профессор кафедры квантовой радиофизики и электроники

Ведущая организация: АО НПП «Торий», г. Москва

Защита диссертации состоится 9 декабря 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника по адресу: 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2А.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке АО «НПП «Исток» им. Шокина» и на сайте <https://istokmw.ru/avtoreferati-dissertaciy/>

Автореферат разослан «15» октября 2021 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Куликова И.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

За последние годы во многих странах наблюдается значительный интерес к развитию электроники в миллиметровом диапазоне длин волн. Освоение этого диапазона открывает широкие перспективы для военных и гражданских систем радиолокации и связи, высокоточного оружия, систем радиовидения.

В частности, в настоящее время активно развиваются новые телекоммуникационные системы стандарта – 5G, для базовых станций которых требуются СВЧ-усилители миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью не менее 40 Вт при ускоряющем напряжении не более 20 кВ. Телекоммуникации 5-го поколения – это стратегически важная для государства группа технологий.

Другое перспективное направление использования радиоволн миллиметрового диапазона – РЛС с высоким уровнем углового разрешения в условиях ограниченных габаритов антенного устройства, решающая проблему обнаружения и распознавания малоразмерных целей, наблюдающуюся у РЛС X-диапазона. При этом увеличение дальности обнаружения целей достигается за счет увеличения выходной мощности СВЧ-усилителя. Это, в частности, позволит эффективно бороться с БПЛА, включая групповые цели (рой БПЛА).

В мм-диапазоне твердотельные приборы уступают электровакуумным (ЭВП) по уровню выходной мощности, усилению и КПД, по стоимости «единицы» мощности и обеспечению теплового режима для надежной работы прибора.

В исследуемом частотном диапазоне широкое применение получили лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны. Для всех вакуумных приборов О-типа мм-диапазона существует общая проблема, связанная с уменьшением поперечных размеров с ростом частоты. Это приводит к ухудшению условий теплоотвода от конструктивных элементов. Кроме того, возрастают

требования к точности изготовления и сборки, что приводит к усложнению и удорожанию технологии.

По этим причинам во всех развитых странах идет поиск новых замедляющих систем (ЗС), 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.

С целью обеспечения эффективного электронно-волнового взаимодействия в широкой полосе частот мм-диапазона ЗС должны иметь незначительную крутизну дисперсионной характеристики и увеличенное сопротивление связи для компенсации значительных омических потерь. Одним из возможных подходов при решении данной задачи являются модификации известных конструкций ЗС, позволяющие улучшить электродинамические характеристики (ЭДХ), а также использование новых материалов и технологий.

Для исследования особенностей распространения электромагнитных волн (ЭМВ) в модифицированных конструкциях ЗС мм-диапазона, а также разработки ЛБВ с качественно новыми параметрами, требуется иметь возможность достаточно точно рассчитывать ЭДХ высокоэффективных ЗС. Данную задачу можно решить путем разработки высокоточного и в тоже время высокопроизводительного программного обеспечения для расчета ЭДХ ЗС и последующей оптимизации.

Разработке прецизионных технологий изготовления мелкоструктурных ЗС мм-диапазона посвящено большое число зарубежных работ. К сожалению, отечественные технологии сильно отстают и нуждаются в улучшении точностных характеристик и качества поверхностей. Кроме того, из-за мелкой структуры ЗС конструкции и технологии изготовления и сборки, хорошо себя зарекомендовавшие в ЛБВ сантиметрового диапазона, оказываются непригодными для мм- и субмиллиметровых ЛБВ.

Как правило, в миллиметровых ЛБВ из-за уменьшения поперечных размеров приходится уменьшать ток электронного пучка и значительно увеличивать ускоряющее напряжение, что затрудняет их использование в бортовой аппаратуре. Одним из путей повышения уровня выходной мощности ЛБВ и уменьшения ускоряющего напряжения является переход к многолучевым ЗС. Создание мощных бортовых ЛБВ с ускоряющим напряжением не более 6 кВ требует новых технических решений, поскольку в этом случае проблемы, обусловленные уменьшением размеров, становятся особенно острыми. Разработке многолучевых ЗС мм-диапазона для бортовых ЛБВ посвящено сравнительно небольшое число работ. При этом основное внимание уделяется ЗС типа «петляющий волновод» в силу ее технологичности несмотря на пониженное сопротивление связи. Таким образом, актуальным остается поиск ЗС для многолучевых ЛБВ с пониженным ускоряющим напряжением.

Сказанное выше позволяет утверждать, что исследование возможности создания низковольтных ЛБВ мм-диапазона с ЗС, имеющими улучшенные ЭДХ и теплорассеивающую способность, и разработка на их основе компонентной базы нового поколения для радиоэлектронной аппаратуры специального назначения и систем двойного назначения с одной стороны, а также формирование методик расчета ЗС с другой, является актуальной проблемой современной СВЧ-электроники, вклад в решение которой важен как с позиции развития теоретических, так и с позиции решения практических задач вакуумной электроники.

**Целью диссертационной работы** является создание эффективных технологичных ЗС для низковольтных мощных ЛБВ миллиметрового диапазона, разработка методики их расчета, теоретическое и экспериментальное исследование этих систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ известных конструкций ЗС, используемых при создании высокоэффективных однолучевых и многолучевых ЛБВ мм-диапазона;
- разработка методики и программного модуля на ее основе по расчету ЭДХ ЗС, сочетающих необходимую точность с небольшими затратами вычислительных ресурсов;
- разработка конструкций ЗС, обладающих улучшенными ЭДХ и высокой технологичностью;
- анализ физических особенностей распространения ЭМВ в предложенных ЗС мм-диапазона длин волн и нахождение оптимальных параметров для расширения рабочей полосы частот и повышения сопротивления связи;
- теоретическое и экспериментальное исследование ЭДХ и теплового режима предложенных конструкций ЗС;
- оценка возможности применения предложенных ЗС в мощных низковольтных ЛБВ мм-диапазона и определение уровня достижимых параметров.

#### **Научная новизна исследований:**

- Развита методика и разработан программный модуль анализа ЭДХ ЗС различного типа на базе расчетной модели одного периода ЗС. Показана возможность оперативного расчета характеристик ЗС, в том числе не имеющих плоскостей симметрии, с отклонением по дисперсионной характеристике менее 0.07% и величине сопротивления связи – 3÷10% от экспериментальных данных.
- Предложена и защищена патентом РФ конструкция планарной ЗС типа «меандр», в которой металлический проводник расположен на подвешенной диэлектрической подложке. При этом значительно увеличивается требуемое для взаимодействия с электронным пучком компонента электрического поля и соответственно сопротивление связи. В качестве диэлектрика предложено использовать CVD алмаз, обладающий уникальным сочетанием свойств: достаточно низкой относительной

диэлектрической проницаемостью и высокой теплопроводностью. Проведено исследование влияния ширины и высоты проводников и толщины подложки на ЭДХ системы. Показано, что полоса пропускания расширяется при увеличении высоты проводников, а увеличение ширины проводников не влияет на ширину полосы пропускания ЗС. Выявлено, что уменьшение периода ЗС компенсирует уменьшение коэффициента замедления и величины сопротивления связи, наблюдаемые при увеличении высоты проводников. Показано, что сопротивление связи в полосе прозрачности имеет участки со слабой и сильной дисперсией, причем частота начала резкого спада (излома) кривой сопротивления связи в высокочастотной части определяется отношением толщины проводника к толщине подложки. Установлено, что при соотношении данных толщин не менее 0.2 участок с высоким сопротивлением связи и слабой его дисперсией можно продлить в высокочастотную часть.

- Предложено новое устройство ввода/вывода СВЧ-энергии для планарной ЗС «меандр» с подвешенной подложкой. СВЧ-линия передачи выполнена в виде трансформирующего отрезка нерегулярного волновода, с согласующим проводящим элементом в виде перемычки серповидной формы, соединяющей широкую стенку отрезка прямоугольного волновода и крайний волноведущий элемент ЗС, что обеспечивает КСВН не более 1.7 в полосе 7 ГГц и 1.5 в полосе 5 ГГц.
- Предложена модификация ЗС «типа «петляющий волновод», заключающаяся в введении отрезков волновода в Е-плоскости (индуктивных элементов) и выступов в область зазора взаимодействия, что позволяет увеличить рабочую полосу до 1 ГГц (1.1%) при ускоряющем напряжении 17.5 кВ, а также увеличить на 20% величину сопротивления связи по сравнению с традиционной конструкцией ЗС данного типа.
- Исследовано влияние индуктивных элементов на ЭДХ модифицированной ЗС типа «петляющий волновод». Показано, что коэффициент замедления обратно пропорционален увеличению ширины и высоты индуктивных

элементов, что позволяет повысить эффективность электронно-волнового взаимодействия путем профилирования фазовой скорости волны за счет изменения геометрии индуктивных элементов при неизменном (не уменьшаемом) периоде ЗС, т.е., не снижая теплорассеивающей способности конструкции.

- Предложена новая конструкция локального поглотителя СВЧ-энергии для модифицированной ЗС типа «петляющий волновод», в котором поглощающая керамика выполнена в форме «шпильки» с постоянной толщиной и расположена вблизи оси симметрии ЗС, что позволяет обеспечить механическую прочность конструкции ЗС при сохранении небольшого внешнего диаметра всей системы. Показано, что данная конструкция высокотехнологична и обеспечивает расчетное согласование секции ЗС на уровне -30 дБ в полосе частот 2 ГГц (2.1%).
- Предложена многолучевая ЗС типа «сдвоенная лестница» с плоскими диафрагмами и дополнительными диафрагмами с симметричной проточкой для ЛБВ *Ka*-диапазона. Показано, что диафрагмы, выполненные в виде пластин с сечением 0.5×2.4 мм, улучшают теплорассеивающую способность конструкции, при этом выполненные в них окна связи в виде двух симметрично расположенных щелей, имеющих форму сегмента, а также введение дополнительных диафрагм позволяют увеличить сопротивление связи рабочей пространственной гармоники на 30% в полосе частот 1 ГГц (3%).

#### **Практическая значимость.**

На основе исследования особенностей распространения ЭМВ в ЗС мм-диапазона:

- предложены и подтверждены патентами РФ новые конструкции ЗС, которые обладают улучшенной теплорассеивающей способностью и позволяют повысить эффективность однолучевых и многолучевых ЛБВ;
- впервые проведен анализ ЭДХ планарной ЗС с подвешенной подложкой из CVD алмаза;



- предложена и подтверждена патентом конструкция ЛБВ W-диапазона с рабочей полосой 1 ГГц, повышенным уровнем выходной мощности (более 80 Вт) и КПД (4%) при сохранении периода ЗС постоянным.

Предложенная конструкция многолучевой ЗС типа «сдвоенная лестница» с дополнительными диафрагмами и программный модуль для расчета ее ЭДХ использованы на всех этапах ОКР по созданию ЛБВ Ka-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 O-типа большой мощности в мм-диапазоне.

Разработанный программный модуль по расчету ЭДХ ЗС внедрен в промышленность по производству СВЧ-приборов, а также может использоваться в учебном процессе профильных ВУЗов.

Таким образом, представляется, что в работе решена научная проблема в области разработки ЗС для низковольтных мощных ЛБВ мм-диапазона, обладающих высокими ЭДХ, 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 был проведен расчет ЭДХ ЗС типа ЦСР с помощью предложенного программного модуля и сравнение с экспериментальными данными для резонаторных ЗС различных модификаций, взятых из литературных источников, что подтвердило обоснованность и точность теоретических расчетов.

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

1. 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% бóльшее 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 *Ka*-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% бóльшее 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 *E*-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 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.

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Практическая ценность работы подтверждается использованием ее результатов:

- при выполнении опытно-конструкторской работы (ОКР) «Разработка мощной многолучевой односекционной ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн», предназначенной для работы в усилительных цепочках передатчиков бортовой аппаратуры;
- при выполнении ОКР «Разработка ЛБВ импульсного действия в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью не менее 40 Вт и полосой рабочих частот не менее 1 ГГц», предназначенной для применения в перспективных радиотехнических системах, включая высокоскоростные системы связи и радиолокационные системы высокого разрешения;
- 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;
- при выполнении научно-исследовательской работы «Исследование возможности изготовления замедляющей системы на плате из поликристаллического CVD алмаза для ЛБВ 3-х мм диапазона длин волн с ленточным лучом» с целью создания нового класса ЛБВ мм-диапазона для базовых станций 5G, проводимой в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Все вышеуказанные внедрения подтверждаются соответствующими прилагаемыми Актами.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях, школах и семинарах: научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника» (Фрязино, 2013, 2016, 2018 гг.); Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2018 г.); Всероссийская научно-

техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ (Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017 гг.); Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Фрязино, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.); Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского (Москва, 2015 г.); Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.); Всероссийская объединенная научная конференция «Проблемы СВЧ-Электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ – «Инновационные решения Keysight Technologies» (Москва, 2015 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения – 2016» (Москва, 2015 г.); 18<sup>th</sup> International Vacuum Electronics Conference (London, 2017 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 19 научных трудов (8 статей, 3 патента РФ, 8 докладов на научно-технических конференциях и семинарах). В автореферате приведен только перечень основных работ.

### **Личный вклад соискателя**

Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором. Соискателем разработаны эффективные конструкции ЗС для нового класса 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.

Исследование ЗС типа «сдвоенная лестница» для ЛБВ *Ka*-диапазона с полосой рабочих частот 3% и выходной мощностью более 200 Вт при ускоряющем напряжении 5.5 кВ проводилось совместно с Б.В. Сазоновым и Г.В. Бакуниным, которыми были разработаны образцы и получены

экспериментальные результаты. Исследование ЗС типа «петляющий волновод» для ЛБВ W-диапазона с рабочей полосе частот 1.1% и выходной мощностью более 80 Вт при ускоряющем напряжении не более 17.5 кВ проводилось совместно с Г.В. Бакуниным и Н.М. Коломийцевой, которыми были разработаны макеты усилителя и проведены экспериментальные исследования. Исследование технологии изготовления 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 проводилось совместно с Г.В. Бакуниным, М.П. Духновским и В.А. Смирновым, которыми были разработаны технологический маршрут изготовления макета волноведущей системы и опытные образцы ЗС.

Автор пользуется случаем выразить всем перечисленным выше коллегам свою глубокую благодарность и признательность.

### **Структура и объём 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, 10 таблиц и список литературы из 93 наименований. Приложение содержит 2 страницы.

## **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.

**В первом разделе** на основе литературных данных приведен краткий обзор современных мощных ЛБВ типа «О» мм-диапазона. Отмечены основные результаты отечественных и зарубежных разработок. Основное внимание уделено ЗС, обладающим высокими электродинамическими

характеристиками, механической и теплорассеивающей способностью, а также высокой технологичностью.

Проведенный анализ конструкций ЗС позволил сделать следующие выводы:

1. Спиральные ЗС имеют существенные ограничения по уровню выходной мощности при продвижении в миллиметровый диапазон, связанные с понижением тока пучка и обеспечением высокого токопрохождения в узком пролетном канале. Классическая технология изготовления данной ЗС не обеспечивает требуемые точностные параметры в мм-диапазоне.

2. Классические ЗС типа ЦСР обладают низким сопротивлением связи в  $W$ -диапазоне, что ограничивает коэффициент усиления и КПД прибора. Кроме того, при уменьшении длины волны до 3 мм имеются нарастающие трудности при сборке ЗС из отдельных резонаторов и стыковке ЗС с выводами энергии. Однако нужно отметить, что эти проблемы несколько ослабляются при повышении ускоряющего напряжения, и в  $Ka$ -диапазоне успешно изготавливаются ЛБВ на ЦСР отечественного производства с выходной импульсной мощностью 6 кВт при ускоряющем напряжении более 30 кВ.

3. В мм-диапазоне ЗС типа «петляющий волновод» перспективны и отличаются повышенной технологичностью, прецизионностью и низкой стоимостью при изготовлении, что позволяет организовать экономически эффективное серийное производство ЛБВ для гражданского применения.

Перечисленные выводы и определили задачи диссертации.

**Во втором разделе** развита методика анализа характеристик ЗС с использованием численных моделей, в которых решается 3D задача электродинамики на собственные значения одного периода системы с периодическими граничными условиями. Разработанный программный модуль позволяет осуществить постобработку решения. Результатом расчета являются АЧХ замедления и сопротивления связи.

Благодаря периодичности регулярной ЗС ее свойства определяются геометрией одного периода, что позволяет моделировать только один период

такой ЗС (вместо анализа свойств резонатора, представляющего собой закороченную на концах секцию ЗС). Для вычисления дисперсионной характеристики  $m$ -пространственной гармоники моды с номером  $n$  используется соотношение:

$$n_{nm}(\varphi_{nm}) = \frac{c}{v_{nm}} = \frac{\beta_{nm}}{k} = \frac{[\varphi_n + 2\pi m]c}{D\omega(\varphi_n)} = \frac{\lambda}{\Lambda_{nm}},$$

где  $n_{nm}$  – коэффициент замедления,  $k = \omega/c$ ,  $\beta_{nm} = \omega/v_{nm}$  – фазовые постоянные волны в свободном пространстве и в ЗС на частоте  $\omega$ ;  $D$  – период системы,  $\varphi_{nm}$  – фазовый сдвиг на период,  $m$  – номер пространственной гармоники.

Распределение электрического поля  $\mathbf{E}(x, y, z)$  на резонансной частоте  $\omega$  при фазовом сдвиге  $\varphi_{nm}$  рассчитывается с помощью метода конечных элементов. По распределению поля  $\mathbf{E}(x, y, z)$  на одном периоде ЗС можно определить амплитуду  $m$ -й пространственной гармоники  $e_{mz}$  с помощью преобразования Фурье. В данной методике поток мощности вычисляется непосредственным интегрированием вектора Умова-Пойтинга в отличие от аналогов, где он находится через групповую скорость, определяемую приближенным численным дифференцированием дисперсионной кривой. Сопротивление связи  $m$ -й пространственной гармоники вычисляется из соотношения:

$$R_{nm \text{ св}} = \frac{|e_{mz}|^2}{2\beta_{nm}^2 P_n},$$

где  $P_n = \iint \vec{S}_z dx dy$  – поток мощности, переносимый через любое полное поперечное сечение ЗС;  $\vec{S}_z = \frac{1}{2} \vec{E}_\tau(x, y) \vec{H}_\tau^*(x, y)$  – проекция вектора Умова-Пойтинга на ось «z»;  $\vec{E}_\tau$  и  $\vec{H}_\tau$  – поперечные составляющие электрического и магнитного полей.

Методика применима в том числе для ЗС, не имеющих зеркальных плоскостей симметрии, и не требует больших вычислительных ресурсов благодаря моделированию только одного периода ЗС. Проведены расчеты

ЭДХ тестовых ЗС, полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по данному классу ЗС (рис.1).

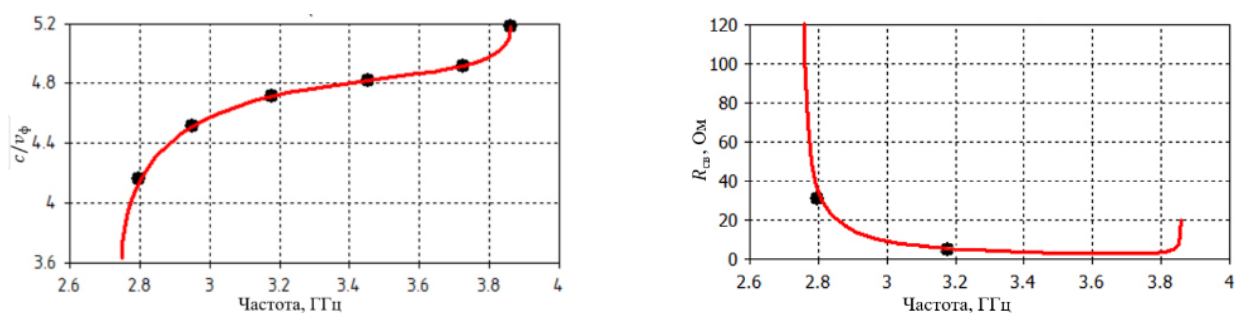


Рис. 1. Расчетные (—) и экспериментальные (●) ЭДХ тестового макета ЗС типа ЦСР

Анализ ЭДХ ЗС по предложенной методике позволяет получить информацию, необходимую для расчета выходных параметров ЛБВ, причем расчетные данные близки к экспериментальным не только качественно, но и количественно (рис.1).

**В третьей главе** рассмотрена модифицированная ЗС типа «двойная лестница» (рис.2) для мощной низковольтной многолучевой ЛБВ длинноволновой части мм-диапазона и представлены результаты численного моделирования ее ЭДХ на основе методики расчета, развитой во второй главе. Проанализированы зависимости ее характеристик от геометрических параметров.

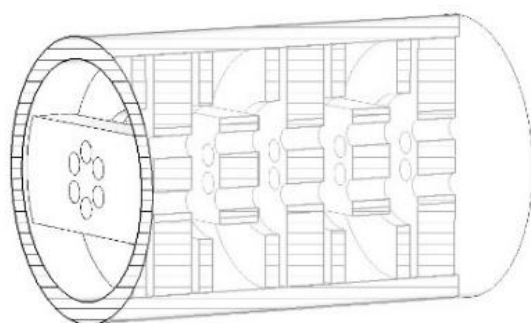


Рис.2. Модифицированная ЗС типа «двойная лестница»

Предлагаемая многолучевая безвтулочная ЗС выполнена в виде разделенного кольцами набора диафрагм, в которых имеется по две щели связи в форме сегмента, и дополнительных диафрагм с проточкой, выполняющих функцию концентрации электрического поля в области рабочего зазора

Найдена оптимальная геометрия ЗС, допускающая проведение многолучевого электронного потока с большим током, учитывающая имеющиеся технологические возможности изготовления и обеспечивающая

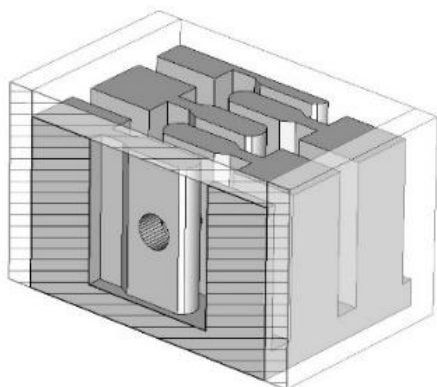


ширину рабочей полосы 2.9% и сопротивление связи 8 Ом на (+1)-ой рабочей пространственной гармонике.

Проведено моделирование многолучевой «прозрачной» ЛБВ диапазона 33÷34 ГГц с 6-ю цилиндрическими пучками с общим током 360 мА и ускоряющим напряжением 6 кВ в каналах диаметром 500 мкм. При длине ЗС 24.6 мм уровень выходной мощности в импульсном режиме составил 270 Вт, коэффициент усиления 16 дБ и КПД 15.5%.

Результаты моделирования выходных параметров ЛБВ хорошо согласуются с экспериментально полученными уровнями выходной мощности более 220 Вт и коэффициента усиления 13.4 дБ в полосе 2.9% при ускоряющем напряжении прибора 5.5 кВ.

**В четвертой главе** представлена модифицированная ЗС типа «петляющий волновод» (рис.3) и результаты численного моделирования ее ЭДХ на основе методики, развитой во второй главе. Проанализированы зависимости характеристик от геометрических параметров данной ЗС. Предлагаемая модификация заключается в добавлении выступов в области зазоров взаимодействия, а также индуктивных элементов (полостей) в виде короткозамкнутых отрезков волновода в Е-плоскости.



*Рис.3. Модифицированная ЗС типа «петляющий волновод»*

Предложена оптимальная геометрия ЗС, учитывающая имеющиеся технологические возможности прецизионного изготовления, обеспечивающая ширину рабочей полосы 1 ГГц и сопротивление связи 20 Ом на (+1)-ой рабочей пространственной гармонике.

Выполнены расчеты ЛБВ диапазона 93÷94 ГГц на основе данной ЗС в режиме большого сигнала с цилиндрическим пучком с током 94 мА в канале диаметром 400 мкм при ускоряющем напряжении 17.5 кВ. Расчетный уровень выходной мощности в импульсном режиме составил более 80 Вт,

коэффициент усиления 42 дБ и КПД 4%. Впервые продемонстрирована возможность управления фазовой скоростью гармоник поля через выбор параметров индуктивных элементов.

Предложен вариант компоновки модифицированной ЗС с интегрированным устройством ввода/вывода СВЧ-энергии, обеспечивающий КСВН не более 1.07 в полосе 1 ГГц. Такая компоновка позволяет исключить весьма критическую операцию пайки выходного волновода и ЗС, которая приводит к значительному браку из-за неточностей сборки и затекания припоя.

На тестовом макете для контроля транспортировки пучка достигнуто токопрохождение более 90%. Технология изготовления обеспечивает высокую точность шага ЗС ( $\pm 5$  мкм), поэтому, следует ожидать, что на тестовом макете будет достигнут уровень выходной мощности сопоставимый с расчетным.

**В пятой главе** представлены новая планарная ЗС типа «меандр» с подвешенной подложкой (рис.4), выполненной из CVD алмаза, и результаты численного моделирования дисперсионной характеристики и сопротивления связи, полученные с помощью методики, развитой во второй главе. Рассмотрены зависимости характеристик от геометрических параметров системы.

Предложена оптимальная геометрия ЗС, учитывающая технологические возможности изготовления на предприятии, обеспечивающая ширину рабочей

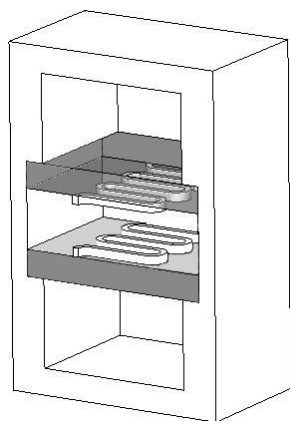


Рис.4. Модифицированная ЗС типа «меандр»

полосы 3 ГГц и сопротивление связи 17 Ом на (0)-ой рабочей пространственной гармонике.

Представлены результаты моделирования ЛБВ диапазона 92÷95 ГГц с данной ЗС и ленточным пучком с током 43 мА и ускоряющим напряжением 15.6 кВ.

Показано, что при длине ЗС 24.7 мм выходная мощность достигает более 35 Вт и усиление 16 дБ в

рабочей полосе 5 ГГц. Максимальное значение электронного КПД достигает 7%.

Предложено устройство ввода/вывода СВЧ-энергии планарной ЗС, обеспечивающее 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.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе с единых позиций последовательно изучены особенности распространения ЭМВ в ЗС мм-диапазона и электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с выходной мощностью 35÷110 Вт и ускоряющим напряжением 5.5÷18 кВ. Можно выделить следующие основные результаты:

- Развита методика анализа и на ее основе разработана программа 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.
- Предложен ряд новых конструкций ЗС и выработаны практические рекомендации по выбору их конкретных конструктивных параметров, которые обеспечивают эффективное взаимодействие потока с полями ЗС в ЛБВ мм-диапазона длин волн с увеличенной выходной мощностью и расширенной рабочей полосой усиления, а также обладают высокими технологичностью и теплорассеивающей способностью: планарная ЗС типа «меандр» с реализацией подвешенной подложки из CVD алмаза,

модифицированная ЗС типа «петляющий волновод» и модифицированная многолучевая ЗС типа «сдвоенная лестница».

- Показано, что использование подвешенной подложки позволяет получить широкополосную систему и обеспечить высокое сопротивление связи в области взаимодействия. Полоса прозрачности ЗС типа «меандр» при коэффициенте замедления (0)-й пространственной гармоники замедляющей системы, равном  $2.8 \div 6$ , может достигать 156%, а сопротивление связи  $26 \div 1.5$  Ом. Данную ЗС целесообразно использовать при коэффициентах замедления ЭМВ, равных  $4 \div 4.28$ . При этом рабочая полоса достигает 5%, а сопротивление связи –  $21.3 \div 17.8$  Ом. Изготовленные образцы макетов такой ЗС показали возможность ее реализации при условии дальнейшей отработки технологии.
- Проведен численный анализ АЧХ взаимодействия в односекционной «прозрачной» ЛБВ с предложенной ЗС типа «меандр». Показано, что в ЛБВ 3-мм диапазона длин волн с планарной ЗС типа «меандр» выходная мощность достигает более 35 Вт и усиление 16 дБ в рабочей полосе 5 ГГц при напряжении питания не более 15.6 кВ. Максимальное значение электронного КПД достигает 7%.
- Численно проанализирован вариант двухсекционной ЛБВ 3-мм диапазона с модифицированной ЗС типа «петляющий волновод». В результате оптимизации подобраны параметры первой и второй секций ЛБВ, обеспечивающие выходную мощность более 80 Вт, усиление 42 дБ в полосе рабочих частот 1 ГГц при напряжении питания 17.5 кВ, что намного превышает параметры ранее разработанных отечественных ЛБВ и соответствует уровню лучших мировых образцов. В настоящее время данная ЛБВ находится в процессе изготовления.
- Проведен численный анализ взаимодействия в мощной односекционной «прозрачной» многолучевой ЛБВ 8-мм диапазона длин волн с ЗС типа «сдвоенная лестница» с дополнительными диафрагмами. Экспериментально показано, что при напряжении питания 5.5 кВ

достигнута выходная мощность 220 Вт в полосе частот 1 ГГц при усилении 13.4 дБ. Электронный КПД составляет 15.5%. В настоящее время данная ЛБВ подготовлена к выпуску в серийное производство.

- Основные результаты диссертационной работы применяются в настоящее время для разработки опытных образцов ЛБВ с оптимальными (по мощности, усилению и КПД) выходными параметрами, предназначенных для использования в качестве усилителей передатчиков РЛС мм-диапазона длин волн нового поколения.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. A.V. Galdetskiy, E.A. Rakova New Slow Wave Structure for W-band TWT 18th International Vacuum Electronics Conference 24-26 April 2017, London, UK IEEE INSPEC Accession Number 17578432 ISBN 978-1-5090-5915-7, pp.1-2 DOI:10.1109/IVEC.2017.8289680
2. 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), MATERIALS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE, pp.146-148 September 24-25, 2020, Saratov, Russia IEEE Part Number CFP20521-CDR ISBN 978-1-7281-4308-8 DOI:10.1109/APEDE48864.2020.9255530
3. Е.А. Ракова, А.В. Галдецкий ЛБВ W-диапазона с планарной замедляющей системой на алмазном теплоотводе// 25th International Crimean Conference 'Microwave & Telecommunication Technology', Conference Proceedings in two volumes September 6-12, 2015, Sevastopol, Crimea, Russia, volume 1, page 176 IEEE Catalog Number CFP15788-CDR ISBN 978-1-4673-9413-0
4. Г.В. Бакунин, А.В. Галдецкий, Е.А. Ракова и др. Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона// Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 1(524) – 2015, стр. 54-67.
5. А.В. Галдецкий, Е.А. Ракова и др. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона// Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 3(530) – 2016, стр. 8-14.

6. Е.А. Ракова Проектирование ЛБВ W-диапазона с замедляющей системой на алмазном теплоотводе// Научно-технический сборник «Успехи современной радиоэлектроники» № 2' 2016, стр. 51. – ISBN 2070-0784
7. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова и др. Мощная ЛБВ миллиметрового диапазона с прецизионной технологией изготовления согласующих элементов конструкции// Радиотехника. – М: ЗАО «Издательство Радиотехника», 2019. – Том 83. № 7(10). – С 73-82. – ISSN 0033-8486.
8. А.В. Галдецкий, М.П. Духновский, Е.А. Богомолова и др. Замедляющая система на алмазном основании для ЛБВ миллиметрового диапазона и технология ее изготовления// Радиотехника. – М: ЗАО «Издательство Радиотехника», 2019. – Том 83. № 7(10). – С 82-89. – ISSN 0033-8486.
9. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова, Г.В. Рувинский, И.Г. Солдатенко ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологии изготовления// Научно-технический сборник «Электронная техника» Серия 1 «СВЧ-техника», Выпуск 3(546) – 2020, стр. 66-83 ISSN 1990-9012
10. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова Замедляющая система планарного типа. Патент РФ №2653573 приоритет от 06.03.2017г.
11. Е.А. Ракова, А.В. Галдецкий Многолучевая «прозрачная» ЛБВ миллиметрового диапазона//Сборник статей Четвертой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 1-4 июня 2015г., г. Санкт-Петербург, том 1, стр. 102-107, ISBN 978-5-7629-1634-9
12. Е.А. Ракова, А.В. Галдецкий ЛБВ W-диапазона с ленточным пучком и планарной замедляющей системой// II Всероссийская объединенная научная конференция «Проблемы СВЧ-Электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ – «Инновационные решения» Keysight Technologies, 26-28 октября 2015г., г. Москва, ISBN: 978-5-903650-31-6
13. А.В. Галдецкий, Е.А. Ракова и др. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона// Сборник статей V Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 30 мая – 2 июня 2016г., г. Санкт-Петербург, том 1, стр. 148-153 ISBN: 978-5-7629-1773-5
14. А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова и др. ЛБВ с выходной мощностью 30Вт в диапазоне 92-97 ГГц с замедляющей системой из CVD алмаза// Материалы XIX координационного научно-технического семинара по СВЧ технике 5-7 сентября 2017г., г. Нижний Новгород, стр.30-33, ISSN 1816-434X
15. Е.А. Богомолова, А.В. Галдецкий и др. ЛБВ W-диапазона с непрерывной мощностью 80Вт//27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и

- телекоммуникационные технологии» 10-16 сентября 2017г., г. Севастополь, Крым, Россия, том 1, стр. 215-221, ISBN 978-966-335-433-0, 978-966-335-434-7
- 16.** Е.А. Богомолова, А.В. Галдецкий и др. Широкополосная замедляющая система W-диапазона на основе алмаза//27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 10-16 сентября 2017г., г. Севастополь, Крым, Россия, том 1, стр. 222-228, ISBN 978-966-335-433-0, 978-966-335-434-7
- 17.** Е.А. Богомолова, А.В. Галдецкий Исследование и оптимизация замедляющих систем для W-диапазона//28-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 9-15 сентября 2018г., г. Севастополь, Крым, Россия, том 1, стр. 162-167, ISBN 978-966-335-444-6
- 18.** Акт приемки ОКР «Разработка мощной многолучевой односекционной ЛБВ миллиметрового диапазона длин волн», шифр «Вакуум-24» от 24.11.2014г.
- 19.** А.В. Галдецкий, Е.А. Богомолова, Н.М. Коломийцева Лампа бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн. Заявка на изобретение № 2021119150 от 29.06.2021.
- 20.** 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.

