

На правах рукописи



ТОРГАШОВ РОМАН АНТОНОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МИНИАТЮРНЫХ ПРИБОРАХ О-ТИПА
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ПРОСТРАНСТВЕННО-
РАЗВИТЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ
И ЛЕНТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ

1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2024

Работа выполнена в Саратовском филиале ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» и в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель: **Рыскин Никита Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Царёв Владислав Алексеевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Федотов Алексей Эдуардович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории коротковолновых СВЧ-генераторов отдела высокочастотной релятивистской электроники ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Ведущая организация: АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Защита состоится 25 октября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, X корпус, 511 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/osobnosti-processov-rasprostraneniya-elektromagnitnykh>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.392.01, д.ф.-м.н., профессор



Сысоев И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Разработка миниатюрных источников электромагнитного излучения, работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона, которую также называют субтерагерцевым (суб-ТГц) частотным диапазоном, является одной из важных задач современной радиофизики. Подобные приборы представляют интерес для радиоастрономии, радиолокации, для ряда биомедицинских приложений и т.д.¹ Особое значение имеет их применение в современных системах высокоскоростной беспроводной передачи данных поколений 5G и 6G². Однако для указанных приложений необходимо когерентное электромагнитное излучение мощностью порядка нескольких десятков ватт и выше. Приборы твердотельной и квантовой электроники не в состоянии обеспечить необходимый уровень выходной мощности. Существуют мощные вакуумные приборы работающие, как в миллиметровом диапазоне, так и в более высокочастотных, например, гиротроны и лазеры на свободных электронах³. Но эти приборы оказываются весьма громоздкими и дорогостоящими. Поэтому в последние годы значительно вырос интерес к разработке миниатюрных миллиметровых приборов О-типа. Из них наибольший интерес представляет лампа бегущей волны (ЛБВ)⁴, способная обеспечить широкую полосу усиливаемых частот и высокую выходную мощность в непрерывном режиме при работе в миллиметровом диапазоне. Также интерес представляют миниатюрные лампы обратной волны (ЛОВ), способные обеспечить генерацию с электронной перестройкой частоты в широком диапазоне. Однако с ростом рабочих частот характерные размеры приборов пропорционально сокращаются, что затрудняет их разработку и изготовление.

Ключевым элементом ЛОВ и ЛБВ является замедляющая система (ЗС), в которой происходит взаимодействие электронного пучка (ЭП) с замедленной электромагнитной волной. В миллиметровом диапазоне использование наиболее распространенных спиральных ЗС весьма затруднительно с технологической точки зрения. Предлагались различные конструкции ЗС для миниатюрных ЛБВ миллиметрового диапазона, например, петляющий волновод, ЗС типа гребенки, цепочка связанных резонаторов, лестничные ЗС и т.д. В частности, большой интерес для применения в суб-ТГц диапазоне вызвали различные варианты микрополосковых ЗС. Подобные ЗС могут обеспечить низкие рабочие

¹ Advances in Terahertz Source Technologies // ed. by Park G.-S., Tani M., Rieh J.-S., Park S. Y. Singapore: Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd, 2024, 773 p.

² THz Communications: Paving the Way towards Wireless Tbps. Ed. by Kürner Th., Mittleman D.M., Nagatsuma T. Springer, 2022.

³ Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers // J. Infrared Millim. Terahertz Waves – 2020. – Vol. 41. – P. 1–140.

⁴ Paoloni C., Gamzina D., Letizia R. et al. Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st century // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2021. – Vol. 35. – No. 5. – P. 567-603.

напряжения⁵, а также могут быть изготовлены с помощью ряда современных технологий⁶.

Одной из проблем, возникающих при проектировании и разработке миниатюрных приборов миллиметрового диапазона, является создание электронно-оптических систем для формирования и транспортировки ЭП с высокой плотностью тока. В приборах О-типа традиционно используются цилиндрические ЭП. Однако при продвижении в миллиметровый диапазон в силу сокращения поперечных размеров электродинамических структур размеры такого пучка также сокращаются. Соответственно, плотность тока пучка оказывается крайне высокой, что затрудняет его фокусировку и транспортировку вдоль пространства взаимодействия. Решением данной проблемы является использование ЭП с большим поперечным сечением, например, ленточных или эллиптических. Такие ЭП могут характеризоваться высокими значениями тока пучка и как следствие высокой мощностью. Плотность тока при этом будет достижимой для современных электронных пушек и электронно-оптических систем. Поэтому перспективным направлением является разработка приборов с пространственно-развитыми электродинамическими структурами, в которых взаимодействие происходит с ленточным ЭП.

Также для повышения мощности представляет интерес использование многолучевых ленточных ЭП. Соответственно, для обеспечения взаимодействия с такими ЭП необходима разработка новых конструкций ЗС, в которых взаимодействие возможно одновременно с несколькими пучками. В последние годы интерес к разработке многолучевых ЛБВ суб-ТГц диапазона заметно вырос.

Таким образом, тема диссертационной работы является **актуальной** для современной радиофизики и микроволновой электроники.

Целями диссертационной работы являются:

1. Разработка новых пространственно-развитых ЗС для миниатюрных приборов О-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона, в которых взаимодействие происходит с ленточными одно- и многолучевыми ЭП при напряжениях не более 20 кВ. Исследование их электродинамических характеристик и оптимизация параметров.

2. Разработка конструкций широкополосных согласующих устройств ввода/вывода СВЧ-энергии, обеспечивающих необходимый уровень согласования, для исследуемых ЗС.

3. Исследование процессов электронно-волнового взаимодействия в усилителях и генераторах миллиметрового диапазона с одно и многолучевыми ленточными ЭП. Расчет их выходных характеристик в линейном и

⁵ Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф. и др. Планарные замедляющие системы миниатюрных электровакуумных СВЧ приборов // Радиотехника и электроника – 1994 – Т. 39 – №. 12 – С. 2049-2058.

⁶ Стародубов А.В., Ножкин Д.А., Расулов И.И. и др. Технологии формирования электродинамических структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и терагерцевого диапазонов (обзор) // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67. – С. 935-945.

нелинейном режимах работы. Выяснение возможности повышения выходной мощности до уровня порядка 100 Вт и выше.

Методы исследования. В работе используются хорошо известные методы теоретического анализа микроволновой электродинамики и электроники. Для численного расчета электродинамических характеристик ЗС используются современные программные пакеты, которые на сегодняшний день получили наиболее широкое распространение (COMSOL Multiphysics, CST Studio Suite) Указанные программные пакеты осуществляют так называемое «полностью электромагнитное» моделирование, основанное на непосредственном численном решении уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями с помощью метода конечных элементов в частотной области или метода конечных разностей во временной области. Для моделирования процессов взаимодействия электронных пучков с высокочастотными полями ЗС используется пакет CST Studio Suite, в котором движение заряженных частиц рассчитывается при помощи метода «частица в ячейке» (“Particle in Cell”, PIC) во временной области.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных и хорошо зарекомендовавших себя теоретических подходов, моделей и методов исследования процессов распространения электромагнитных волн и их взаимодействия с электронными потоками в приборах вакуумной микроволновой электроники. Результаты расчета, полученные в различных программных пакетах, хорошо согласуются между собой. Численные результаты также верифицированы с помощью сопоставления с результатами экспериментального исследования электродинамических характеристик ЗС на диэлектрической подложке. Результаты моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия с помощью различных численных моделей также согласуются между собой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен комплекс исследований электродинамических характеристик тонкопленочных ЗС на диэлектрических подложках (меандр, встречные штыри, кольцо-перемычка) средней и коротковолновой части миллиметрового диапазона. Впервые с помощью современных программных пакетов 3D моделирования подробно исследовано влияние различных параметров на их дисперсионные характеристики, сопротивление связи, затухание.

2. Впервые представлены результаты сравнительного моделирования омических потерь в тонкопленочных структурах на диэлектрических подложках, полученные с помощью различных методик в программных пакетах, которые на сегодняшний день получили наиболее широкое распространение (COMSOL Multiphysics, ANSYS HFSS, CST Studio Suite). На основании полученных результатов, а также сопоставления с экспериментальными данными показано, что при толщине полоска менее 10 мкм начинают сказываться различия, в частности, моделирование во временной области занижает уровень омических потерь.

3. Впервые на основе 3D PIC моделирования исследованы особенности взаимодействия ленточных ЭП с полями планарных микрополосковых ЗС в низковольтных ЛБВ и ЛОВ V-диапазона. Рассчитаны выходные характеристики приборов такие как коэффициент усиления, выходная мощность, КПД.

4. Предложена новая ЗС в виде двух связанных меандров на диэлектрической подложке, которая обеспечивает взаимодействие с двухлучевым ленточным ЭП. Разработана система согласования, обеспечивающая возбуждение симметричной моды ЗС.

5. Предложена цельнометаллическая конструкция ЗС типа меандр с металлическими опорами W-диапазона, в которой взаимодействие происходит с двухлучевым ленточным пучком с высоким аспектным соотношением. Показано, что использование такой ЗС позволяет увеличить ширину ленточного пучка по сравнению с ЗС на диэлектрических подложках и, соответственно, понизить рабочую плотность тока до ~ 70 А/см², что облегчает формирование и транспортировку ленточного ЭП.

6. Впервые подробно исследованы электродинамические характеристики ЗС типа многоэтажный меандр с различным количеством каналов для многолучевого ЭП. Показана перспективность подобных ЗС для создания многолучевых ЛБВ в средней части миллиметрового диапазона с выходной мощностью в несколько сотен ватт.

Научно-практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для создания новых усилителей и генераторов когерентного излучения миллиметрового диапазона с выходной мощностью порядка десятков и сотен ватт. Подобные приборы могут найти применение в современных системах высокоскоростной беспроводной передачи данных, радиолокации, радиоастрономии, спектроскопии. Результаты диссертации также могут быть использованы при моделировании и разработке различных радиофизических приборов и устройств, в которых используются микрополосковые элементы.

Результаты, представленные в диссертационной работе, использовались при выполнении НИР, поддержанных грантами РФФИ № 16-08-00450 и № 20-57-12001, грантами РНФ № 17-12-01160 и № 22-12-00181, а также в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Микрополосковые планарные замедляющие системы миллиметрового диапазона в виде меандра на диэлектрической подложке обеспечивают высокие значения коэффициента замедления $n \sim 5 \div 10$, сравнительно низкие значения рабочих напряжений $3 \div 9$ кВ и сопротивление связи более 1 Ом. В миниатюрных низковольтных лампах бегущей волны на основе таких замедляющих систем выходная мощность в режиме насыщения составляет 20-25 Вт при взаимодействии с ленточным электронным пучком с напряжением 5 кВ и током 100 мА.

2. Замедляющая система в виде связанных меандров на диэлектрической подложке позволяет обеспечить взаимодействие двухлучевого ленточного электронного пучка с симметричной модой замедленной волны при напряжении не более 10 кВ. За счет увеличения площади поперечного сечения и соответственно мощности пучка в ЛБВ с такой замедляющей системой обеспечивается рост выходной мощности более чем в два раза (до ~ 50 Вт) и сокращение длины пространства взаимодействия на 12.5% по сравнению с однолучевой ЛБВ.

3. Полосковая замедляющая система в виде меандра с металлическими опорами в прямоугольном волноводе обеспечивает взаимодействие с ленточным пучком, состоящим из двух отдельных лучей, расположенных сверху и снизу от меандра. Предложенная конструкция замедляющей системы W-диапазона обеспечивает напряжение синхронизма 10-15 кВ на частотах 95-105 ГГц. По сравнению с замедляющей системой на диэлектрических подложках ширина меандра увеличивается более чем в 3 раза (до $\sim \lambda/2$), что позволяет соответственно увеличить ширину электронного пучка и понизить плотность тока до ~ 70 А/см² при токе отдельного луча 100 мА. Двухсекционная конструкция ЛБВ с такой замедляющей системой обеспечивает высокие значения коэффициента усиления ~ 0.62 дБ/период, а также выходную мощность свыше 100 Вт в W-диапазоне.

4. Распределение продольной компоненты электрического поля основной моды в области пролетных каналов замедляющей системы типа многоэтажный меандр близко к однородному, что позволяет получить высокие значения сопротивления связи (8-12 Ом) при взаимодействии с многолучевым ленточным пучком. В отличие от планарных замедляющих систем, сопротивление связи слабо зависит от частоты в рабочем диапазоне частот. Выходная мощность ЛБВ с четырехлучевым пучком в режиме насыщения достигает 400 Вт. Вместе с тем, с увеличением числа пролетных каналов возникает необходимость подавления высших поперечных мод и усложняется конструкции системы согласования, что ограничивает возможности дальнейшего повышения выходной мощности.

Апробация работы и публикации. По результатам диссертационной работы было сделано 30 докладов на международных и всероссийских научных конференциях: The 45th Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2024), Китай, г. Чэнду, 2024 г., International Vacuum Electronic Conference (IVEC), 2020, 2021 и 2022 гг., UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies, 2021 г., The 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2021 г., 7th ITG International Vacuum Electronics Workshop (IVEW) and 13th International Vacuum Electron Sources Conference (IVeSC), 2020 г., 33rd IEEE International Vacuum Nanoelectronics Conference, 2020 г., Всероссийские научные конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 2019, 2023 гг., Научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина» «СВЧ-электроника-2023», г. Фрязино, 2023 г., Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы

электронного приборостроения» (АПЭП), СГТУ, г. Саратов, 2022 г., Конференция с международным участием «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения» (ТЕРА-2023), г. Москва, 2023 г., Всероссийская микроволновая конференция, ИРЭ РАН, г. Москва, 2020, 2022 гг., и др.

Результаты также докладывались на заседаниях Московской и Саратовской секций Ученого совета ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Доклады на конкурсе молодых ученых им. Ивана В. Анисимкина (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2019 г.), на конкурсе практико-ориентированных НИР для студентов, аспирантов и докторантов Вузов Саратовской области (2021 г.), а также на конкурсе на лучший доклад студентов и аспирантов в рамках конференции АПЭП (2022 г.) были удостоены дипломов I степени.

По материалам диссертации опубликовано 57 работ, из которых 12 статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук или индексируемых в реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 32 работы в материалах международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 13 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично: разработка математических моделей, проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Рыскиным Н.М., а также с к.ф.-м.н. Рожнёвым А.Г. Вклад остальных соавторов в совместных работах отмечается в соответствующих местах по тексту диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, трёх глав, Заключения и Списка литературы. Общий объем диссертации составил 161 страницу, включая 102 рисунка, 9 таблиц. Список литературы состоит из 148 наименований на 20 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, научно-практическая значимость работы, сведения об апробации работы и основных публикациях автора, структуре работы.

Первая глава посвящена миниатюрным низковольтным приборам О-типа миллиметрового диапазона с тонкопленочными микрополосковыми ЗС на диэлектрических подложках и ленточными электронными пучками. В разделе 1.1 представлен краткий обзор результатов исследований таких приборов. Обсуждаются преимущества и недостатки микрополосковых

структур. В разделе 1.2 представлены результаты исследования основных электродинамических характеристики меандровой ЗС для низковольтной ЛБВ V-диапазона (50-70 ГГц). Схема ЗС приведена на рис. 1. Проведена оптимизация конструкции ЗС с целью подавления распространения объемных мод в рабочем диапазоне частот. На рис. 2 приведены электродинамические характеристики ЗС, полученные с использованием пакета COMSOL Multiphysics. На дисперсионной характеристике (рис. 2а) также нанесена линия пучка при напряжении 5 кВ. В рабочем диапазоне напряжение синхронизма составляет 3-8 кВ, а сопротивление связи при взаимодействии с ленточным ЭП принимает значения свыше 5 Ом в рабочем диапазоне 50-70 ГГц.

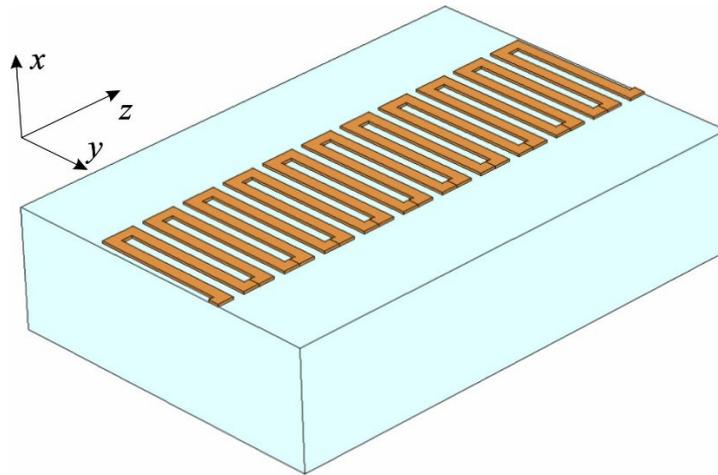


Рис. 1. Конструкция ЗС типа меандр на диэлектрической подложке.

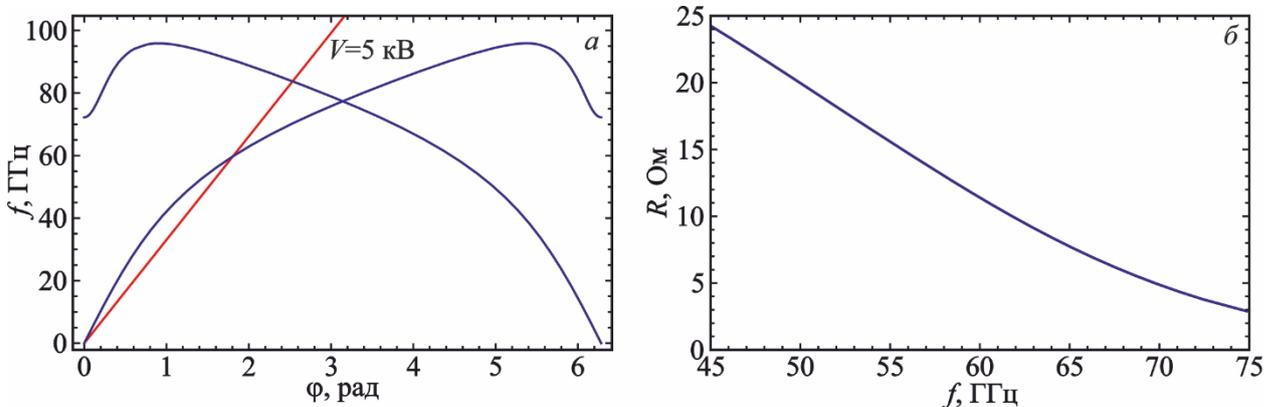


Рис. 2. Электродинамические характеристики ЗС типа меандр на кварцевой подложке V-диапазона: (а) – дисперсионная характеристика, (б) – зависимость сопротивления связи от частоты.

В разделе 1.3 приведены результаты разработки полноразмерной модели ЗС V-диапазона с устройствами ввода/вывода СВЧ-энергии, которые обеспечивают согласование ЗС с прямоугольным волноводом стандартного сечения по уровню $S_{11} \leq -12$ дБ.

Раздел 1.4 посвящен моделированию электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона с планарной меандровой ЗС. При моделировании рассматривается ленточный ЭП с током 100 мА и напряжением 5 кВ. Представлены результаты моделирования как на основе

известных уравнений одномерной нелинейной теории ЛБВ⁷, так и с использованием 3D PIC-моделирования в программном пакете CST Studio Suite. Типичные выходные характеристики ЛБВ представлены на рис. 3. Показано, что коэффициент усиления в режиме малого входного сигнала может превышать 30 дБ, а выходная мощность в режиме насыщения может достигать 23 Вт при входной мощности ~300 мВт.

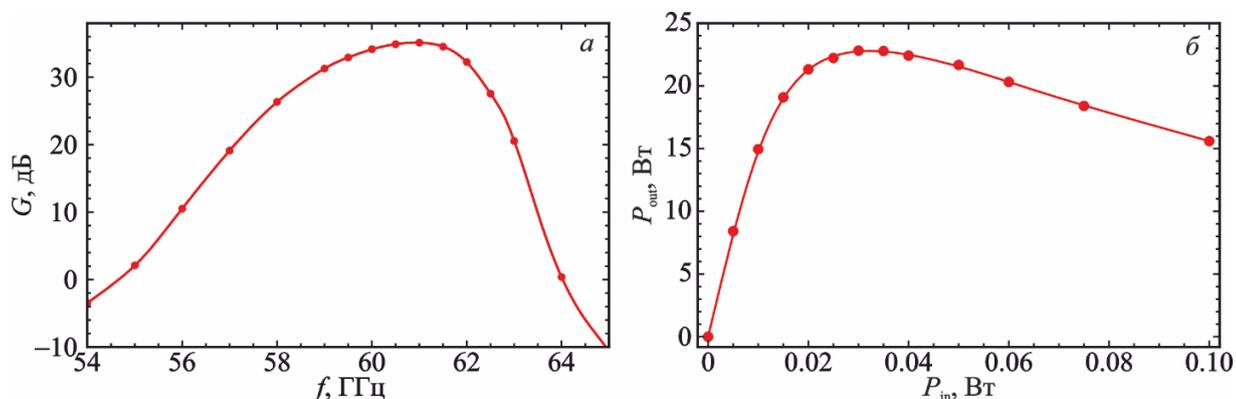


Рис. 3. Выходные характеристики ЛБВ V-диапазона с ЗС типа меандр на кварцевой подложке при токе пучка 100 мА и напряжении 5 кВ: (а) – зависимость коэффициента усиления от частоты, (б) – зависимость выходной мощности от входной на частоте 62 ГГц.

Раздел 1.5 посвящен масштабированию меандровой ЗС на более высокочастотные W- и D-диапазоны. Показано, что при пропорциональном сокращении размеров структуры также обеспечиваются высокие значения коэффициента замедления, напряжение синхронизма составляет 3-10 кВ, а сопротивление связи превышает 2 Ом в рабочем диапазоне частот. Обсуждается возможность достижения значений плотности тока, которые требуются для обеспечения высоких значений коэффициента усиления в ЛБВ с такими ЗС.

В разделе 1.6 приведены результаты сопоставления численных и экспериментальных результатов исследования электродинамических характеристик планарной микрополосковой ЗС типа меандр V-диапазона. Экспериментальные макеты ЗС были изготовлены с помощью технологии на основе магнетронного напыления и лазерной абляции⁸. Разработана конструкция измерительной оснастки для экспериментального исследования электродинамических характеристик меандровой ЗС V-диапазона, обеспечивающая широкополосное согласование во всем рабочем диапазоне частот по уровню $S_{11} \leq -10$ дБ. Проведено сопоставление различных методов моделирования омических потерь в тонкопленочных микрополосковых структурах. Показано, что моделирование с помощью метода конечных

⁷ Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: «Сов. радио» – 1975 – 296 с.

⁸ Ryskin N.M., Torgashov R.A., Starodubov A.V., Rozhnev A.G., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Bessonov D.A., Ulisse G., Krozer V. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2021 – Vol. 39 – No. 1.

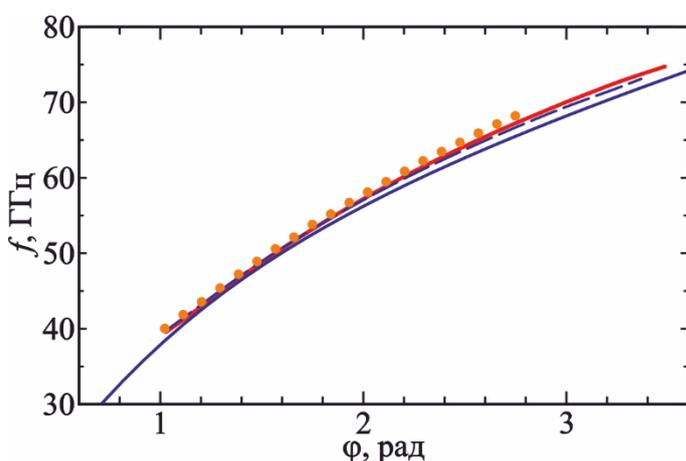


Рис. 4. Дисперсионная характеристика ЗС в области основной прямой гармоники: расчет собственных значений в COMSOL (синяя кривая); моделирование распространения волн в полноразмерной структуре в COMSOL (синяя штриховая кривая), CST (красная кривая); эксперимент (кружки).

элементов в частотной области с использованием программных пакетов COMSOL Multiphysics и ANSYS HFSS дает близкие результаты при одинаковых значениях проводимости, а моделирование во временной области методом конечных разностей в программном пакете CST Studio Suite дает более низкие значения потерь. Результаты расчета дисперсионной характеристики ЗС хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В разделе 1.7 обсуждается возможность создания миниатюрных низковольтных

ЛОВ-генераторов V-диапазона с планарными ЗС на диэлектрических подложках. Рассматриваются ЗС типа встречные штыри и ЗС типа кольцо-перемычка. Такие системы способны обеспечить взаимодействие с ленточным ЭП при напряжениях не более 6 кВ. Сопротивления связи обратной гармоники принимает высокие значения до 20 Ом. Показано, что ЛОВ с такими ЗС при токе пучка не более 100 мА способны обеспечить выходной сигнал с мощностью до 9 Вт в V-диапазоне.

Во **второй** главе представлены результаты разработки планарных меандровых ЗС для двухлучевых ЛБВ миллиметрового диапазона. В разделе 2.1 предложена ЗС в виде двух связанных меандров на диэлектрической подложке V-диапазона (рис. 5а). Исследованы основные электродинамические характеристики ЗС. На рис. 5б приведена дисперсионная характеристика, которая представляет собой две ветви, соответствующие симметричной и антисимметричной моде. Такая ЗС обеспечивает взаимодействие с двухлучевым ЭП, отдельные лучи которого расположены в горизонтальной плоскости, при напряжениях не выше 10 кВ. Взаимодействие с симметричной модой оказывается более выгодным в силу бóльших значений коэффициента замедления и сопротивления связи. Также представлена конструкция системы ввода/вывода СВЧ-энергии, обеспечивающая широкополосное согласование ЗС с подводящей тройной микрополосковой линией.

Проведено моделирование электронно-волнового взаимодействия двухлучевого ленточного ЭП с симметричной модой ЗС. Показано, что такая конструкция обеспечивает рост выходной мощности более чем в два раза (до 50 Вт), чем в случае ЛБВ с ЗС в виде одиночного меандра, при близких

значениях мощности отдельного луча и при несколько меньших значениях длины системы.

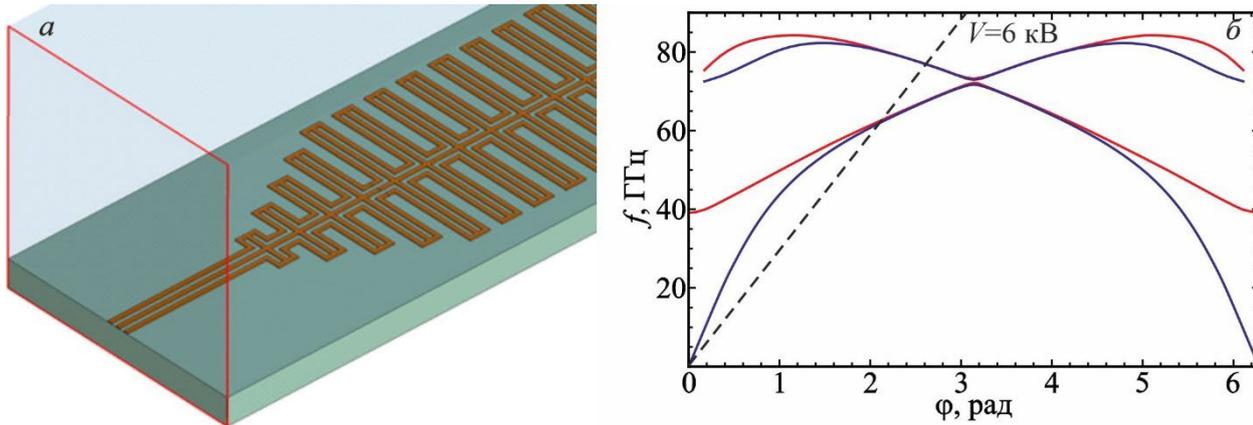


Рис. 5. (а) – конструкции ЗС в виде связанных меандров, (б) – дисперсионная характеристика ЗС в виде связанных меандров V-диапазона.

Раздел 2.2 посвящен исследованию ЗС в виде меандра с металлическими опорами в прямоугольном волноводе (рис. 6а). В такой ЗС возможно взаимодействие с двухлучевым ЭП, отдельные лучи которого расположены над и под полосковым меандром. Проведено моделирование распространения электромагнитных волн в ЗС W-диапазона, в которой обеспечивается синхронизм с ЭП при напряжениях не более 15 кВ на частотах вблизи 100 ГГц. Дисперсионные характеристики ЗС представлены на рис. 6б. Сопротивление связи прямой гармоники принимает высокие значения до 40 Ом. При этом синхронизм возможен также и с обратной гармоникой, для которой сопротивление связи в области синхронизма принимает значения более 1 Ом. Разработана конструкция системы ввода/вывода энергии, обеспечивающая согласование по уровню –10 дБ вблизи частоты 97 ГГц.

Исследованы процессы электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с такой ЗС. Рассматривается взаимодействие с двухлучевым ЭП с полным током 200 мА (т.е. ток отдельного луча 100 мА) и напряжением 14 кВ. Показано, что при значениях длины системы свыше 40 периодов наблюдается самовозбуждение на обратной гармонике. Для подавления паразитных колебаний разработана конструкция ЛБВ, состоящая из двух идентичных секций с разрывом. Типичные выходные характеристики такой ЛБВ представлены на рис. 7. Коэффициент усиления в линейном режиме принимает высокие значения свыше 35 дБ, что соответствует погонному усилению ~ 0.62 дБ/период. Выходная мощность в режиме насыщения может превышать 100 Вт. При этом за счет большой ширины меандра взаимодействие происходит с ЭП с относительно низкими значениями плотности тока, в сравнении с другими рассмотренными в диссертации системами, порядка 70 А/см².

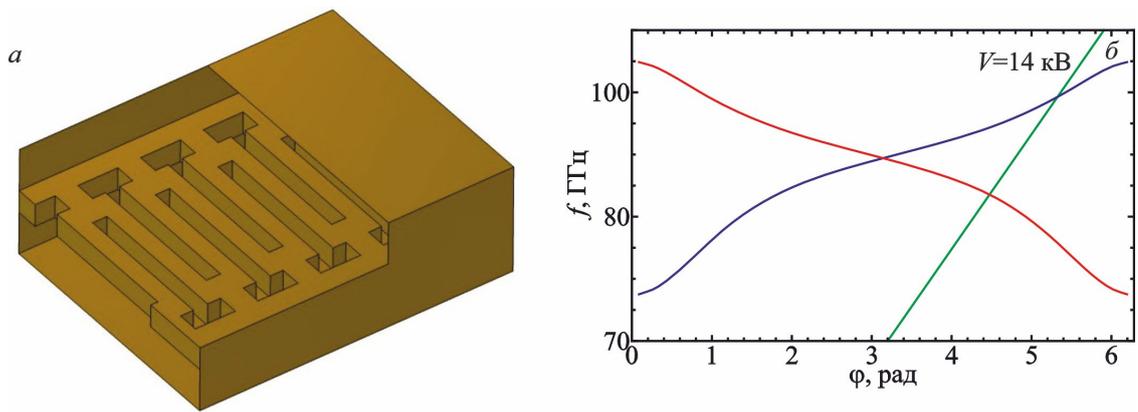


Рис. 6. (а) – конструкции ЗС в виде меандра с металлическими опорами, (б) – дисперсионная характеристика ЗС W-диапазона.

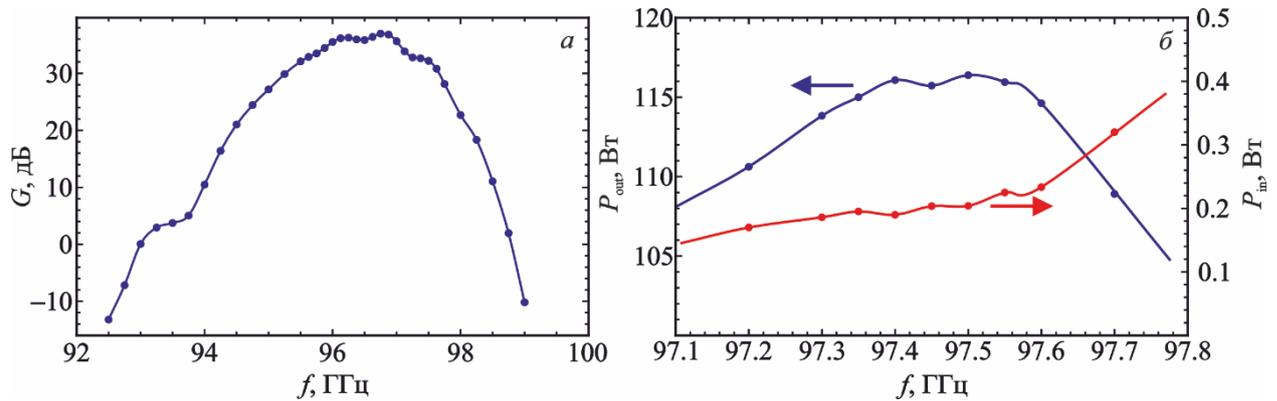


Рис. 7. Выходные характеристики двухлучевой ЛБВ W-диапазона с ЗС в виде меандра с металлическими опорами при токе отдельного луча 100 мА и напряжении 14 кВ: (а) – зависимость коэффициента усиления в линейном режиме работы от частоты, (б) – зависимость выходной и входной мощности в режиме насыщения от частоты.

Третья глава посвящена исследованию многорядных ЗС типа многоэтажный меандр с несколькими каналами для ленточных электронных пучков. Предполагается, что такая конструкция поддерживается с помощью диэлектрических опор в прямоугольном волноводе. Схема многорядной ЗС типа четырехэтажный меандр представлена на рис. 7а.

В разделе 3.1 приведены результаты исследования двухлучевой ЛБВ с ЗС типа двухэтажный меандр. Исследование электродинамических характеристик показывает, что в силу однородного распределения продольной компоненты электрического поля в системе реализуются высокие значения сопротивления связи до 10 Ом. При этом, поскольку поле слабо проникает в область диэлектрика, для обеспечения синхронизма вблизи 60 ГГц необходимы высокие значения напряжения по сравнению с планарными ЗС на диэлектрических подложках. Разработана конструкция системы согласования, обеспечивающая низкий коэффициент отражения. Приведены результаты трехмерного РИС-моделирования процессов электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ с двухлучевым ЭП током 200 мА и напряжением 18 кВ. Показано, что односекционная однородная ЛБВ с такой ЗС способна обеспечить устойчивое усиление в режиме малого входного сигнала с

$G \approx 30$ дБ. В режиме насыщения выходная мощность достигает 250 Вт при входной мощности 1-2 Вт.

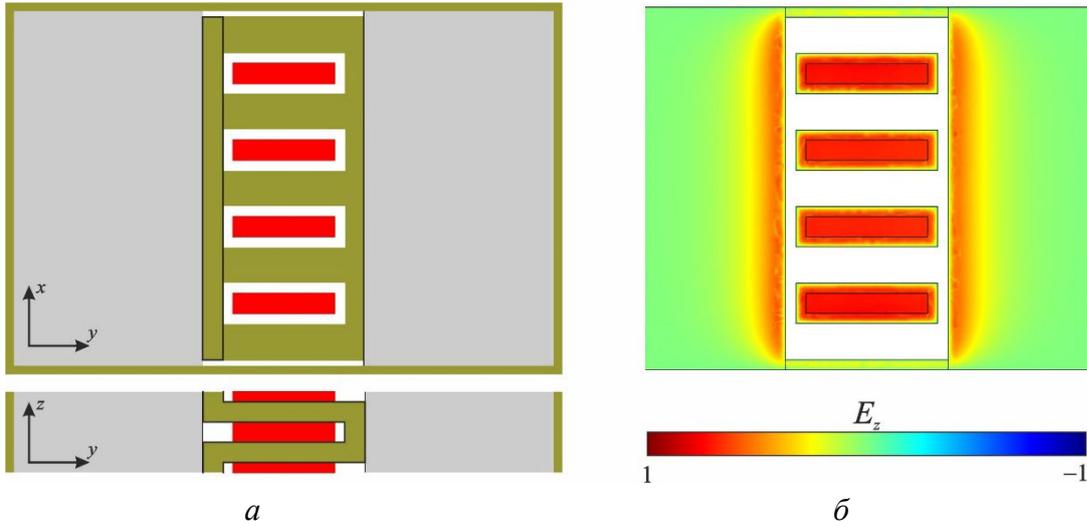


Рис. 8. Конструкция ЗС типа четырехэтажный меандр (а) и распределение продольной компоненты электрического поля первой поперечной моды на частоте 60 ГГц (б).

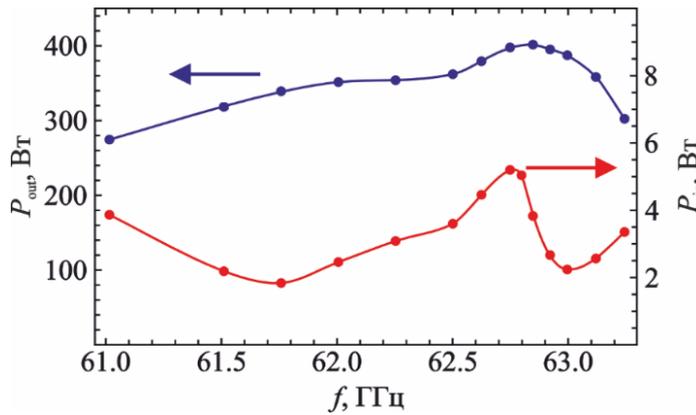


Рис. 9. Зависимость выходной и входной мощности в режиме насыщения для четырехлучевой ЛБВ с ЗС типа многоэтажный меандр при токе отдельного луча 100 мА и напряжении 12 кВ.

Раздел 3.2 посвящен изучению четырехлучевой конструкции ЛБВ с ЗС типа многоэтажный меандр. Показано, что с ростом числа лучей и увеличением высоты меандровой линии в рабочем диапазоне частот могут распространяться различные поперечные моды. При этом для основной моды сохраняется однородное распределение электрического поля (см. рис. 8б), что обеспечивает высокие сопротивления связи до 12 Ом. Размеры ЗС были модифицированы с целью снижения ускоряющего напряжения до 12 кВ. Для достижения согласования по уровню $S_{11} \leq -10$ дБ конструкция согласующих устройств была усложнена в сравнении со случаем двухлучевой ЛБВ.

Представлены результаты РИС-моделирования взаимодействия в четырехлучевой ЛБВ при полном токе пучка 400 мА в линейном и нелинейном режимах работы. Показано, что при длине ЗС свыше 40 периодов происходит

самовозбуждение за счет отражений сигнала от концов системы. Была разработана конструкция ЛБВ, состоящая из трех изолированных секций ЗС с разрывом, которая обеспечивает коэффициент усиления в линейном режиме работы до 26 дБ, а выходную мощность в режиме насыщения – 400 Вт. На рис. 9 представлена зависимость выходной и входной мощности в режиме насыщения в ЛБВ с четырехэтажным меандром. Таким образом мощность в ЛБВ-усилителях с многорядными ЗС и многолучевыми пучками растет пропорционально мощности ЭП. Однако увеличение числа пролетных каналов приводит к конкуренции мод и усложнению конструкции системы ввода/вывода СВЧ-энергии, что может ограничить дальнейший рост выходной мощности таких приборов.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С помощью трехмерного конечно-элементного программного пакета COMSOL Multiphysics исследованы электродинамические характеристики планарных микрополосковых ЗС типа меандр на диэлектрической подложке V (50-70 ГГц), W (75-110 ГГц) и D (110-170 ГГц) диапазонов. Найдены параметры ЗС, при которых обеспечивается высокий коэффициент замедления (5-10) на основной прямой гармонике и, соответственно, напряжение синхронизма в диапазоне 4-8 кВ. При этом сопротивление связи при взаимодействии с высокоаспектным ленточным ЭП принимает значения не менее 2 Ом в рабочем диапазоне частот.

2. Разработана конструкция системы ввода/вывода СВЧ-энергии для экспериментального исследования электродинамических характеристик ЗС V-диапазона, которая обеспечивает широкополосное согласование по уровню –10 дБ во всем рабочем диапазоне частот.

3. Проведено сопоставление различных методов расчета омических потерь в тонкопленочных микрополосковых структурах толщиной ~ 1 мкм. Проведено сравнение с экспериментальными результатами для ЗС V-диапазона на подложках из кварца, изготовленных с использованием технологии лазерной абляции. Сопоставление численных и экспериментальных результатов указывает на то, что эффективная проводимость медной пленки составляет примерно $2-2.5 \times 10^7$ См/м, что соответствует шероховатости поверхности ~200 нм. При таких значениях проводимости наблюдаются высокие значения омических потерь (0.2-0.35 дБ/период). При этом моделирование во временной области в программном пакете CST Studio Suite дает заниженные значения омических потерь по сравнению с моделированием методом конечных элементов в частотной области.

4. Проведено 3D PIC моделирование электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона с меандровой ЗС на диэлектрической

подложке. При токе ленточного ЭП 100 мА (плотность тока ~ 155 А/см²) и напряжении 5 кВ коэффициент усиления может достигать 30 дБ, а выходная мощность в режиме насыщения может превышать 20 Вт при КПД $\sim 4\%$.

5. Исследованы электродинамические характеристики ЗС типа встречные штыри и кольцо-перемычка на кварцевых подложках для миниатюрных низковольтных ЛОВ V-диапазона. Такие конструкции способны обеспечить взаимодействие с ленточным ЭП при напряжениях, не превышающих 6 кВ. Моделирование электронно-волнового взаимодействия показывает, что выходная мощность таких ЛОВ может достигать нескольких ватт в диапазоне частот свыше 60 ГГц при адекватных значениях плотности тока, не превышающих 150 А/см².

6. Предложена новая планарная микрополосковая ЗС в виде связанных меандров на подложке, в которой обеспечивается взаимодействие с двухлучевым ленточным ЭП. В такой ЗС основная мода расщепляется на две: симметричную и антисимметричную, причем симметричная мода имеет несколько большее сопротивление связи и замедление. Разработана система ввода/вывода энергии в виде перехода на тройную микрополосковую линию, обеспечивающая эффективное возбуждение симметричной моды ЗС. Предложенная конструкция обеспечивает согласование по уровню -14 дБ во всем рабочем диапазоне частот.

7. Проведено 3D PIC моделирование электронно-волнового взаимодействия двухлучевого ЭП с симметричной модой ЗС типа связанных меандров в ЛБВ V-диапазона. Показано, что при токе пучка 200 мА (100 мА на один луч) и напряжении 6 кВ коэффициент усиления достигает 30 дБ, а выходная мощность — до 50 Вт. Максимальная выходная мощность повышается более чем в два раза по сравнению с ЛБВ с ЗС типа одиночный меандр на диэлектрической подложке при близких значениях КПД, причем длина пространства сокращается на 12.5%.

8. Предложена планарная ЗС типа полосковый меандр с металлическими опорами, в которой осуществляется взаимодействие с двумя ленточными ЭП, распространяющимися сверху и снизу от меандра. В данной ЗС устраняется опасность оседания электронов на диэлектрическую поверхность, характерная для ЗС на подложках. Разработана конструкция ЛБВ-усилителя W-диапазона, состоящая из двух секций с разрывом для предотвращения самовозбуждения. Напряжение пучка составляет 14 кВ, а полный ток пучка – 200 мА (100 мА на один луч). Средняя плотность тока составляет 69 А/см², что примерно в 2-3 раза ниже, чем для других приборов, рассматриваемых в диссертации, что облегчает формирование и транспортировку ЭП. С помощью 3D PIC моделирования показано, что в двухсекционной ЛБВ коэффициент усиления в линейном режиме составляет до 37 дБ, а выходная мощность в режиме насыщения превышает 100 Вт на частотах около 100 ГГц.

9. Исследованы электродинамические характеристики ЗС типа многоэтажный меандр для многолучевых ЛБВ V-диапазона. Особенностью таких ЗС является более равномерное распределение поля в поперечном

сечении, что обеспечивает сопротивление связи не менее 3 Ом во всем рабочем диапазоне частот и, соответственно, приводит к более эффективному электронно-волновому взаимодействию. Однако в силу того, что поле в ЗС типа многоэтажный меандр слабо проникает в область диэлектрических опор, замедление таких ЗС в целом ниже, чем для микрополосковых ЗС на подложках, и составляет $n \sim 3.5 \div 6$.

10. Проведено 3D PIC моделирование однородной односекционной ЛБВ с ЗС типа двухэтажный меандр и двухлучевым ЭП с суммарным током 200 мА и напряжением 18 кВ. Показано, что в линейном режиме коэффициент усиления достигает 29 дБ, а выходная мощность в режиме насыщения составляет до 250 Вт на частотах вблизи 60 ГГц.

11. Проведен анализ трансформации электродинамических характеристик ЗС типа многоэтажный меандр при увеличении числа пролетных каналов. Показано, что при этом возникает проблема конкуренции мод и происходит усложнение конструкции системы согласования. Разработана система ввода/вывода энергии для ЛБВ с четырехлучевым ЭП, обеспечивающая широкополосное согласование по уровню -10 дБ. Для предотвращения самовозбуждения предложена трехсекционная конструкция ЛБВ. Моделирование электронно-волнового взаимодействия при суммарном токе 400 мА (100 мА на луч) и напряжении 12 кВ показало, что в линейном режиме коэффициент усиления может достигать 26.5 дБ, а выходная мощность в режиме насыщения — 400 Вт при КПД до 8%. Таким образом выходная мощность прибора увеличивается примерно пропорционально мощности пучка.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Benedik A.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I. Planar microstrip slow-wave structure for a low-voltage V-band traveling-wave tube with a sheet electron beam // *IEEE Electron Device Lett.* – 2018. – Vol. 39. – No. 5. – P. 757-760
2. Torgashov G. V., Torgashov R.A., Titov V.N., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Meander-line slow-wave structure for high-power millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beam // *IEEE Electron Device Lett.* –2019 – Vol. 40 – No. 12 – P. 1980-1983.
3. Ryskin N.M., Torgashov R.A., Starodubov A.V., Rozhnev A.G., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Bessonov D.A., Ulisse G., Krozer V. Development of microfabricated planar slow-wave structures on dielectric substrates for miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* – 2021 – Vol. 39 – No. 1.
4. Torgashov R.A., Rozhnev A. G., Ryskin N. M. Design study on a multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power V-band traveling-wave tube // *IEEE Transactions on Electron Devices* – 2022 – Vol. 69 – No. 3 – P. 1396-1401.
5. Торгашов Р.А., Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Исследование миниатюрного низковольтного генератора обратной волны миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика* – 2017 – Т. 25 – № 5 – С. 35–46
6. Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю. Теоретическое и экспериментальное исследование миниатюрной планарной замедляющей системы на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны W-диапазона // *Журнал технической физики* – 2020 – Т. 90 – № 4 – С. 686-692.
7. Торгашов Р.А. Замедляющая система меандрового типа на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // *Письма в Журнал технической физики* – 2020 – Т. 46 – № 23 – С. 25-28.
8. Рыскин Н.М., Торгашов Р.А., Титов В.Н., Навроцкий И.А., Стародубов А.В., Плоских А.Э., Рожнев А.Г. Исследование миниатюрных ламп бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн с многолучевыми ленточными электронными пучками // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* – 2022 – Т. 65 – № 5-6 – С. 494-504.
9. Торгашов Р.А., Стародубов А.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Исследование и разработка ламп бегущей волны с планарными микрополосковыми замедляющими системами на диэлектрических подложках // *Радиотехника и электроника* – 2022 – Т. 67 – № 10 – С. 981-986.
10. Торгашов Р.А., Ножкин Д.А., Стародубов А.В., Рыскин Н.М. Разработка и исследование замедляющей системы для миниатюрной многолучевой лампы бегущей волны W-диапазона // *Радиотехника и электроника* – 2023 – Т. 68 – № 10. – С. 992-997.
11. Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Торгашов Г.В. Исследование планарных замедляющих систем на диэлектрической подложке для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // *Нелинейный мир* – 2019 – Т.17 – №1 – С. 64-66
12. Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г. Новая меандровая замедляющая система для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с двумя электронными пучками // *Нелинейный мир* – 2020 – Т. 18 – № 1 – С. 73-75.
13. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A. Planar V-band slow-wave structures for low-voltage tubes with sheet electron beam // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), London, 2017, pp. 1-2
14. Ryskin N.M., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Sinitsyn N.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V. Study of low-voltage millimeter-wave tubes with planar slow-wave structures on dielectric substrates // 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Liverpool, 2017, pp. 1-2.

15. Ryskin N.M., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Sinitsyn N.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V. Planar slow-wave structures for miniaturized low-voltage Cherenkov devices // 10th International Workshop 2017 "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", EPJ Web Conf., 149 (2017) 04027
16. Benedik A.I., Karetnikova T.A., Torgashov R.A., Terentyuk A.G., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Ryskin N.M. Simulation and development of novel slow-wave structures for miniaturized THz-band vacuum-tube devices // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10717. – Art. no. 107171A.
17. Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Mitin D.M., Rozhnev A.G., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Ryskin N.M. Study of electromagnetic parameters of a V-band planar meander slow-wave structure // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, 2018, pp. 421-422.
18. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Torgashov R.A., Galushka V.V., Pavlov A.M. Development of planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum tubes // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, 2018, pp. 1-2
19. Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Кожевников И.О., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Терентюк А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И. Разработка ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцевого диапазонов с пространственно-развитыми замедляющими системами // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 126-130.
20. Starodubov A. V., Serdobintsev A. A., Pavlov A. M., Galushka V. V., Ryabukho P. V., Rozhnev A. G., Torgashov R. A., Torgashov G. V., Ryskin N. M. Experimental and numerical study of electromagnetic parameters of V-band planar meander slow-wave structure // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), Toyama, 2018, pp. 926-929.
21. Starodubov A.V., Galushka V.V., Torgashov R.A., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Torgashov G.V., Ryabukho P.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum devices (novel approach for fabrication, numerical and experimental measurements) // 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Istanbul, 2018, pp. 128-131.
22. Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Sinev I.V., Rozhnev A.G., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Ryskin N.M. Experimental and numerical study of electromagnetic parameters of planar slow-wave structures for millimeter-wave vacuum electronic devices // Proc. SPIE. – 2019. – Vol. 11066. – Art. no. 1106618.
23. Starodubov A.V., Pavlov A.M., Galushka V.V., Bakhteev I.Sh., Serdobintsev A.A., Torgashov G.V., Ryabukho P.V., Molchanov S.Yu., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Study on a microfabrication W-band planar meander-line slow-wave structure // 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Busan, Korea (South), 2019, pp. 1-2.
24. Starodubov A.V., Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Pavlov A.M., Serdobintsev A.A., Torgashov R.A., Galushka V.V., Kozhevnikov I.O., Bahteev I.Sh., Ulisse G., Krozer V. Microfabrication and study of planar slow-wave structures for low-voltage V-band and W-band vacuum tubes // 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Paris, France, 2019, pp. 1-2.
25. Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Pavlov A.M., Galushka V.V., Sakharov V.K., Torgashov R.A., Bessonov D.A., Galkin A., Ryskin N.M. Comparison of nanoseconds and picoseconds laser ablation for microfabrication of planar slow-wave structures for D-band vacuum electronic devices with sheet electron beam // Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11458. – Art. no. 1145803.

26. Ryskin N.M., Starodubov A.V., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Pavlov A.M., Galushka V.V., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Ulisse G., Krozer V. Development of a millimeter-band traveling-wave tube with a meander-line microstrip slow wave structure // Proc. SPIE. – 2020. – Vol. 11582. – Art. no. 1158217.
27. Starodubov A. V., Atkin V. S., Torgashov R. A., Navrotsky I.A., Ryskin N.M. On the technological approach to microfabrication of a meander-line slow-wave structure for millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beams // Proc. SPIE. Vol. 11846, Saratov Fall Meeting 2020: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. 118460M.
28. Ryskin N.M., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Galushka V.V., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Ulisse G., Krozer V. Development of miniaturized traveling-wave tubes with planar microstrip slow-wave structures on dielectric substrates // 2020 33rd International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). P. 27-28.
29. Serdobintsev A.A, Galushka V.V., Pavlov A.M., Kozhevnikov I.O., Starodubov A.V., Torgashov R.A., Ryskin N.M. Molybdenum-copper alloys as a base material for microfabrication planar slow-wave structures of millimeter-band vacuum electron devices // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online), Tomsk, Russia, 2020. P. 809-812
30. Starodubov A., Galushka V., Pavlov A., Kozhevnikov I., Rasulov I., Serdobintsev A., Torgashov R., Rozhnev A., Sakharov V., Galkin A., Bessonov D., Torgashov G., Ryskin N. Technological approaches to the microfabrication of planar slow-wave structures for millimeter- and THz-band vacuum electron devices // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russia, 2020. P. 256-261.
31. Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Ploskih A.E., Zolotykh D.N., Emelyanov V.V., Navrotsky I.A. Development of high-power sub-THz traveling-wave tubes with multiple sheet electron beams // 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2020. P. 1-2.
32. Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Ploskih A.E., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Navrotsky I.A., Emelyanov V.V. Development of miniature millimeter-band traveling-wave tubes with sheet and multiple electron beams // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020. P. 94-97.
33. Starodubov A.V., Pavlov A.M., Galushka V.V., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Bessonov D.A., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Molchanov S.Yu., Bakhteev I.Sh., Ulisse G., Krozer V. Studies on millimeter-band low-voltage traveling-wave tubes with planar meander-line slow-wave structures // 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC), Monterey, CA, USA, 2020. P. 325-326.
34. Ryskin N.M., Torgashov R.A., Navrotsky I.A., Starodubov A.V., Titov V.N., Emelyanov V.V., Rozhnev A.G. Development and modeling of a multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power millimeter-band traveling-wave tube // 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Rotterdam, Netherlands, 2021. P. 1-2.
35. Torgashov R.A., Starodubov A.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Galushka V.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Ulisse G., Krozer V. Development of a low-voltage millimeter-band traveling-wave tube with a planar microstrip slow-wave structure on dielectric substrate // 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Rotterdam, Netherlands, 2021. P. 1-2.
36. Ryskin N.M., Starodubov A.V., Torgashov R.A., Pavlov A.M., Kozhevnikov I.O., Serdobintsev A.A., Rozhnev A.G., Ulisse G., Krozer V. Studies on a microfabricated traveling-wave tube with planar microstrip slow-wave structure // 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Chengdu, China, 2021. P. 1-2.

37. Torgashov R.A., Starodubov A.V., Navrotsky I.A., Titov V.N., Emelyanov V.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power millimeter-band traveling-wave tube // 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Chengdu, China, 2021. P. 1-2.
38. Torgashov R. A., Ryskin N. M. The Planar Microstrip Slow-Wave Structure for a V-band Dual-Sheet-Beam Traveling-Wave Tube // 2021 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Lancaster, United Kingdom, 2021. P. 1-2.
39. Torgashov R.A., Ryskin N.M. Study of multiple-beam sub-THz traveling-wave tube with meander-line slow-wave structure // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russian Federation, 2022, pp. 43-46.
40. Torgashov R.A., Starodubov A.V., Chistyakov I.A., Titov V.N., Galushka V.V., Pavlov A.M., Ryskin N.M. Studying high-power miniature millimeter-band tubes with sheet electron beam // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 90-93.
41. Torgashov R.A., Kolesnichenko E.E., Rostuntsova A.A., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Ryskin N.M. The study of millimeter-band multiple-beam O-type vacuum electron devices // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 86-89.
42. Torgashov R.A., Ryskin N.M., Rozhnev A.G. 3-D PIC simulation of the high-power traveling-wave tube with multiple-tunnel meander-line slow-wave structure // 2022 23rd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 25-29 April 2022. Monterey CA.
43. Ryskin N.M., Starodubov A.V., Kozhevnikov I.O., Torgashov R.A., Galushka V.V., Navrotsky I.A., Nozhkin D.A., Serdobintsev A.A., Rozhnev A.G. Development and modeling of a V-band traveling-wave tube with a microstrip meander-line slow-wave structure // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Chengdu, China, 2023, pp. 1-2.
44. Ryskin N.M., Starodubov A.V., Torgashov R.A., Rostuntsova A.A., Navrotsky I.A., Rozhnev A.G. Multiple-tunnel microfabricated slow-wave structures for millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beams // 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 25-28 April 2023. Chengdu, China.
45. Бенедик А.И., Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Стародубов А.В., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В. Исследование и разработка приборов О-типа миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Проблемы СВЧ электроники. Сборник трудов Всероссийской научной конференции. М.: Медиа Паблишер – 2017 – С. 16-17.
46. Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Галушка В.В., Торгашов Г.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю. Исследование миниатюрной замедляющей системы на диэлектрической подложке для низковольтной лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // Электроника и микроэлектроника СВЧ-2019. Сборник статей VIII Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 728 с.
47. Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Синев И.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Рожнев А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Рыскин Н.М. Разработка, изготовление и исследование планарных замедляющих структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн // XI Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Тезисы докладов. 25-28 февраля 2019 г. – Нижний Новгород: ИПФ РАН – 2019 – С. 63-64
48. Torgashov R. A., Rostuntsova A.A., Kolesnichenko E.E., Navrotsky I.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Study of slow-wave structures for multiple-beam miniaturized millimeter-band traveling-wave tubes // The 5-th International Conference "Terahertz and Microwave

- Radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA-2023): Abstract book – Moscow: Our Style – 2023. – P. 144.
49. Торгашов Р. А., Ножкин Д. А., Стародубов А. В., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М. Исследование мощной лампы бегущей волны W-диапазона с замедляющей системой меандрового типа и двухлучевым электронным потоком // Электроника и микроэлектроника СВЧ-2023. Сборник статей XII Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. 676 с.
 50. Бенедик А.И., Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В. Исследование миниатюрного низковольтного генератора обратной волны миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2017 – С. 286-287
 51. Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В. Исследование планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для лампы бегущей волны миллиметрового диапазона // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Издательство «Техно-Декор» – 2018 – С. 320-321.
 52. Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Галушка В.В., Торгашов Г.В., Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю. Исследование планарной замедляющей системы типа меандр на диэлектрической подложке для ЛБВ миллиметрового диапазона // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2019 – С. 261-262.
 53. Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Титов В.Н., Рыскин Н.М. Исследование двухлучевой ЛБВ миллиметрового диапазона с замедляющей системой меандрового типа // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2020 – С. 277-278.
 54. Торгашов Р.А., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Галушка В.В., Торгашов Г.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Ulisse G., Krozer V. Исследование и разработка ЛБВ с планарными замедляющими системами на диэлектрических подложках // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XV Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2020 – С. 281-282.
 55. Торгашов Р.А. Исследование многоканальной замедляющей системы меандрового типа для ЛБВ миллиметрового диапазона // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XVI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2021 – С. 187-188.
 56. Торгашов Р.А., Навроцкий И.А., Рыскин Н.М. Моделирование взаимодействия в миниатюрной ЛБВ миллиметрового диапазона с планарной замедляющей системой на диэлектрической подложке // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: Докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2022 – С. 201-202.
 57. Торгашов Р.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М. Разработка замедляющей системы для двухлучевой ЛБВ W-диапазона // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: Докл. XVIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор» – 2023 – С. 187-188.