

ОТЗЫВ

официального оппонента Федотова Алексея Эдуардовича
на диссертационную работу 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. – «Радиофизика»

Компактные источники широкополосного электромагнитного излучения коротковолновой части миллиметрового диапазона представляют большой интерес для развития современных систем связи, включая системы беспроводной передачи данных поколений 5G и 6G. В ряде случаев мощность устройств твердотельной электроники оказывается недостаточной для этих приложений, поэтому в последние годы активно исследуются возможности совершенствования миниатюрных ламп бегущей волны (ЛБВ) указанного диапазона с целью увеличения их мощности и расширения полосы рабочих частот. Одним из наиболее актуальных методов повышения мощности является увеличение рабочего тока приборов за счет использования пространственно-развитых электронных пучков с умеренной плотностью тока, в частности ленточных пучков, а также за счет применения многолучевых систем с несколькими пучками. Оба этих направления требуют разработки новых вариантов замедляющих систем (ЗС), обеспечивающих эффективное и селективное взаимодействие всех электронов одного или нескольких пучков с рабочей волной. Именно такие замедляющие системы и лампы бегущей волны на их основе предлагаются и исследуются в диссертации Р.А. Торгашова. Таким образом, тема диссертации является актуальной и практически значимой для современной радиофизики и СВЧ электроники.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. В первой главе приведены результаты исследования характеристик низковольтных ламп бегущей и обратной волны V-, W- и D-диапазонов (частоты от 50 до 150 ГГц) с микрополосковыми замедляющими системами на диэлектрических подложках. С помощью современных программных пакетов трехмерного электромагнитного моделирования исследуется влияние геометрических параметров ЗС на их дисперсионные характеристики, сопротивление свя-

зи и величину затухания волны. Описываются результаты моделирования электронно-волнового взаимодействия и оптимизация параметров ЗС с целью повышения выходной мощности и подавления самовозбуждения в ЛБВ нежелательных мод. Также в первой главе сравниваются методы расчета омических потерь в тонкопленочных микрополосковых структурах. Описывается разработанная конструкция устройств согласования ЗС с подводными волноводами, которая позволила провести измерения электродинамических характеристик изготовленных замедляющих систем и сравнить полученные результаты с расчетами, продемонстрировав их хорошее соответствие.

Во второй главе представлены результаты разработки новых конструкций планарных замедляющих систем типа «меандр» для двухлучевых ЛБВ миллиметрового диапазона. В первой из рассмотренных систем, имеющей вид двух связанных меандров на диэлектрической подложке, используются два расположенных в одной плоскости ленточных электронных пучка, в то время как вторая система (меандр с металлическими опорами) рассчитана на использование двух пучков, расположенных один над другим. В главе показано, что использование двухлучевых систем позволяет примерно вдвое повысить выходную мощность по сравнению с однолучевыми ЛБВ. Важным результатом является демонстрация возможности значительного снижения плотности тока для ЗС типа «меандр с металлическими опорами» по сравнению с меандром на диэлектрической подложке, однако последняя обеспечивает возможность работы при более низких напряжениях.

В третьей главе описаны исследования многорядных замедляющих систем типа «многоэтажный меандр» для многолучевых ЛБВ. Рассмотрены случаи двух- и четырехлучевых систем. Приведенные результаты показывают, что выходная мощность растет примерно пропорционально числу пучков при близких рабочих напряжениях и токах в каждом пучке. В главе показывается, что, несмотря на появление в таких системах дополнительных поперечных мод, возможно обеспечить селективное взаимодействие пучка с низшей рабочей модой, хотя при этом требуется разработка более сложных узлов согласования ЗС с входным и выходным волноводами.

Полученные в диссертации результаты являются оригинальными и представляют научный и практический интерес. Автором использованы дополняющие и уточняющие друг друга методы, результаты которых находятся в хорошем соответствии друг с другом. Ряд расчетов подтверждается проведенными экспериментальными измерениями парамет-

ров изготовленных образцов замедляющих структур. По моему мнению, полученные результаты представляют собой заметное продвижение в области разработки миниатюрных широкополосных источников излучения коротковолновой части миллиметрового диапазона.

К тексту диссертации имеется ряд вопросов и замечаний:

1) В диссертации было бы уместно провести обсуждение области, в которой исследуемые приборы могли бы быть конкурентоспособными по сравнению как с устройствами твердотельной электроники, так и с другими лампами бегущей волны. В частности, выходная мощность современных полупроводниковых усилителей уже превосходит рассчитанную мощность рассмотренных в разделе 1.7 низковольтных ЛОВ. Также за последние несколько лет были опубликованы результаты экспериментальных исследований ряда ЛБВ коротковолновой части миллиметрового диапазона с замедляющими системами типа «петляющий волновод» (с тонкими цилиндрическими пучками) и «двойная сдвинутая гребенка» (с ленточными пучками). Сравнение с этими результатами позволило бы лучше понять возможную область применения исследуемых приборов.

2) В работе несколько раз не вполне корректно утверждается, что ЗС с однородным распределением продольной компоненты поля в области пролетных каналов обеспечивают высокие значения сопротивления связи и однородное взаимодействие ЭП с бегущей электромагнитной волной (например, на стр. 14 во Введении). Однако для взаимодействия электронного пучка с волной важна амплитуда синхронной пространственной гармоники продольного высокочастотного поля, поперечная структура которой, вообще говоря, может отличаться от структуры полного продольного поля. Впрочем, во всех расчетах в работе использованы корректные величины, так что данная неточность формулировки не влияет на полученные результаты.

3) Из приведенного описания процедуры моделирования электронно-волнового взаимодействия на основе нелинейной теории ЛБВ в разделе 1.4.1 неясно, решались ли отдельно уравнения движения для разных электронов, располагающихся в различных местах по поперечному сечению пучка. В правой части уравнения возбуждения волны (1.14) отсутствует усреднение по сечению пучка, которое, по-видимому, должно там стоять.

4) В диссертации не обсуждается вопрос формирования требуемых ленточных электронных пучков, однако параметры таких пучков могут существенно влиять на характеристики ЛБВ. В частности, в приведенных расчетах не учитывались возможные пульсации краев пучка, которые могут заметно ухудшать токопрохождение и влиять на эффективность электронно-волнового взаимодействия. Впрочем, данное замечание является скорее не указанием на недостаток работы, а пожеланием к направлению дальнейших исследований.

5) В разделе 2.2.1 не объяснено, почему в двухсекционной ЛБВ можно получить коэффициент усиления 30 дБ, что заметно превосходит удвоенный коэффициент усиления в односекционной ЛБВ с такой же длиной секции (12 дБ).

6) В ЗС типа «двухэтажный меандр», рассмотренной в разделе 3.1.1, можно было бы ожидать расщепления поверхностной волны на три нормальные моды подобно тому, как это происходит в ЗС «четырёхэтажный меандр». Однако в работе не обсуждается такой эффект.

7) Диссертация содержит некоторое количество грамматических ошибок, опечаток и неточностей, которые, впрочем, почти не мешают восприятию текста работы. Например, в формуле (1.19) есть явная опечатка.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. В целом диссертация Р.А. Торгашова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой рассматриваются и решаются актуальные задачи современной радиофизики. Новизна исследования, личный вклад автора и практическая значимость полученных результатов не вызывают сомнений. Основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. По результатам диссертации опубликованы 57 работ, в том числе 12 статей в российских и международных журналах, включая IEEE Electron Device Letters, IEEE Transactions on Electron Devices, Журнал технической физики, Письма в Журнал технической физики, Радиотехника и электроника, Известия ВУЗов. Радиофизика и Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. Все журналы входят в список изданий, рекомендуемых ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций. Кроме того, полученные результаты прошли широкую апробацию на многочисленных всероссийских и международных конференциях, включая представительные Международную конференцию по ва-

куумной электронике (IVEC) и Международную конференцию по инфракрасным, миллиметровым и терагерцовым волнам (IRMmW-THz). Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертационной работы полностью отвечает специальности 1.3.4.—«Радиофизика».

Считаю, что диссертационная работа в полной мере удовлетворяет всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Торгашов Роман Антонович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».

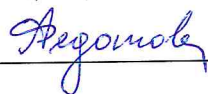
Официальный оппонент:

Федотов Алексей Эдуардович

к.ф.–м.н. (специальность 01.04.04), старший научный сотрудник отдела высокочастотной релятивистской электроники ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

e-mail: fedotov@appl.sci-nnov.ru

Тел. 8(831)416-06-37



« 4 » октября 2024 г.

Подпись А.Э. Федотова заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН,

к.ф.-м.н.





И.В. Корюкин