

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиопизика

Актуальной задачей современной радиопизики является создание источников когерентного электромагнитного излучения, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Особый интерес представляют вакуумные СВЧ приборы: лампа бегущей волны О-типа (ЛБВ-О), используемая как усилитель с высокой выходной мощностью и широкой полосой усиливаемых частот, а также лампа обратной волны О-типа (ЛОВ-О), применяемая обычно в качестве генератора с электронной перестройки частоты генерации в широком диапазоне частот.

Указанные приборы особенно важны для создания новой компонентной базы в современных системах высокоскоростной беспроводной передачи данных, а также в ряде других приложений, например в современных системах радиолокации, радиоастрономии, биомедицине и других областях народного хозяйства.

Однако для работы таких систем в коротковолновой части СВЧ диапазона длин волн необходимо сокращение поперечных размеров, как самих замедляющих систем (ЗС), выполненных в виде цилиндрической спирали, так и размеров цилиндрических электронных пучков (ЭП). В конечном счете, это приводит к резкому ухудшению эффективности взаимодействия, уменьшению коэффициента усиления и полосы частот.

В связи с этим значительный интерес вызывает применение в ЛБВ пространственно-развитых электродинамических структур, а также ленточных и многолучевых электронных потоков с большим поперечным сечением. Таким образом тема диссертационной работы является актуальной.

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав и Заключения. Объем диссертации составляет 161 страницу, включая 102 рисунка, а также 9 таблиц. Список литературы содержит 148 наименований.

Во **Введении** автором обоснована актуальность темы диссертации и достоверность полученных результатов, сформулированы цели и задачи работы, а также научная новизна и научно-практическая значимость.

В **первой главе** рассматриваются миниатюрные низковольтные приборы О-типа с тонкопленочными микрополосковыми электродинамическими структурами и ленточными электронными потоками. Автором исследуются электродинамические параметры замедляющей системы (ЗС) типа «меандр на диэлектрической подложке» для низковольтных ЛБВ-усилителей диапазона 50-70 ГГц, приводятся результаты оптимизации структуры, а также результаты проектирования подобных структур на более высокочастотные диапазоны вплоть до 140 ГГц. Большое внимание уделено моделированию процессов электронно-волнового взаимодействия в ЛБВ V-диапазона с ленточным электронным пучком с использованием как известных теоретических моделей, так и с использованием современных программных комплексов. Также автором приведено подробное сравнение методов моделирования омических потерь в тонкопленочных микрополосковых структурах, Приведены результаты расчетов и проведено сопоставление с экспериментальными результатами. В последней части первой главы автор исследует возможность создания миниатюрных ЛОВ-генераторов с микрополосковыми замедляющими системами на диэлектрических подложках.

Во **второй главе** автор исследует планарные меандровые замедляющие системы для двухлучевых ЛБВ-усилителей. Автор предлагает две новые конструкции ЗС: связанные меандры на диэлектрической подложке и полосковый меандр с металлическими опорами. Автором подробно исследованы электродинамические характеристики предложенных структур, а также проведено моделирование электронно-волнового взаимодействия.

Показано, что использование двухлучевых конструкций позволяет повысить пропорционально выходную мощность.

В **третьей главе** автором исследуются многорядные замедляющие системы в виде многоэтажных меандров с несколькими пролетными каналами с целью дальнейшего повышения выходной мощности ЛБВ миллиметрового диапазона. Автором показано, что увеличение числа пролетных каналов приводит к пропорциональному росту мощности, однако возникающая конкуренция мод и усложнение конструкции системы ввода/вывода СВЧ-энергии приводит к трудностям в изготовлении и применении таких приборов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

К числу основных достоинств данной работы можно отнести целостную структуру диссертации, грамотный и отредактированный текст, качественно подготовленные иллюстрации. В диссертации автор последовательно переходит от простых систем ЗС к более сложным, обосновывая при этом их недостатки и преимущества, оценивая возможность их изготовления с учетом современных технологий. Исследуются не только уже известные из литературы замедляющие системы, но и предлагаются новые, обладающие улучшенными характеристиками.

В диссертации используются современные методы трехмерного моделирования, используются зарекомендовавшие себя программные пакеты COMSOL Multiphysics и CST Studio Suite, а также известные теоретические методы СВЧ-электроники. Таким образом, используемые **методы** исследования корректны и обоснованы. Торгашовым Р.А. в диссертации используется единый подход в исследовании электродинамических характеристик замедляющих систем разных типов, применяется адекватное описание волновых и электронно-волновых процессов. Большое внимание уделяется корректному учету омических потерь, что является особенно важным при рассмотрении процессов распространения электромагнитных волн миллиметрового диапазона.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Полученные в рамках диссертационного исследования результаты безусловно **обладают научной новизной**, которая заключается в получении новых научных знаний об электродинамических процессах в мелкомасштабных волноведущих структурах и особенностях электронно-волновых процессов в приборах О-типа миллиметрового диапазона с ленточными и многолучевыми электронными пучками. Полученные результаты, безусловно, обладают **большой научно-практической значимостью**, поскольку имеют широкие перспективы для разработки на их основе высокоэффективных источников микроволнового излучения нового поколения, а также различных устройств вакуумной микроэлектроники, выполненных на их основе.

Личный вклад автора не вызывает сомнения. Вклад соавторов корректно обозначен в тексте диссертации. Результаты прошли широкую **апробацию** на различных всероссийских и международных конференциях, а также в полной мере опубликованы в виде 12 статей в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, и ряде других публикаций в материалах различных конференций.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. В содержании автореферата изложены основные идеи и результаты диссертации, корректно обозначены научная новизна и научно-практическая значимость. Приведен список публикаций автора по теме диссертации, в которых отражены основные научные результаты.

В качестве основных **недостатков** можно указать следующие:

1. При моделировании процессов двухлучевого электронно-волнового взаимодействия в миниатюрных приборах ЛБВ-О миллиметрового диапазона с планарными меандровыми замедляющими системами и ленточными электронными пучками автором не учитывались многие факторы. К ним следует отнести разброс плотности тока и скорости электронов в пучках при их входе в замедляющую систему, а также несоосность электродов двухлучевой электронно-оптической системы, вызванная нарушением

требуемого теплового режима. Это может привести к некоторым погрешностям при определении выходных характеристик и параметров реальных СВЧ приборов. Однако в работе оценка величин таких погрешностей расчета не приведена.

2. При моделировании электронно-волновых процессов в многорядных ЗС, имеющих вид многоэтажных меандров с несколькими пролетными каналами, также не учитывалось влияние неоднородности распределения тока по отдельным лучам, что в реальном приборе может привести к ухудшению эффективности взаимодействия и возникновению паразитных колебаний.

3. В диссертации рассматриваются в основном низковольтные ЛБВ с неизменными вдоль продольного направления движения ЭП параметрами ЗС. Метод секционирования ЗС в рецензируемой работе применяется исключительно для подавления паразитных колебаний на обратных или высших гармониках. Использование ЗС с изменяющимися вдоль длины прибора параметрами, что обычно является основным способом повышения выходной мощности и электронного КПД ЛБВ, в диссертации не рассматривается.

Тем не менее, приведенные замечания не ставят под сомнение **общий высокий уровень и положительную оценку диссертационной работы**. Выявленные в диссертации Торгашова Р.А. закономерности распространения электромагнитных волн и процессах электронно-волнового взаимодействия в приборах О-типа с пространственно-развитыми электродинамическими структурами и электронными пучками с большим поперечным сечением представляют собой решение актуальной задачи радиофизики - создание источников когерентного электромагнитного излучения, эффективно работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Сформулированные **положения**, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными.

Диссертационная работа «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» **удовлетворяет требованиям** пп.9–11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, **соответствует паспорту специальности 1.3.4. – Радиофизика**, в частности п. 1 и п.3, а её автор Торгашов Роман Антонович **заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.**

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», доктор технических наук (специальность 05.27.02– «Вакуумная и плазменная электроника»), профессор

Царёв Владислав Алексеевич



12 сентября 2024 г.

Место работы: ФГБОУ ВО СГТУ им. Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77
тел.: +7 (8452) 99-88-24
e-mail: tsarev_va@mail.ru

Подпись Царёва Владислава Алексеевича заверяю:
Ученый секретарь Ученого Совета СГТУ имени Гагарина Ю.А.
Потапова Анжелика Владимировна
+7 (8452) 99-87-0
potapovaav@sstu.ru

