

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Пресняков Семен Андреевич

**Исследование и разработка замедляющих систем
миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Кравченко Наталья Павловна

Москва – 2023

Актуальность исследования

Непрерывное развитие науки и техники устанавливает новые планки параметров и характеристик наших приборов и устройств. Одной из важнейших областей технологий в современном обществе является коммуникация. Существует множество различных аспектов, которые рассматриваются в областях исследований, изучающих технологии и вопросы связи, и один из них – создание и разработка новых усилительных устройств, работающих в малоизученных диапазонах частот, таких как миллиметровый и особенно субмиллиметровый (терагерцовый) диапазоны. Потенциальные применения включают в себя высокоскоростную связь, обнаружение скрытого оружия или иных видов угроз, дистанционную визуализацию с высоким разрешением, химическую спектроскопию, исследование материалов, исследование дальнего космоса и связь, биологическую спектроскопию и биомедицинскую диагностику [1]. В частности применение терагерцового диапазона в биомедицинской диагностике заболеваний глаза с использованием рефлектометрии исследовалось в рамках аспирантуры в работе [2].

Попытки создания таких усилительных устройств на основе электронных ламп интересны для исследователей из-за их высокой плотности мощности, недостижимой для современной твердотельной электроники. Одним из ключевых компонентов усилительных электровакуумных приборов являются замедляющие системы (ЗС). От правильного подбора ЗС зависят многие ключевые характеристики усилительных приборов, такие как выходная мощность и рабочий диапазон. Одним из самых распространённых электровакуумных усилительных приборов является лампа бегущей волны (ЛБВ). При создании широкополосных (до 1-2 октав) ЛБВ всегда традиционно применялись классические спиральные ЗС, однако, использование данного типа ЗС в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах весьма ограничено ввиду малого теплоотвода такого типа ЗС: для средней части сантиметрового диапазона спиральные ЗС позволяют достигать мощности на выходе до ~1 кВт, а на частотах порядка 18 ГГц – всего около 100 Вт. Использование цельнометаллических ЗС таких как, к примеру, «цепочка

связанных резонаторов» в силу их хорошего теплоотвода позволяет повысить среднюю мощность до 5-8 кВт, однако при этом рабочий диапазон составляет примерно 8% (максимум 17%) в связи с резонансными свойствами таких структур. Кроме того, для ЗС типа ЦСР возможно возникновение значительных трудностей при их изготовлении на частотах свыше 100 ГГц в силу сложной конфигурации отдельных элементов, что ограничивает их применимость текущими возможностями существующих технологий микрообработки. В связи с этим исследование и разработка новых типов конструкций, а также модификация существующих видов ЗС, создание методов расчёта их характеристик, а также изучение физических механизмов взаимодействия электронного пучка с волной в миниатюрных электровакуумных приборах являются актуальными задачами при разработке усилительных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона электромагнитных волн.

Таким образом решение перечисленных выше задач позволит получить новые научно-технические результаты в области создания и разработки источников когерентного электромагнитного излучения и радиосистем миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, и ускорит развитие технологий в области связи, спектроскопии, диагностики и других применений.

Степень разработанности темы исследования

Текущее состояние создания замедляющих систем в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах является активной областью исследований и разработки. Несмотря на значительные достижения, все еще существуют проблемы и возможности для дальнейшего развития. В настоящее время можно выделить следующие проблемы:

1. **Исследования конструкций ЗС.** Изучение различных типов ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах постоянно находится в поле зрения исследователей. Это включает в себя различные типы ЗС, такие как модифицированные спиральные системы, периодические системы, системы на основе метаматериалов и системы на основе волноводов. Основное внимание уделяется проектированию и оптимизации этих систем для

достижения желаемых эффектов замедления, соответствия импедансов и повышенной производительности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [1, 3].

2. **Технологии изготовления.** Разработка технологий изготовления ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах является активной областью исследований. Изучаются такие технологии, как микрообработка, литография, аддитивное производство и передовые методы нанесения материалов для создания сложных и точных систем с необходимыми характеристиками. Совершенствование технологии изготовления имеет важное значение для достижения миниатюризации, снижения потерь и возможности интеграции замедляющих систем с другими компонентами и системами [1, 4, 5].
3. **Выбор материалов.** Инженерия материалов играет важную роль в создании ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Исследуются новые материалы с низкими потерями и высокой электрической проводимостью в этих частотных диапазонах. Такие материалы, как высокоомный кремний, нитрид галлия (GaN), алмаз и различные композитные материалы, проходят исследования на предмет их пригодности для эффективной передачи замедленных волн и минимизации потерь [6, 7].
4. **Проектирование и моделирование.** Проектирование и моделирование ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах играют основополагающую роль в их разработке. Применяются такие передовые инструменты проектирования и моделирования, как программное обеспечение для электромагнитного моделирования с использованием методов конечных элементов (МКЭ) и методов конечных разностей во временной области (FDTD). Эти инструменты позволяют анализировать и оптимизировать электромагнитное поведение и производительность замедляющих систем [8–10].
5. **Применения и системы.** Развитие ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах определяется разнообразными применениями, такими

как коммуникационные системы, радиолокационные системы, измерительная техника, сенсорные устройства, датчики. Указанные частотные диапазоны предоставляют уникальные возможности для получения высококачественного изображения, высокопропускной способности связи и точного обнаружения в сложных условиях. Исследователи изучают, как ЗС могут интегрироваться в эти системы и настраиваться для удовлетворения специфических требований разнообразных приложений [3, 11].

В целом, текущее состояние создания ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах характеризуется активными исследованиями, совершенствованием технологий изготовления и инженерией материалов, а также дальнейшей разработкой инструментов проектирования и моделирования. Усилия продолжают направляться на улучшение производительности, снижение потерь, миниатюризацию, увеличение теплоотвода и изучение новых возможностей применения в этих частотных диапазонах.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является исследование физических и конструктивно-технологических особенностей ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также создание алгоритма расчета таких ЗС для улучшения их электродинамических характеристик.

В рамках данного исследования решались следующие задачи:

- Анализ ЗС миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов, а также основных физических и конструктивно-технологических проблем, возникающих при создании усилительных электровакуумных приборов на их основе.
- Разработка метода описания ячейки ЗС с использованием теории многополюсников с учетом каналов передачи электромагнитной энергии, возникающих при наличии пролётного канала для электронного пучка, для расчётов электродинамических характеристик, таких как коэффициент замедления, реактивное затухание и характеристический импеданс.

- Разработка алгоритмов расчёта параметров ЗС на основе результатов 3D-моделирования и анализ электродинамических характеристик ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.
- Анализ возможности расширения полосы пропускания аксиально-симметричной ЗС типа «цепочка связанных резонаторов» миллиметрового диапазона.

Положения, выносимые на защиту

В результате выполнения данного исследования выдвигаются следующие положения:

1. При разработке ЗС миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах электромагнитных волн учёт пролётного канала при расчёте электродинамических характеристик играет важную роль в связи с повышением актуальности многолучевых приборов, а также конструкций, использующих ленточные электронные пучки. Учёт пролётного канала оказывает значительное влияние на такие электродинамические параметры, как дисперсионные характеристики (в том числе, на положение и ширину полос пропускания) и характеристический импеданс ЗС.
2. Предложен метод описания ячейки ЗС, позволяющий учитывать наличие пролётного канала для пучка электронов внутри ЗС при помощи матрицы передачи восьмиполюсника. Электродинамические характеристики ЗС определяются путём нахождения собственных чисел и собственных значений матрицы передачи, описывающей данную структуру. По представленному в работе алгоритму нахождения электродинамических характеристик ЗС миллиметрового и субмиллиметрового диапазона осуществляется расчёт коэффициента замедления, реактивного затухания и характеристического импеданса с учётом наличия дополнительного канала передачи электромагнитной энергии, возникающих при наличии пролётного канала для электронного пучка.

3. При изменении угла раскрыва щелевого канала в миллиметровой ЗС типа ЦСР показана возможность управления шириной полосы пропускания. С увеличением угла раскрыва можно добиться расширения полосы в 2,5 раза при увеличении угла на 90 градусов, а при слиянии резонаторной и щелевой полосы – вплоть до октавы. Однако при этом падает характеристический импеданс. Возможным вариантом решения данной проблемы является изменение формы щели ЗС.

Научная новизна

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в следующем:

- Разработан метод расчёта электродинамических характеристик ЗС, учитывающий наличие двух каналов передачи электромагнитной энергии внутри ЗС при помощи матрицы передачи восьмиполосника. Ошибка данного метода не превышает $5 \cdot 10^{-5} \%$ для характеристического импеданса и не превышает величину вычислительной погрешности для коэффициента замедления по сравнению с классическим методом нахождения дисперсии линий передач.
- В результате анализа физических и конструктивно-технологических особенностей приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах и расчёта электродинамических характеристик ЗС в данных диапазонах показана важность учёта наличия пролётного канала в модели ЗС.
- Исследовано влияние угла раскрыва щелевого канала в аксиально-симметричной ЗС типа ЦСР миллиметрового диапазона с фасолевыми щелями с целью управления шириной полосы пропускания, продемонстрирована возможность её расширения вплоть до октавы.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 162 страницы, включая 75 рисунков и 6 таблиц.

В **первой главе** диссертации рассматриваются особенности создания усилительных приборов в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах. Проведён обзор современного состояния области и перспективных направлений создания приборов в указанных частотных диапазонах. Описаны механизмы взаимодействия в вакуумных электронных усилителях. Рассмотрено устройство и принцип работы ЛБВ, а также основные базовые конструкции ЗС, применяющихся в ЛБВ. Проанализированы физические и конструктивно-технологические проблемы, возникающие при создании приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Проведён обзор основных технологий микрообработки, применимых для создания ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, разобраны их преимущества и недостатки, а также приведены примеры применения данных технологий для создания вакуумных электронных приборов. Приведены условия для создания магнитного поля внутри ЗС, необходимого для удержания электронного пучка внутри него. Представлены возможные конструкции катода для приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Отмечена необходимость учёта сложностей создания комплексных электродинамических структур на указанных диапазонах и возможные способы решения некоторых из возникающих проблем при создании ЗС миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Во **второй главе** диссертации рассмотрена методология расчёта электродинамических характеристик ЗС в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах. Разобраны основные характеристики ЗС и методики их получения. Представлен метод описания ячейки ЗС при помощи многополюсника, позволяющий учитывать наличие пролётного канала для пучка электронов внутри ЗС, используя матрицу передачи восьмиполюсника. Электродинамические характеристики

ЗС определяются путём нахождения собственных чисел и собственных векторов матрицы передачи, описывающей данную структуру. Проведена оценка адекватности представленного метода путём сравнения с классическим методом расчёта дисперсии нелинейных линий передач.

Рассмотрены методы, используемые для получения компонент матрицы $2N$ -полюсника, описывающего ЗС. Проанализированы методы частичных областей и глобальные методы. Описаны методы, применяемые для численного моделирования уравнений Максвелла при 3D-моделировании ЗС. Приведены их достоинства и недостатки для решения электродинамических задач.

В **третьей главе** представлены результаты нахождения электродинамических характеристик ЗС миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов по разработанному методу и проанализированы зависимости электродинамических характеристик, в том числе, с учётом наличия пролётного канала при расчёте. Были рассмотрены ЗС типа «петляющий волновод» двух различных конфигураций в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также миллиметровая аксиально-симметричная и прямоугольная ЗС типа ЦСР. Проанализирована возможность расширения полосы пропускания для аксиально-симметричной ЗС типа ЦСР.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения данной работы.

В **приложениях** приведена матрица перехода от матрицы импедансов к матрице передачи размерности 4×4 , а также листинги программ для расчёта электродинамических характеристик с 2 и 4 портами передачи электромагнитной энергии.

Основные результаты работы

В результате данной работы была выполнена актуальная задача исследования физических и конструктивно-технологических особенностей ЗС в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, а также создание алгоритма расчета

таких ЗС для изучения возможностей улучшения их электродинамических характеристик.

Основные результаты данной работы:

- 1) Проведён обзор современного состояния области и перспективных направлений создания приборов в указанных частотных диапазонах. Описаны механизмы электронно-волнового взаимодействия в вакуумных электронных усилителях. Проанализированы физические и конструктивно-технологические проблемы, возникающие при создании приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.
 - а) Проведён обзор основных технологий микрообработки, применимых для создания ЗС в данных диапазонах, приведены примеры их применения в контексте тематики исследования. Выявлено, что основные проблемы, возникающие при создании приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, связаны с малыми габаритными размерами изготавливаемых конструкций, что ведёт к тенденции их упрощения при повышении рабочей частоты. Показана необходимость создания новых конструкций ЗС, более приспособленных к изготовлению при помощи существующих методов микрообработки, а также обладающих достаточным теплоотводом.
 - б) Рассмотрено влияние миниатюризации приборов на выбор магнитной фокусирующей системы и конструкции катода. Показано, что учёт наличия пролётного канала при проектировании ЗС в миллиметровых и субмиллиметровых диапазонах становится особенно важен в связи с повышением плотности токов внутри устройства, а также перспективности применения конструкций, использующих несколько электронных пучков или ленточные пучки.
- 2) Предложен метод описания ячейки ЗС при помощи многополюсника. Данный метод позволяет учитывать наличие пролётного канала для пучка электронов внутри ЗС при помощи матрицы передачи восьмиполусника. Электродинамические характеристики ЗС определяются при помощи нахождения собственных чисел и собственных векторов матрицы передачи, описывающей

данную структуру.

- а) Проведён обзор методов, используемых для получения компонент матрицы $2N$ -полюсника, описывающего ЗС. Разобраны методы частичных областей и глобальные методы. Описаны методы, применяемые для численного моделирования уравнений Максвелла при 3D-моделировании ЗС. Приведены их достоинства и недостатки для решения электродинамических задач.
 - б) Предложен алгоритм нахождения электродинамических характеристик ЗС миллиметрового и субмиллиметрового диапазона через матрицу передачи восьмиполусника, позволяющий вычислять их коэффициент замедления, реактивное затухание и характеристический импеданс с учётом наличия двух каналов передачи электромагнитной энергии, возникающих при наличии пролётного канала для электронного пучка. Дана оценка адекватности метода на основе сравнения с уже применяющейся методикой расчёта дисперсионных характеристик нелинейных линий передач. Рассчитанная ошибка предложенного метода не превышает $5 \cdot 10^{-5} \%$ для характеристического импеданса и не превышает величину вычислительной погрешности для коэффициента замедления по сравнению с классическим методом нахождения дисперсии линий передач.
- 3) Рассчитаны электродинамические характеристики ЗС типа «петляющий волновод» миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов двух различных конфигураций и проанализированы зависимости электродинамических характеристик с учётом наличия пролётного канала.
- а) Для конфигурации №1 было рассмотрено две модели с периодами 5,5 и 1 мм, рассчитанных на частотах с 40 до 50 ГГц и с 275 до 375 ГГц соответственно. Наличие пролётного канала приводит к смещению пиков характеристических импедансов, при этом с уменьшением ЗС и, соответственно, возрастанием рабочей частоты этот эффект становится более выявленным. При реализации данной конфигурации ЗС на высоких частотах (модель №2) наиболее ярко выраженной становится мнимая часть

характеристического импеданса, обладающая ограниченной значимостью при оценке взаимодействия пучка с волной [12]. Из графиков дисперсионных характеристик можно видеть, что учёт пролётного канала для данной конфигурации влияет на тип дисперсии, а также на положение полос пропускания и затухания, при этом для более высокочастотного случая (модель №2) это влияние более выражено.

- б) Для конфигурации №2 было рассмотрено три модели с периодами 810, 360 и 90 мкм на частотах W-диапазона (75–110 ГГц), G-диапазона (110–300 ГГц) и с 0,6 до 1,1 ТГц соответственно. Для всех моделей данной конфигурации наличие пролётного канала приводило к сдвигу пиков действительной части характеристического импеданса и кривой коэффициента замедления приблизительно на 1% в область более высоких частот. При этом для моделей №2 и №3 на графиках дисперсионных характеристик появлялась дополнительная область небольшого затухания между рабочими полосами ЗС.
- 4) Рассчитаны электродинамические характеристики аксиально-симметричной ЗС типа ЦСР в диапазоне от 10 до 30 ГГц и проанализирована зависимость электродинамических характеристик ЗС от наличия пролётного канала.
 - а) Наличие пролётного канала в модели аксиально-симметричной ЗС типа ЦСР смещает пики значений характеристического импеданса. Мнимая часть характеристического импеданса при учёте пролётного канала при этом смещается в отрицательную область, т. е. можно сделать вывод, характеристический импеданс будет иметь более емкостной характер. При этом увеличиваются значения и расширяются полосы реактивных затуханий и сужаются полосы пропускания. Также добавление пролётного канала может приводить к возникновению дополнительных резонансов в дисперсионной характеристике в силу резонансного характера ЗС.
 - б) Проанализирована зависимость полосы пропускания ЗС типа ЦСР от угла раскрыва щели для аксиально-симметричной ЗС типа ЦСР в диапазоне от 4 до 25 МГц. Показана возможность расширения полосы пропускания ЗС

в 2,5 раза при увеличении угла раскрытия щели на 90 градусов, при этом при слиянии полос возможно получение рабочей полосы шириной вплоть до октавы. Однако, следствием этого является падение характеристического импеданса, при этом возможным вариантом решения данной проблемы является изменение формы щели ЗС.

- 5) Рассмотрена прямоугольная ЗС типа ЦСР в диапазоне от 30 до 60 ГГц с периодом 2,5 мм с двумя различными вариантами формы пролётного канала: для цилиндрического пучка и для ленточного пучка.
- а) Наличие пролётного канала в таких ЗС также смещает пики значений характеристического импеданса по частотной оси в связи со смещением полос пропускания внутри ЗС. Действительная часть характеристического импеданса при учёте пролётного канала в полосах пропускания возрастает.
- б) Наблюдаемая картина во многом аналогична полученной для аксиально-симметричных ЗС: видно, что наличие пролётного канала в модели увеличивает затухание и сужает полосы пропускания вне зависимости от используемой формы канала. В силу резонансного характера данной ЗС в дисперсионной характеристике также возникают дополнительные резонансы.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора в работу состоит в его непосредственном участии в постановке и решении задач исследования, создании представленных в диссертации трёхмерных моделей устройств, проведении численного моделирования и анализа полученных результатов. Автором был разработан метод для расчёта электродинамических характеристик ЗС, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Лично автором и при его участии были подготовлены основные статьи по выполненной работе.

Практическая значимость работы

Результаты, представленные в диссертации, получены при выполнении трёх двухлетних грантов Научного Фонда НИУ ВШЭ в составе НУГ «Электродинамика замедляющих систем» (грант 17-05-0009, 2017-2018 гг., грант 19-04-005, 2019-2020 гг., грант 21-04-010, 2021-2022 гг.), а также в ходе работы во время стажировки по теме «Submillimeter wave imaging spectroscopy of cornea for the early detection of disease» в Университете Аалто (Эспоо, Финляндия) в рамках программы «Академическая аспирантура».

В ходе работы по тематике диссертации были получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. №2016616989 «Расчет дисперсионных характеристик замедляющих систем с одним каналом распространения микроволновой энергии по результатам их трехмерного моделирования»;
2. №2016616990 «Расчет дисперсионных характеристик замедляющих систем с четырьмя портами по результатам их трехмерного моделирования»;
3. №2016662704 «Расчет замедления, реактивного затухания и характеристического сопротивления прямоугольной замедляющей системы типа цепочка связанных резонаторов с разделением на ячейки по щелям связи».

Рассчитанные по данным программам электродинамические характеристики ЗС могут применяться для разработки компактных усилительных приборов в высокочастотных диапазонах микроволнового излучения, при этом взаимодействие пучка с волной можно рассчитывать при помощи разностной теории возбуждения электродинамических систем.

Апробация результатов исследования

Результаты, полученные в результате данной работы, были представлены автором лично на крупных международных и всероссийских конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», «Modeling of discrete interaction processes in traveling-wave tube with resonator slow-wave structures of microwave and

- EHF ranges», Саратов, 27-28 сентября, 2018.
2. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», «Theoretical Analysis of Coaxial-Radial Type Slow-Wave Structure Electrodynamics Characteristics and Its Modifications», Саратов, 24-25 сентября, 2020.
 3. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, «Анализ замедляющих систем, используемых в приборах миллиметрового диапазона», Москва, 17-29 февраля, 2016.
 4. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, «Разработка методов моделирования и средств проектирования лампы бегущей волны терагерцового диапазона», Москва, 17 февраля – 1 марта, 2017.
 5. Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», «Усиление электромагнитных волн миллиметрового диапазона с помощью замедляющих систем типа "петляющий волновод"», 16-17 марта, Москва, 2016.
 6. Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», «Анализ замедляющих систем, используемых в приборах миллиметрового диапазона», 24 марта, Москва, 2015.
 7. Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», «Моделирование и расчет дисперсионных характеристик замедляющих систем микроволнового диапазона», Москва, 15-16 марта, 2017.
 8. II Всероссийская объединённая научная конференция "Проблемы СВЧ-электроники" МИЭМ НИУ ВШЭ – "Инновационные решения" Keysight Technologies, «Влияние пролетного канала на дисперсионные характеристики аксиально-симметричных резонаторных замедляющих систем», Москва, 26-28 октября, 2015 г.
 9. 2019 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP-2019),

- «Building a Macromodel of the Satellite Antenna Equivalent Electrical Circuit», Инчхон, 4-7 августа, 2019.
10. Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2017), «Investigation of “serpentine”-type slow-wave structures in the terahertz range», Лондон, 24-26 апреля, 2017.
 11. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC-2018), «Investigation of Extension Limits of Main Passband of the “Chain of Coupled Resonators”-Type Slow-Wave Structure», Киото, 6-9 ноября, 2018.
 12. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), «Analysis of Dispersion Characteristics of Slow-Wave Structures Used in Terahertz Range Devices», Санкт-Петербург, 1-3 февраля, 2017.
 13. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), «Model of “Chain of Coupled Resonators”-Type Slow-Wave Structure’s Cell Based on Equivalent Systems Method», Москва, 12-14 мая, 2016.
 14. 2019 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, «Simulation of Resonator Slow-Wave Structures and Terminal Devices of TWT Sections in SHF and UHF Ranges», Москва, 20-21 марта, 2019.
 15. Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях «СИНХРОИНФО 2019», «Software Complex "VEGA" for Designing cm- and mm-Wave TWT with Resonator Slow-Wave Structures», Ярославль, 1-3 июля, 2019.
 16. 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, «Simulation Analysis of Interaction in O-Type Devices with CRL Type Slow-Wave Structures», Москва, 16-18 марта, 2021.
 17. 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications SYNCHROINFO-2023, «Investigation of Electrodynamics Characteristics of the Millimeter Range Folded Waveguide Slow-Wave Structure», Псков, 28-30 июня, 2023.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 11 работах, из которых 8 индексируются в Scopus/WoS.

Статьи в журналах, индексируемых в Scopus/WoS:

1. Presnyakov S. Analysis of the dispersion characteristics of slow-wave structures with two microwave propagation channels / Kravchenko N., Mukhin S., Presnyakov S. Пер. с рус. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2017. Vol. 62. No. 7. P. 800-808
2. Presnyakov S. Extraction of Thickness and Water-Content Gradients in Hydrogel-Based Water-Backed Corneal Phantoms Via Submillimeter-Wave Reflectometry/ Tamminen A., Baggio M., Nefedova I., Sun Q., Presnyakov S., Alalaurinaho J., Brown E., Wallace V., Macpherson E., Maloney T., Kravchenko N., Salkola M., Deng S., Taylor Z. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 647-659

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в Scopus/WoS:

3. Presnyakov S. Simulation Analysis of Interaction in O-Type Devices with CRL Type Slow-Wave Structures, / Kravchenko N., Kasatkin A., Presnyakov S., // in: 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2021. P. 1-4.
4. Presnyakov S. Theoretical Analysis of Coaxial-Radial Type Slow-Wave Structure Electrodynamics Characteristics and Its Modifications, / Presnyakov S., Kravchenko N., Kasatkin A., Mukhin S. // in: 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2020). MATERIALS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE. Saratov. September 24-25, 2020. IEEE, 2020. P. 210-213
5. Presnyakov S. Building a Macromodel of the Satellite Antenna Equivalent Electrical Circuit, / Borisov N., Kravchenko N., Presnyakov S., Kasatkin A. // in: 2019 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP).

- Incheon, Korea (South): IEEE, 2019. doi P. 309-310.
6. Presnyakov S., All-Metal Slow-Wave-Structure of Coaxial-Radial Line Type for Powerful Multibeam TWT, / Kasatkin A., Presnyakov S., Kravchenko N., Mukhin S. V. // in: SYNCHROINFO 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, IEEE Conference # 47541. IEEE, 2019. P. 1-5
 7. Presnyakov S.. Analysis of Dispersion Characteristics of Slow-Wave Structures Used in Terahertz Range Devices, / Kravchenko N., Presnyakov S., Kasatkin A., Mukhin S. // in: Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg : Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2017. P. 135-137
 8. Presnyakov S., Model of “Chain of Coupled Resonators”-Type Slow-Wave Structure’s Cell Based on Equivalent Systems Method, / Presnyakov S., Kravchenko N., Mukhin S. // in: 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. M. : HSE, 2016. P. 1-4

Статьи в иных изданиях:

9. Пресняков С. А. Замедляющие системы миллиметрового диапазона / Кравченко Н. П., Мухин С. В., Пресняков С. А. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 6. С. 57-63
10. Presnyakov S. Analysis of the slow-wave structures used in the millimeter range devices / Kravchenko N., Mukhin S., Presnyakov S., Kasatkin A. // Т-Comm: Telecommunications and transport. 2016. Vol. 10. No. 8. P. 83-88
11. Пресняков С. А. Анализ дисперсионных характеристик замедляющих систем, используемых в приборах терагерцового диапазона / Касаткин А. Д., Пресняков С. А., Кравченко Н. П., Мухин С. В. // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 1. С. 31-36

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Booske J.H. Vacuum electronic high power terahertz sources / Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J., Temkin R.J. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology – 2011. – Vol. 1 – № 1 – PP. 54–75.
2. Tamminen A. Extraction of Thickness and Water-Content Gradients in Hydrogel-Based Water-Backed Corneal Phantoms Via Submillimeter-Wave Reflectometry / Tamminen A., Baggio M., Nefedova I., Sun Q., Presnyakov S., Ala-Laurinaho J., Brown E., Wallace V., Macpherson E., Maloney T., Kravchenko N., Salkola M., Deng S., Taylor Z. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology – 2021. – T. 11 – № 6 – PP. 647–659.
3. Kotiranta M. Development of terahertz vacuum electronics for array receivers / Kotiranta M. – 2012. –112p.
4. Starodubov A. V. Technologies for Forming Electrodynamic Structures for Millimeter-Wave and Terahertz Vacuum Microelectronic Devices (Review) / Starodubov A. V., Nozhkin D.A., Rasulov I.I., Serdobintsev A.A., Kozhevnikov I.O., Galushka V. V., Sakharov V.K., Bessonov D.A., Galkin A.D., Bakhteev I.S., Molchanov S.Y., German S. V., Ryskin N.M. // Journal of Communications Technology and Electronics – 2022. – Vol. 67 – № 10 – PP. 1189–1197.
5. Starodubov A. Technological approaches to the microfabrication of planar slow-wave structures for millimeter- And THz-band vacuum electron devices / Starodubov A., Serdobintsev A., Galkin A., Galushka V., Torgashov R., Bessonov D., Pavlov A., Rozhnev A., Torgashov G., Kozhevnikov I., Sakharov V., Ryskin N., Rasulov I. // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2020 – 2020. – № 20 – PP. 256–261.
6. Booske J.H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation / Booske J.H. // Physics of Plasmas – 2008. – Vol. 15 – № 5.
7. Galdetskiy A. New slow wave structure for W-band TWT / Galdetskiy A., Rakova E. // 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC) – 2017. –

PP. 1–2.

8. Tsukerman I. Finite-Difference Time-Domain Methods for Electrodynamics , 2020. – PP. 357–423.

9. Weiland T. Finite Integration Method and Discrete Electromagnetism , 2003. – PP. 183–198.

10. Waring R.M.A. Analysis and Synthesis of Slow Wave Structures for Millimetre wave TWTs / Waring R.M.A. – 2020. –June – PP.177.

11. Zheng R. Simulation and Microfabrication Development of Slow-Wave Circuit for THz Traveling-Wave Tubes / Zheng R. – 2011. –June.

12. Kravchenko N.P. Analysis of the dispersion characteristics of slow-wave structures with two microwave propagation channels / Kravchenko N.P., Mukhin S. V., Presnyakov S.A. // Journal of Communications Technology and Electronics – 2017. – Vol. 62 – № 7 – PP. 800–808.