

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
академик РАН  
С.А. Никитов  
« 11 » июня 2024 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова  
Российской академии наук  
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Диссертация Торгашова Романа Антоновича «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» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика выполнена на кафедре динамических систем на базе СФИРЭ РАН ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», а также в лаборатории вакуумной микро- и нанoeлектроники Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН.

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 212-Д от 28 декабря 2020 г. и переутверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 207-Д от 07 ноября 2023 г.

В 2020 г. Торгашов Роман Антонович окончил с отличием Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.04.01 «Прикладная математика и физика» с присвоением квалификации «Магистр».

В период подготовки диссертации соискатель обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» с 1 октября 2020 г по настоящее время по группе научных специальностей 1.3. Физические науки. С января 2016 г. по настоящее время работает в лаборатории вакуумной микро- и нанoeлектроники (СФ-1) СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Занимал должности инженера, стажера-исследователя, с сентября 2020 г. работает в должности младшего научного сотрудника.

Справка о сданных кандидатских экзаменах № 9-2024 от 16 мая 2024 г. выдана федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный

исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель – Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и нанoeлектроники (СФ-1) Саратовского филиала ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова» РАН, заведующий кафедрой динамических систем на базе СФИРЭ РАН ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 212-Д от 28 декабря 2020 г., представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

По итогам обсуждения работы на расширенном заседании Саратовской секции Ученого совета ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН было принято следующее **заключение**, содержащее оценку выполненной соискателем работы.

Диссертация Торгашова Р.А. посвящена исследованию особенностей распространения электромагнитных волн в пространственно-развитых замедляющих системах для миниатюрных ламп бегущей и обратной волны О-типа миллиметрового диапазона. Также в диссертации изучаются особенности процессов электронно-волнового взаимодействия в таких структурах с ленточными электронными пучками с большой площадью поперечного сечения, в том числе, с многолучевыми.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

Автором проведен подробный анализ электродинамических характеристик тонкопленочных ЗС на диэлектрических подложках для приборов О-типа средней и коротковолновой части миллиметрового диапазона. Исследовано влияние различных параметров структур на их дисперсионные характеристики, сопротивление связи и затухание. Впервые проведен сравнительный анализ методов численного моделирования омических потерь в тонкопленочных микрополосковых замедляющих системах меандрового типа. С использованием метода 3D PIC-моделирования впервые были исследованы особенности взаимодействия ленточных электронных пучков в приборах О-типа V-диапазона с микрополосковыми замедляющими системами, рассчитаны выходные характеристики таких приборов.

Предложена модификация микрополосковой замедляющей системы типа меандр, в которой осуществляется взаимодействие с двухлучевым ленточным электронным потоком. Исследованы характеристики системы в виде связанных меандров на диэлектрической подложке, в которой взаимодействие осуществляется с симметричной модой, имеющей наиболее высокие значения сопротивления связи. Показано, что рост мощности в сравнении с однолучевой конструкцией ЛБВ возможен примерно в 2 раза.

Предложена цельнометаллическая конструкция ЗС типа меандр с металлическими опорами W-диапазона, в которой взаимодействие происходит с двухлучевым ленточным пучком с высоким аспектным соотношением. В силу большой ширины меандра, взаимодействие в такой системе возможно с мощным ленточным пучком с плотностью тока не более  $70 \text{ А/см}^2$ .

Впервые подробно исследованы возможности усиления электромагнитных волн миллиметрового диапазона в лампах бегущей волны с многоэтажными меандровыми замедляющими системами. Обсуждаются возможности повышения выходной мощности при увеличении числа пролетных каналов. Показана перспективность подобных ЗС для создания многолучевых ламп в средней части миллиметрового диапазона с выходной мощностью в несколько сотен ватт.

**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.

**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.

**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.

**Апробация работы.** По результатам диссертационной работы было сделано 30 докладов на международных и всероссийских научных

конференциях: The 45<sup>th</sup> 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.

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 (Саратов, 2022 г.) были удостоены дипломов I степени.

**Публикации.** По теме 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:

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 Letters – 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 Letters – 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. – 013204.

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.

**Ценность научных работ соискателя** очевидным образом вытекает из вышеуказанных научной новизны и практической значимости, а также подтверждается публикацией результатов в научных журналах с высоким

импакт-фактором и принятием докладов оргкомитетами российских и международных конференций.

**Общая оценка диссертации.** Диссертация Торгашова Романа Антоновича «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» представляет собой целостное, законченное исследование, заключающее в решении задачи современной радиофизики по созданию новых компактных источников когерентного излучения миллиметрового диапазона с выходной мощностью до нескольких сотен ватт. Материалы диссертации полностью отражены в научных работах, опубликованных автором. Текст диссертации не содержит заимствованного материала без ссылок на авторов, а также материалов совместных работ без ссылок на соавторов. Тема и содержание диссертации соответствуют следующим разделам паспорта научной специальности 1.3.4. – Радиофизика:

1. Разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических), а также автоволн в неравновесных химических и биологических системах. Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей (пункт 1).

2. Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК – диапазоне (пункт 3).

Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г №842, предъявляемым к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация Торгашова Романа Антоновича «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» рекомендуется к защите на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Заключение принято на расширенном заседании Саратовской секции Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

Присутствовало на заседании 14 человек из 15, входящих в состав Саратовской секции Ученого совета.

Результаты голосования:

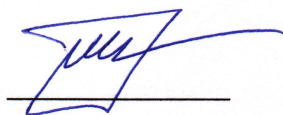
«за» – 14 чел.,

«против» – нет,

воздержались – нет

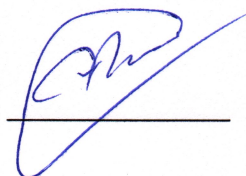
Протокол № 6 от 30 мая 2024 г.

Председатель Саратовской секции Ученого совета  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
Директор СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
профессор, д.ф.-м.н.



Филимонов Юрий Александрович

Ученый секретарь Саратовской секции Ученого совета  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
зам. директора по научной работе,  
к.ф.-м.н.



Фатеев Денис Васильевич