

*На правах рукописи*

КАРЕТНИКОВА Татьяна Андреевна

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАМЕДЛЯЮЩИХ  
СИСТЕМАХ ТИПА ПЛОСКИХ ГРЕБЕНОК И  
ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ  
ПОТОКОМ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

01.04.03–Радиофизика  
01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2016

Работа выполнена на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

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

Официальные оппоненты: **Комаров Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, начальник научно-технического центра, АО «НПП «Торий», г. Москва

**Ильина Елена Моисеевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится 22 декабря 2016 года в 15<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус, БФА.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Аникин В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время одной из основных задач радиофизики и электроники является освоение терагерцевого (0.1–1.0 ТГц) диапазона частот. Компактные источники ТГц излучения средней мощности могут найти широкое применение в таких областях, как безопасность и противодействие терроризму (поиск и обнаружение взрывчатых веществ), информационно-коммуникационные системы, радиоастрономия, спектроскопия, медицина, реставрация произведений искусства, бесконтактный контроль качества производства. Это обусловлено рядом фундаментальных особенностей ТГц-излучения: в данном диапазоне лежат колебательные и вращательные спектры многих веществ; широкий диапазон частот привлекателен для систем передачи информации; ТГц излучение обладает высокой проникающей способностью и позволяет получать контрастное изображение, но в то же время обладает гораздо меньшим ионизирующим воздействием, чем рентгеновское излучение<sup>1</sup>. Таким образом, создание относительно мощных (1-10 Вт) миниатюрных источников когерентного ТГц излучения будет иметь огромное значение.

Основной проблемой при разработке вакуумных приборов ТГц диапазона является необходимость использовать электронные пучки (ЭП) с чрезвычайно высокой плотностью тока ввиду уменьшения поперечных размеров. В ряде случаев внутри пространства взаимодействия требуется плотность тока до 400-500 А/см<sup>2</sup>, что является трудно достижимым для современных термокатодов. Поэтому привлекли интерес приборы, в которых используются пространственно-развитые электродинамические системы и ЭП с большим поперечным сечением. В частности, во многих работах обсуждаются перспективы создания приборов с ленточными ЭП и замедляющими системами (ЗС) типа плоских гребенок. Отметим, что в США эти исследования в течение последних лет велись в рамках приоритетной Национальной программы HiFIVE (High Frequency Integrated Vacuum Electronics). Программа выполняется одним из подразделений Агентства перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA). Она направлена на создание интегральной конструкции вакуумного усилителя для мощных СВЧ передатчиков, работающих в диапазоне 220 ГГц с выходной мощностью более 50 Вт и полосой частот свыше 5 ГГц.

Согласно теоретическим оценкам, ЛБВ-усилители с ленточным электронным пучком позволяют получить мощность свыше 100 Ватт на длине

---

<sup>1</sup> Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002. Vol. 50. No. 3. P. 910-928.

Linfield E. Terahertz applications: a source of fresh hope // Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. P 257–258;

Federici J., Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 107. No. 11. 111101

Fan Sh., He Y., Ung B.S., Pickwell-MacPherson E. The growth of biomedical terahertz research // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. No. 37. 374009.

волны 1-3 мм. Однако ряд ключевых проблем до сих пор не нашел своего решения и работающие образцы приборов в этом частотном диапазоне до сих пор не созданы.

Основным инструментом теоретического анализа вакуумных усилителей и генераторов ТГц диапазона в настоящее время являются мощные универсальные программные пакеты 3D моделирования, такие как MAGIC, KARAT, CST Studio, UNIPIC и др.<sup>2</sup>, основанные на непосредственном решении уравнений Максвелла методом конечных разностей или конечных элементов и методе «частиц в ячейках» (PIC) для моделирования динамики электронного пучка. Однако они требуют значительных вычислительных ресурсов (например, расчет процесса длительностью 5-10 нс на современных персональных компьютерах может занимать 40-50 часов). Провести с их помощью моделирование в широком диапазоне изменения параметров и осуществить оптимизацию прибора не представляется возможным, несмотря на прогресс современной вычислительной техники.

Таким образом, весьма актуальной задачей является теоретический анализ приборов коротковолновой части СВЧ диапазона с ленточным электронным пучком и замедляющей системой в виде плоских гребенок, в том числе, разработка средств компьютерного моделирования подобных приборов, обеспечивающих одновременно высокую точность и малое время расчета.

**Цель диссертационной работы** состоит в установлении физических особенностей распространения электромагнитных волн в ЗС типа сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе в терагерцевом диапазоне частот и выяснении перспектив создания на основе такой системы ЛБВ-усилителя с ленточным электронным пучком на частоте 0.2 ТГц с выходной мощностью 10-100 Вт. Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Разработка методики, алгоритмов и программ оперативного расчета электродинамических параметров ЗС типа плоских гребенок.
2. Исследование свойств собственных мод ЗС в виде одиночной и сдвоенной гребенок при изменении параметров системы.
3. Нахождение оптимизированных параметров ЗС в виде сдвоенной гребенки для обеспечения максимальных значений сопротивления связи и ширины полосы при заданных ограничениях на геометрические размеры системы и электрические параметры электронного пучка.
4. Разработка методики, алгоритмов и программы моделирования много-секционной ЛБВ в режиме малого сигнала.

---

<sup>2</sup> Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G. User-configurable MAGIC code for electromagnetic PIC calculations // Comput. Phys. Commun. 1995. Vol. 87. P. 54-86.  
Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA, Berkley Research, 1992.  
Wang J., Zhang D., Liu Ch., Li Y., Wang Y., Wang H., Qiao H., Li X. UNIPIC code for simulations of high power microwave devices // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16. No. 3. 033108.  
CST Microwave Studio – 3D EM simulation software. Computer Simulation Technology, Wellesley Hills. MA, USA. [Online]. Available: <http://www.cst.com/Products/CSTS2>.

5. Расчет выходных характеристик ЛБВ-усилителя диапазона 0.2 ТГц с ленточным электронным пучком и ЗС в виде сдвоенной гребенки. Нахождение коэффициента усиления в режиме малого и большого сигналов, определение выходной мощности в режиме насыщения.

**Научная новизна результатов работы** заключается в следующем:

1. Развита методика моделирования электродинамических характеристик ЗС типа плоской гребенки в прямоугольном волноводе, основанная на методе интегрального уравнения. Этот метод впервые применяется для расчета замедляющей системы типа сдвоенной гребенки. Предложен способ учета сингулярности полей на ребрах гребенки, позволяющий значительно повысить точность найденного решения и обеспечивающий его единственность. Разработана программа компьютерного моделирования, позволяющая рассчитывать электродинамические характеристики ЗС, в том числе, для затухающих и комплексных мод. Программа не уступает по точности современным пакетам 3D моделирования и превосходит их по быстродействию в 50-100 раз, в зависимости от близости расчетной точки к границам полос непропускания.

2. Развита методика расчета затухания в периодической структуре, основанная на теории возмущений и являющаяся обобщением подхода для расчета затухания в гладком волноводе.

3. Впервые подробно исследовано влияние основных параметров (высота пролетного канала, период ЗС, толщина и высота штырей гребенок) на электродинамические характеристики ЗС в виде двойной гребенки, помещенной в прямоугольный волновод. В результате проведенных расчетов предложена оптимизированная (с учетом технологических ограничений) геометрия ЗС, обеспечивающая в диапазоне 0.2 ТГц ширину полосы пропускания основной моды порядка 70 ГГц, сопротивление связи порядка 1 Ом.

4. Развита методика расчета линейных режимов работы широкополосного многосекционного ЛБВ-усилителя с использованием аппарата матриц передачи. Методика позволяет учитывать отражения как от границ секций, так и от вывода энергии. На основе развитой методики разработаны алгоритмы и создана программа моделирования.

5. Впервые подробно исследованы режимы усиления сигнала в ЛБВ диапазона 0.2 ТГц с ЗС типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком и с напряжением 20 кВ и током 100 мА. Найдены параметры прибора, при которых обеспечивается усиление в режиме малого сигнала свыше 20 дБ и мощность в режиме насыщения 80-100 Вт.

**Положения и результаты, выносимые на защиту.**

1. Учет сингулярного поведения компонент электромагнитного поля на ребрах гребенки в соответствии с условиями Мейкснера обеспечивает единственность решения системы интегральных уравнений, описывающих собственные моды в ЗС типа сдвоенная гребенка в прямоугольном волноводе. Разработанные с учетом этих условий алгоритм и программа расчета основных электродинамических характеристик ЗС указанного типа улучшают сходимость

и превосходят по быстродействию в 50-100 раз современные коммерческие 3D-пакеты моделирования электромагнитных полей.

2. В замедляющей системе со сдвигом гребенок на половину периода обеспечивается наибольшая ширина полосы пропускания за счет смыкания полос пропускания двух собственных мод, а также наибольшее сопротивление связи на +1-й пространственной гармонике. Сопротивление связи такой системы увеличивается при уменьшении высоты канала и толщины штыря, а также при увеличении периода и высоты штыря. Полоса пропускания расширяется при уменьшении высоты канала и высоты штыря, а период системы и толщина штыря на нее влияют незначительно.

3. Выбранные в соответствии с проведенными расчетами геометрические размеры ЗС типа сдвоенной гребенки позволяют получить в ЛБВ с ленточным электронным пучком, имеющим напряжение 20 кВ и плотность тока не более 100 А/см<sup>2</sup>, коэффициент усиления 15-25 дБ в полосе частот 185-240 ГГц и мощность насыщения 70-100 Вт при длине системы до 40 мм (80 периодов).

4. Разработанные методика, алгоритм и программа расчета линейных режимов работы многосекционной ЛБВ с замедляющими системами различного типа, использующие аппарат матриц передачи, позволяют проводить расчет коэффициента усиления и условий самовозбуждения прибора с учетом взаимодействия электронного пучка со встречным излучением и с учетом отражений сигнала от концов пространства взаимодействия и внутренних неоднородностей.

**Научная и практическая значимость работы.** Представленные в работе результаты могут быть использованы для разработки источников когерентного суб-ТГц излучения с мощностью 10-100 Вт. Разработанная программа моделирования линейных режимов работы ЛБВ может быть использована для расчетов усиления и самовозбуждения в ЛБВ различных типов. Развитая эффективная методика расчета электродинамических характеристик ЗС типа плоских гребенок может быть использована для оптимизации параметров подобных структур.

Результаты, представленные в диссертационной работе, использовались при выполнении НИР, поддержанных грантами РФФИ (№ 16-02-00789, № 16-08-00450, № 14-02-00976, № 13-02-00732, № 13-08-00986, № 10-02-01280), а также при выполнении г/б НИР «Математическое моделирование и экспериментальное исследование сложных нелинейных и переходных процессов в радиофизических, электронных и магнитоэлектронных системах» (2011-2013 гг.) и ОКР «Расчет конструкции и разработка конструкторской документации замедляющей системы лампы бегущей волны сантиметрового диапазона для аппаратуры космических связных ретрансляторов» (2014-2015 гг.) в НИИ Естественных наук Саратовского госуниверситета.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием хорошо апробированных методов моделирования и численных схем, а также хорошим соответствием результатов, полученных с помощью различных подходов. Результаты моделирования электродинамических характеристик ЗС при

помощи разработанной программы и специализированных пакетов трехмерного моделирования полностью согласуются между собой. Результаты расчетов усиления в режиме малого сигнала с помощью разработанной программы хорошо согласуются с приближенным аналитическим решением на основе метода последовательных приближений, а также с расчетами по хорошо апробированной программе моделирования нелинейного режима и с данными, приведенными в литературе.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, представленные в работе, докладывались на Международных и Всероссийских научных конференциях: 41th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves IRMMW-THz 2016 (Copenhagen, Denmark, September 25-30, 2016); 42nd IEEE International Conference on Plasma Science ICOPS 2015 (Belek, Antalya, Turkey, May 24-28, 2015); 10th International Vacuum Electron Sources Conference IVESC 2014 (St.-Petersburg, June 30 – July 4, 2014); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, 2010, 2012, 2014, 2016 гг.); Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2012, 2015 гг.); Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2016 гг.); Международная конференция Saratov Fall Meeting, International Symposium “Optics and Biophotonics” (Саратов, 2015); Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2010–2016 гг.); Школа-конференция «Нелинейные дни для молодых в Саратове» (2009–2012 гг.).

По материалам диссертации опубликована 31 работа, из которых 4 статьи в реферируемых журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК, 10 статей в сборниках трудов конференций, 17 тезисов докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором. Соискателем разработаны методики и алгоритмы моделирования, реализованы компьютерные программы и проведены все численные расчеты.

Постановка задач, определение подходов к их решению, анализ, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем Н.М. Рыскиным и с.н.с. А.Г. Рожневым.

Вклад других соавторов в работах, выполненных совместно, состоит в получении результатов, не вошедших в диссертацию (разработка катода, расчет электронно-оптической системы, технологические исследования по изготовлению замедляющей системы).

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 144 страницы текста, включая 49 рисунков и графиков, 6 таблиц и список литературы из 130 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны её цели, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит краткий обзор современного состояния исследований вакуумных приборов терагерцевого диапазона с замедляющими системами в виде сдвоенных гребенок. Приведены основные результаты теоретических и экспериментальных работ, выполненных в основном в США, Китае и странах Евросоюза. Также в этой главе описаны современные технологии изготовления замедляющих систем для приборов ТГц-диапазона, рассмотрены проблемы транспортировки ленточного электронного пучка с высокой плотностью тока в канале ЗС.

Во **второй главе** развита методика моделирования электродинамических характеристик для ЗС типа сдвоенной гребенки на основе методов интегрального уравнения и частных областей. На рис. 1 показана геометрия ЗС типа сдвоенной гребенки. Структура наносится на широкие стенки прямоугольного волновода.

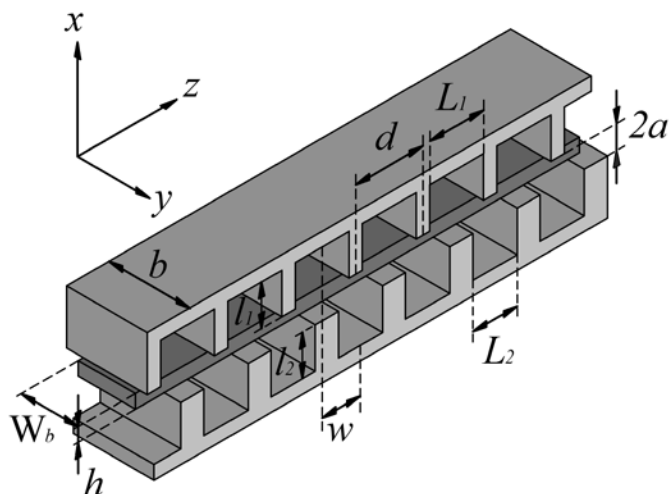


Рис. 1. Схема ЛБВ-усилителя с ЗС в виде сдвоенной гребенки.

Предполагается, что в общем случае гребенка является несимметричной, то есть штыри в верхней и нижней ее части могут иметь различную высоту и толщину, но период обеих гребенок одинаков и равен  $d$ . Сдвиг нижней гребенки относительно верхней равен  $w$ . В направлении  $y$  система считается ограниченной в плоскостях  $y=0$  и  $y=b$ , в которых находятся узкие стенки волновода.

В работе представлен подход, позволяющий корректно учитывать сингулярное поведение полей на острых ребрах штырей гребенки, и, как следствие, повысить точность расчетов, обеспечить единственность решения и уменьшить время счета. Он основан на использовании условия Мейкснера,<sup>3</sup> физический смысл которого заключается в конечности энергии, локализованной в любом ограниченном объеме, содержащем точку сингулярности. При численном решении уравнений электродинамики учет этого условия обеспечивает единственность получаемых результатов при наличии сингулярности. Ранее аналогичный подход использовался для моделирования волноводов со слож-

<sup>3</sup> Meixner J. The behavior of electromagnetic fields at edges // IEEE Trans. Ant. Propag. 1972. Vol. 20. P. 442-446.



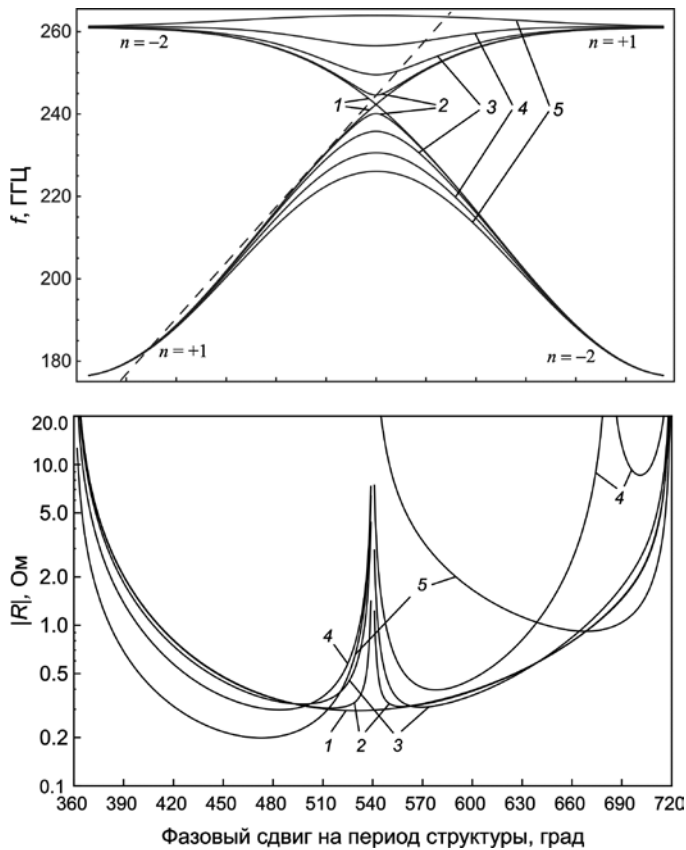


Рис. 2. Дисперсионные характеристики (а) и сопротивление связи прямой гармоники. Кривые 1-5 соответствуют сдвигу гребенок  $w/d$ : 0.5; 0.46; 0.375; 0.25; 0. Штриховой линией показана дисперсионная характеристика электронного пучка, имеющего напряжение  $V_0 = 20$  кВ.

танная программа превосходит их по быстродействию в 50-100 раз, в зависимости от близости расчетной точки к границам полос непропускания.

В **третьей главе** представлены расчеты электродинамических характеристик ЗС типа двойной гребенки в зависимости от геометрических параметров системы. Исследовано влияние высоты пролетного канала, период ЗС, толщины и высоты штырей гребенок, на дисперсию, сопротивление связи и напряжение синхронизма. Определена оптимизированная с учетом технологических ограничений геометрия системы, обеспечивающая ширину полосы пропускания  $\sim 70$  ГГц и сопротивление связи порядка 1 Ом на рабочей пространственной гармонике (Таблица 1).

Исследовано влияние относительного сдвига гребенок и сдвига электронного пучка относительно центра канала. Продемонстрировано возникающее при этом явление разрыва дисперсионных характеристик и образова-

Таблица 1. Оптимизированные размеры ЗС диапазона 0.2 ТГц (все размеры даны в мкм)

Период $d$	500
Ширина резонатора $L_1$	400
Толщина штыря $s$	100
Глубина резонатора $l$	300
Высота канала $2a$	200
Ширина канала $b$	800
Ширина пучка $W_b$	750
Толщина пучка $H_b$	150

ным поперечным сечением, а также различных волноводных неоднородностей<sup>4</sup>. Также в гл. 2 развита методика расчета коэффициента затухания, основанная на применении леммы Лоренца.

Приведены результаты тестовых расчетов, включая расчет затухающих и комплексных волн, которые полностью согласуются с результатами моделирования по трехмерным полностью электромагнитным кодам, однако разрабо-

<sup>4</sup> Заргано Г.Ф., Лерер А.М., Ляпин В.П., Синявский Г.П. Линии передачи сложных сечений. Ростов-на-Дону: РГУ, 1983. 320 с.

Заргано Г.Ф., Ляпин В.П., Михалевский В.С., Синельников Ю.М., Синявский Г.П., Чекрыгина И.М. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь. 1986. 124 с.

ния полосы непропускания между первой и второй собственными модами. На рис 2 представлены дисперсионные характеристики и сопротивление связи прямой гармоники при различном относительном сдвиге гребенок  $w/d$ .

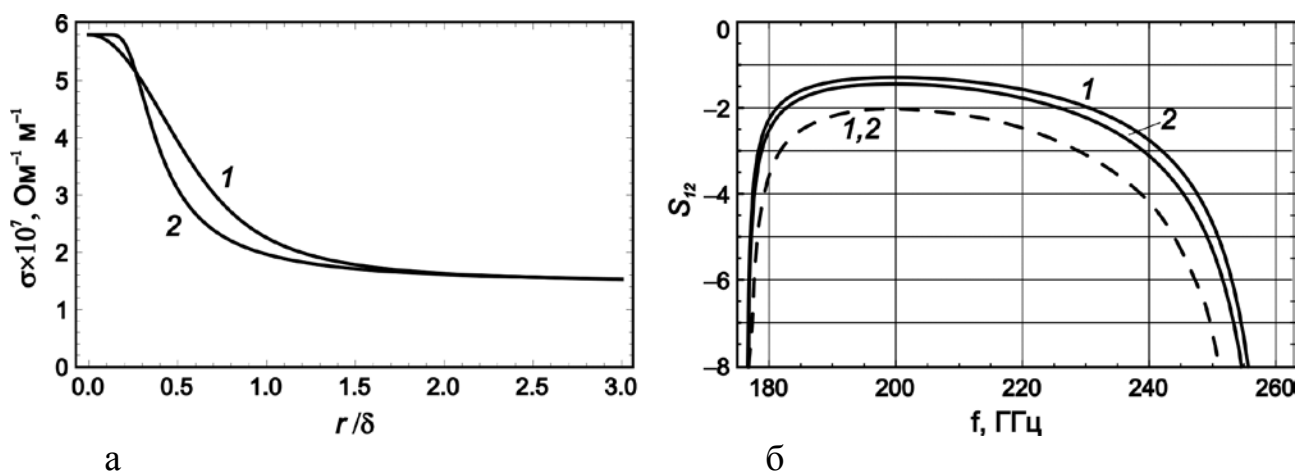


Рис. 3. (а) – Графики зависимости проводимости металла  $\sigma_{eff}$  от отношения среднеквадратичного размера шероховатости к толщине скин-слоя (расчет по формулам (1) и (2)). (б) –  $S$ -параметр для ЗС длиной 80 периодов (40 мм). Сплошные линии соответствуют  $r = 50$  нм, штриховые —  $r = 200$  нм.

На работу приборов ТГц диапазона большое влияние оказывают омические потери. Важным является корректный выбор значения проводимости металла  $\sigma$ , которая определяет величину поверхностного сопротивления. В реальном приборе происходит уменьшение проводимости, обусловленное как нагревом ЗС, так и шероховатостью поверхности. В частности, в литературе предложены формулы для эффективной проводимости  $\sigma_{eff}$ , дающие достаточно хорошее соответствие с данными измерений ТГц диапазоне<sup>5,6</sup>

$$\sigma_{eff} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[ 1.4 \left( \frac{r}{\delta} \right)^2 \right] \right)^{-2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{eff} = \sigma_0 \left( 1 + \exp \left[ - \left( \frac{\delta}{2r} \right)^{1.6} \right] \right)^{-2}, \quad (2)$$

где  $\delta = \sqrt{1/(\mu_0 \omega \sigma_0)}$  — толщина скин-слоя на частоте  $\omega$ ,  $\sigma_0$  — идеальная проводимость металла ( $5.8 \times 10^7$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> для меди),  $r$  — среднеквадратичный размер шероховатости.

<sup>5</sup> Hammerstad E.O. Microstrip handbook / Ed. by F. Bekkadal. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1985. 118 p.

<sup>6</sup> Zheng R., Chen X. Parametric simulation and optimization of cold test properties for a 220 GHz broadband folded waveguide traveling wave tube // J. Infr., Millim. Terahertz Waves. 2009. Vol. 30. No. 9. P. 945–958.

На рис. 3а построены зависимости  $\sigma_{eff}$  от шероховатости, построенные согласно (1) и (2). Видно, что обе формулы предсказывают в целом одинаковое поведение, за исключением того, что зависимость (1) оказывается более плавной. При среднеквадратичных значениях шероховатости  $r = 50$  нм и  $r = 200$  нм параметр  $S_{12}$  (коэффициент прохождения) составляет примерно  $-2$  дБ.

**Четвертая глава** содержит описание методики моделирования линейных режимов работы многосекционной ЛБВ на основе аппарата матриц передачи с учетом как прямого, так и встречного излучения. Рассмотрены особенности моделирования режимов усиления малого сигнала и паразитного самовозбуждения. Представлен алгоритм, позволяющий учитывать неоднородность ЗС и отражения, как концов системы, так и внутренние. Проведены расчеты амплитудно-частотных характеристик для широкополосной многосекционной спиральной ЛБВ диапазона 3-6 ГГц.

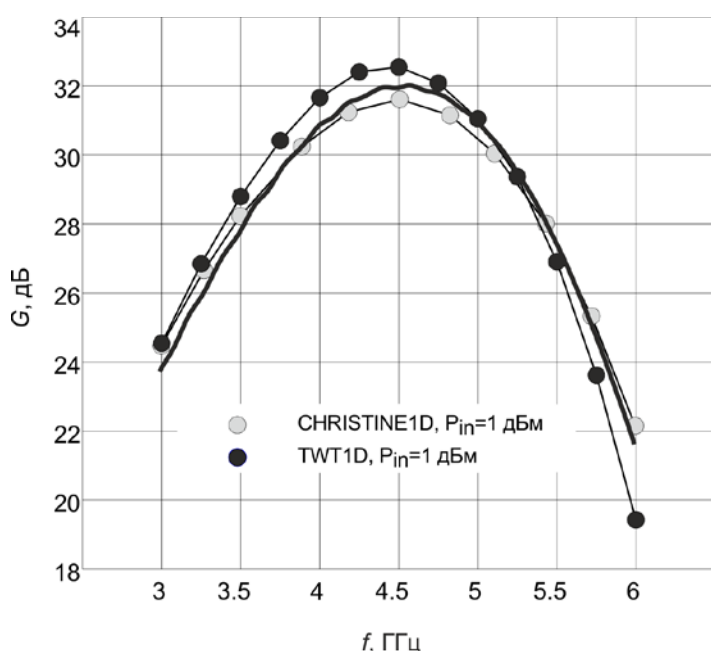


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента усиления от частоты, полученные с помощью программы расчета линейного режима при  $\Gamma=0$  (сплошная линия), а также с помощью программы TWT1D при малой амплитуде входного сигнала (темные кружки) и программы CHRISTINE1D (светлые кружки).

Полученные результаты сопоставлены с расчетами по разработанной в СГУ программе TWT1D,<sup>7</sup> а также с данными расчетов по программе CHRISTINE1D, приведенными в литературе.<sup>8</sup> Они достаточно хорошо согласуются друг с другом (рис. 4). Максимальное отклонение составляет примерно  $1 \div 2$  дБ, что при расчете ЛБВ усилителей является допустимой погрешностью. Таким образом, программа, разработанная в диссертации, позволяет достаточно адекватно моделировать процессы линейного усиления в ЛБВ с учетом неоднородной структуры лампы и отражений от концов системы и внутренних неоднородностей.

В **пятой главе** проводится моделирование режимов усиления для ЛБВ-усилителя диапазона 0.2 ТГц с ленточным пучком и ЗС типа сдвоенной гребенки, сдвинутой на половину периода. В этом случае обеспечивается наиболее широкая полоса пропускания и наибольшее сопротивление связи прямой гар-

<sup>7</sup> Rozhnev A.G., Ryskin, N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., et al. New 2.5D code for modeling of nonlinear multisignal amplification in a wide-band helix traveling wave tube // Fifth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC2004). 2004. Monterey, USA. P.144-145.

<sup>8</sup> Antonsen T.M., Chernin D.P., Cooke S.J., Levush B. Spurious reflection of space charge fields in TWTAs // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52. No. 5. P. 755-763.

моники. Моделирование проводится для ЗС с оптимизированными параметрами, размеры которой приведены в Таблице 1. На рис. 5 приведена дисперсионная диаграмма ЗС. Также на этом рисунке построены дисперсионные характеристики электронного пучка (штриховые линии) при различных значениях напряжения. Видно, что при напряжении 20 кВ обеспечивается синхронизм в центре полосы пропускания.

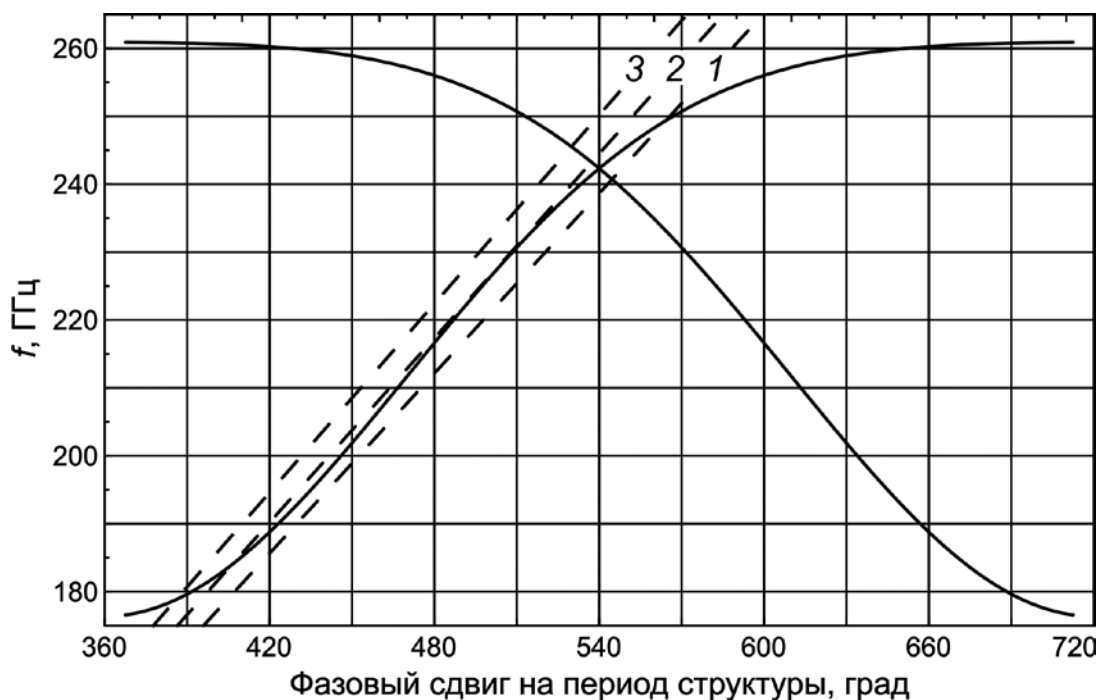
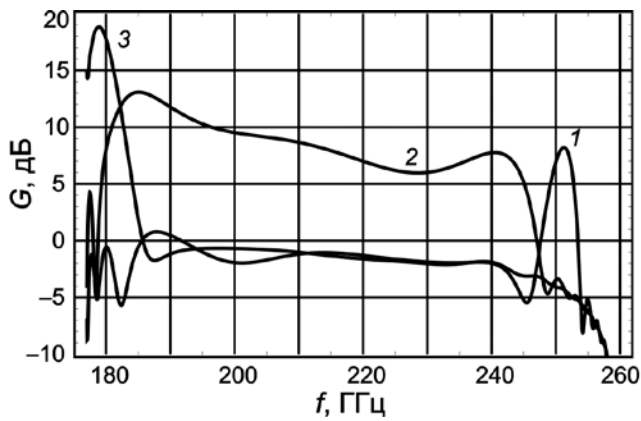


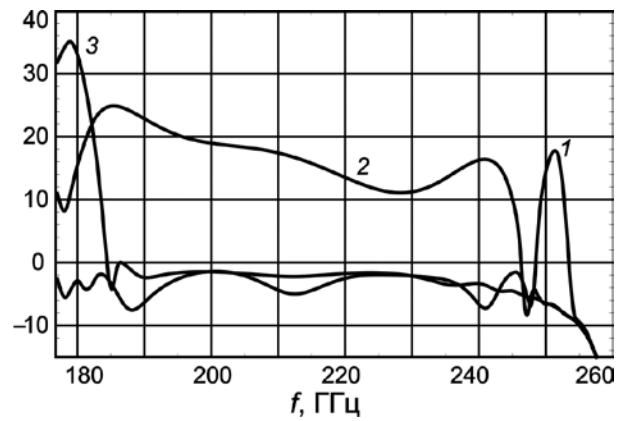
Рис. 5. Дисперсионные характеристики ЗС типа двоянной гребенки сдвинутой на половину периода и электронного пучка при напряжении 19 кВ (линия 1), 20 кВ (линия 2), 21 кВ (линия 3).

Моделирование усиления в режиме малого сигнала проводилось с помощью программы, описанной в гл. 4, в которой учитывается как прямая, так и встречная волна. Однако, как показали расчеты, влияние встречной волны незначительно, что объясняется малым сопротивлением связи соответствующей гармоники. Фактически оно сказывается лишь в близкой окрестности частоты отсечки, ниже 180 ГГц. При расчетах плотность тока пучка не превышала  $100 \text{ A/cm}^2$ , что достижимо для современных термоэмиссионных катодов.

Рассчитаны частотные зависимости коэффициента усиления в режиме малого входного сигнала при различных значениях длины системы и напряжения пучка. Для системы, состоящей из 50 периодов, при токе пучка 0.1 А и напряжении 20 кВ максимальный коэффициент усиления в 12 дБ достигается на частоте 185 ГГц (рис. 6а). Усиление наблюдается в широкой полосе частот, примерно 70 ГГц. Ширина полосы усиления на уровне  $-3 \text{ дБ}$  составляет около 20 ГГц. При увеличении напряжения до 21 кВ область эффективного взаимодействия пучка с полем сильно сужается.

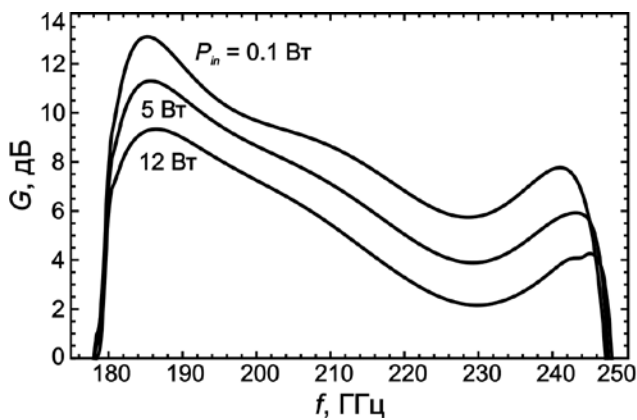


а

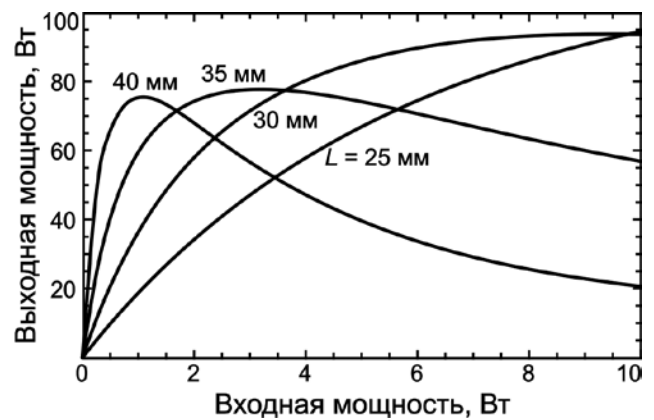


б

Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от частоты при длине системы 25 мм (а) и 40 мм (б). Кривые 1–3 соответствуют напряжению пучка 19, 20 и 21 кВ.



а



б

Рис. 7. (а) Амплитудно-частотные характеристики ЛБВ при различных значениях мощности входного сигнала и длине ЗС 25 мм. (б) Амплитудные характеристик на частоте 185 ГГц при различных длинах ЗС.

На рис. 6а видно, что область, в которой коэффициент усиления положителен, имеет ширину около 5 ГГц. В этом случае максимальное значение коэффициента усиления составляет 19 дБ и наблюдается на частоте 180 ГГц. Увеличение максимального усиления, очевидно, обусловлено повышением сопротивления связи при приближении к частоте отсечки. При увеличении длины системы до 40 мм, что соответствует 80 периодам ЗС, коэффициент усиления значительно возрастает (рис. 6б). При напряжении 20 кВ он превышает 10 дБ в полосе 70 ГГц, при этом форма частотных зависимостей коэффициента усиления качественно не изменяется по сравнению с рис. 6а.

Также представлены расчеты амплитудно-частотных и амплитудных характеристик в нелинейном режиме (рис. 7). Определена мощность насыщения при различных значениях длины ЗС. В целом результаты моделирования показывают, что в исследуемой ЛБВ достижимы величины коэффициента усиления порядка 8-12 дБ и выходные мощности порядка 70-90 Вт на частоте 185 ГГц.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Развита методика расчета электродинамических параметров ЗС типа плоской гребенки в прямоугольном волноводе. Особенностью развитой методики является корректный учет сингулярности полей на ребрах гребенки, что позволяет значительно повысить точность найденного решения при достаточно небольшом количестве слагаемых в рядах и обеспечивает единственность решения. Также развита методика расчета затухания в периодической структуре, основанная на теории возмущений и являющаяся обобщением подхода для расчета затухания в гладком волноводе. На основе развитой методики разработана программа компьютерного моделирования в системе Wolfram Mathematica. Программа позволяет рассчитывать электродинамические характеристики ЗС: дисперсию, сопротивление связи, затухание, в том числе, для затухающих и комплексных мод. Проведены тестовые расчеты, которые показали хорошее соответствие с результатами, представленными в литературе.

2. На основе методики, разработанной в главе 2, проведены расчеты электродинамических характеристик ЗС в виде двойной гребенки, помещенной в прямоугольный волновод. Было исследовано влияние основных параметров (высота пролетного канала, период ЗС, толщина и высота штырей гребенок) на электродинамические характеристики: дисперсию, сопротивление связи, напряжение синхронизма. Оптимальной для использования в ЛБВ-усилителе является система, в которой гребенки сдвинуты на половину периода. В результате проведенных расчетов предложена оптимизированная (с учетом технологических ограничений) геометрия ЗС, обеспечивающая в диапазоне 0.2 ТГц ширину полосы пропускания основной моды порядка 70 ГГц. Усредненное по сечению пучка сопротивление связи рабочей пространственной гармоники сравнительно мало и не превышает 1 Ом.

3. Исследован характер трансформации дисперсионных характеристик и зависимостей сопротивления связи рабочих пространственных гармоник от частоты при изменении относительного положения гребенок. Продемонстрировано возникающее при этом явление разрыва дисперсионных характеристик и образования на оси частот полосы непропускания между первой и второй собственными модами. Проведены расчеты затухания в ЗС с использованием различных известных из литературы эмпирических формул для учета влияния шероховатости, что существенно в ТГц диапазоне. Показано, что при реалистичных значениях шероховатости параметр  $S_{12}$  (коэффициент прохождения) составляет примерно  $-2$  дБ для системы длиной 40 мм (80 периодов).

4. Развита методика расчета линейных режимов работы широкополосного многосекционного ЛБВ-усилителя с использованием аппарата матриц передачи. Представлены уравнения возбуждения для системы, состоящей из произвольного числа однородных участков, разделенных локальными неоднородностями. При этом учитываются отражения как от границ секций, так и от вывода

энергии. Проанализированы особенности применения методики для расчета коэффициента усиления в режиме малого сигнала и условий самовозбуждения. На основе развитой методики разработаны алгоритмы и создана программа моделирования в компьютерной среде Mathematica. Расчеты усиления в режиме малого сигнала показали, что при синхронизме в центре полосы пропускания в режиме малого сигнала в диапазоне 185-240 ГГц для ЗС длиной 25 мм (50 периодов) обеспечивается усиление 10-15 дБ, а для ЗС длиной 40 мм (80 периодов) – 20-25 дБ.

5. При переходе в режим большого сигнала форма зависимости коэффициента усиления от частоты сохраняется, однако нелинейные эффекты приводят к уменьшению коэффициента усиления. Расчеты показали, что мощность в режиме насыщения составляет 80-100 Вт. Однако в системе длиной 25 мм такие значения мощности достигаются при достаточно больших уровнях мощности входного сигнала, порядка 8-10 Ватт. С ростом длины системы мощность входного сигнала, необходимая для перехода в режим насыщения, значительно уменьшается (до 1-2 Вт).

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Каретникова Т.А. Линейная теория многосекционных широкополосных ЛБВ с неоднородной спиральной замедляющей системой // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, №6. С. 148-159.
2. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. вузов. Радиоп физика. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 601-613.
3. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Торгашов И.Г., Сеницын Н.И. Вопросы разработки усилителей и генераторов О-типа субтерагерцевого диапазона частот // Радиотехника, 2014. № 10. С. 46-51.
4. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 1. С. 54-60.
5. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Моделирование электродинамических характеристик замедляющей системы ЛБВ субмиллиметрового диапазона типа гребенка в волноводе с помощью метода интегрального уравнения // Сборник статей Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». С.-Пб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.
6. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д. Моделирование взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем в ЛБВ-усилителе субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенная гребенка // Сборник статей Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. С.-Пб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 113-117.
7. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д. Исследование миниатюрных приборов О-типа терагерцевого диапазона с ленточным электронным потоком // Сборник статей Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. С.-Пб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. С. 177-181.
8. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г. Расчёт коэффициента линейного усиления и условий самовозбуждения неоднородных широкополосных спиральных ЛБВ // В сб. Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010: Материалы международной научно-технич. конф. Саратов, 22-23 сентября 2010. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2010 г. С.44-47.
9. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г. Программа анализа линейных режимов работы неоднородных широкополосных спиральных ЛБВ // В сб. Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2012: Материалы 10-й юбилейной международной научно-технич. конф. Саратов, 19-20 сентября 2012. Саратов: СГТУ, 2012г. С.238-241.



10. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Моделирование замедляющих систем типа плоской гребенки для усилителя бегущей волны с ленточным электронным пучком // «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014». Материалы международной научно-технической конференции. 25-26 сентября 2014 г. Т.1. Саратов: СГТУ, 2014. С. 294-298.
11. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Белов К.В. Анализ усиления в приборах О-типа терагерцевого диапазона с ленточным электронным пучком // «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016». Материалы международной научно-технической конференции. 22-23 сентября 2016 г. Т.1. Саратов: СГТУ, 2016. С. 58-62.
12. Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Электродинамические характеристики замедляющей системы типа сдвоенной гребенки для усилителя субтерагерцевого диапазона с ленточным электронным пучком // Труды всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ электроники». 24-25 октября 2013 г., Москва. М: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 108-111.
13. Бенедик А.И., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Григорьев Ю.А., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Исследование ламп бегущей волны суб-ТГц диапазона с ленточным электронным пучком // Сборник трудов II Всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ электроники» МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва. 2015. С. 58-60.
14. Каретникова Т.А. Теоретическое исследование процессов самовозбуждения и линейного усиления в широкополосных ЛБВ // В сб. Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2009: Сб. мат. научн. школы-конф. Саратов, 16-18 ноября 2009. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2010 г. С. 23-26.
15. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Karetnikova T.A., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D., Bourtsev A.A. Modeling and characterization of a slow-wave structure for a sheet-beam sub-THz TWT amplifier // Proc. 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 21-23 May 2013, Paris, France. 2 p.
16. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D., Bourtsev A.A. Modeling of eigenwaves in single- and double-vane slow-wave structures for sheet-beam sub-THz devices // 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA, April 22-24, 2014. P. 493-494.
17. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D., Bourtsev A.A. Modeling of a sub-THz sheet-beam traveling wave tube amplifier // Proceedings of 10<sup>th</sup> International Vacuum Electron Sources Conference. St-Petersburg, June 30 – July 4, 2014. P. 123-124.
18. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D., Burtsev A.A. Modeling of a sub-THz traveling wave tube with grating slow-wave structure // Strong Microwaves and Terahertz Waves:

Sources and Applications. Proc. 9th International Workshop. Nizhny Novgorod, 2014. P. 241-242.

19. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D., Burtsev A.A. Modeling of a double-grating sub-thz sheet-beam amplifier // 39th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves. Tucson, AZ, USA, September 14-19, 2014. 2 p.
20. Ryskin N.M., Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Bushuev N.A., Shalaev P.D. Development and modeling of a sheet- beam sub-THz traveling wave tube // IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC). 2015, April 27-29. Beijing, China.
21. Karetnikova T.A., Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Shalaev P.D., Burtsev A.A. Development and modeling of a G- band sheet-beam traveling wave tube amplifier with grating slow-wave structure // The 42nd IEEE Int. Conf. on Plasma Sciences (ICOPS). May 24-28, 2015. Belek, Antalya, Turkey.
22. Ryskin N.M., Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Bushuev N.A., Shalaev P.D. Design and simulation of a sub-THz vacuum tube power amplifier // Proceedings of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2015, August 23-28, Gong-Hong, China.
23. Karetnikova T.A., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D. Development and modeling of G-band vacuum tube power amplifiers with sheet electron beam // Proceedings of the 41th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2016, September 25-30, Copenhagen, Denmark. 2 p.
24. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Григорьев Ю.А., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Исследование и разработка усилителя О-типа субтерагерцового диапазона с ленточным электронным пучком // Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. 2-7 февраля 2015 г. Саратов. — Саратов: ООО «Издательский центр «Наука», 2015. С. 20.
25. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны диапазона 0.2 ТГц // IX Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Тез. докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2013. С. 68-69.

Научное издание

КАРЕТНИКОВА Татьяна Андреевна

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ВОЛН В ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ТИПА ПЛОСКИХ  
ГРЕБЕНОК И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЛЕНТОЧНЫМ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ  
В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика  
01.04.04 – Физическая электроника

Автореферат

---

Подписано в печать «\_\_» октября 2016 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.  
Тираж 100 экз. Заказ № 31-Т

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
Типография СГУ  
410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, 112а, корпус 8