

На правах рукописи



НАВРОЦКИЙ ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ  
С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА  
ДЛЯ ПРИБОРОВ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
СУБТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА**

1.3.5. – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

**Саратов – 2022**

Работа выполнена на кафедре динамических систем ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и в АО «НПП «Алмаз», г. Саратов.

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

Официальные оппоненты: **Морев Сергей Павлович**  
доктор физико-математических наук, эксперт научно-технической сферы АО «Научно-производственное предприятие «Исток» им. А.И. Шокина», г. Фрязино

**Соминский Геннадий Гиршевич**  
доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Защита состоится «28» октября 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 10 корпус, аудитория 511

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-navrockogo-igorya>

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Сысоев Илья Вячеславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Одной из важнейших задач современной вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является создание миниатюрных усилителей и генераторов, функционирующих в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом (терагерцевом) диапазонах<sup>1</sup>. Ожидается, что подобные приборы станут основой нового поколения радиоэлектронной аппаратуры. Создание приборов миллиметрового и ТГц диапазона основано на современных технологических процессах (микрофрезерование, глубокая ультрафиолетовая литография, глубокое ионное травление и др.<sup>2</sup>) и на использовании современных пакетов 3D моделирования, позволяющих повысить точность расчетов и оптимизировать конструкцию устройства. Компьютерное моделирование электронно-оптических систем (ЭОС), электродинамических структур, анализ процессов электронно-волнового взаимодействия позволяют создавать СВЧ приборы с требуемыми выходными характеристиками.

Среди различных электровакуумных приборов для ряда приложений, прежде всего, для нового поколения информационно-телекоммуникационных систем, наибольший интерес представляют широкополосные усилители типа лампы бегущей волны (ЛБВ). Известно, что при переходе в ТГц диапазон для сохранения выходной мощности ЛБВ-усилителя необходимо уменьшать размеры электродинамических узлов пропорционально длине волны и одновременно увеличивать ускоряющее напряжение для поддержания синхронизма электронного пучка (ЭП) с волной. При этом плотность тока в ЭП должна увеличиваться пропорционально квадрату частоты<sup>3</sup>. Поэтому большое внимание привлекли ЭОС с пространственно-развитыми электронными пучками, в частности, ленточными и многолучевыми.

В связи с этим, в настоящее время особенно актуальна задача по разработке ЭОС для приборов ТГц диапазона. ЭОС включает в себя электронную пушку, пролетный канал, коллектор, магнитно-фокусирующую систему. Существенный вклад в развитие физических принципов разработки вакуумных СВЧ приборов и теории формирования пучков внесли, в частности, такие отечественные ученые, как Акимов П.И., Алямовский И.В., Гамаюнов Ю.Г., Гершензон Е.М., Григорьев Ю.А., Мещанов В.П., Морев С.П., Мясин Е.А., Овчаров В.Т., Олейников В.И., Пензяков В.В., Соминский Г.Г., Сыровой В.А., Трубецков Д.И. и другие.

Создание новых миниатюрных ЭОС с плотностью тока  $100 \text{ А/см}^2$  и более для приборов ТГц диапазона требует решения целого ряда

---

<sup>1</sup> Grigoriev A.D. Microwave Electronics / A.D. Grigoriev, V.A. Ivanov, S.I. Molokovsky; edited by A.D. Grigoriev – Springer: Springer Series in Advanced Microelectronics. 2018. 584 p.

<sup>2</sup>Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., et al. Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. -2011. -Vol. 1. -No. 1. -P. 54-75.

<sup>3</sup> Викулов И.К. Вакуумная СВЧ-электроника в 2010 году: к миллиметровому и терагерцевому диапазонам // Электроника НТБ. - 2011. -№2. - С. 108-119.

взаимосвязанных научно-технических задач, в том числе, исследования формирования траекторий электронных пучков в ЭОС и создания перспективных магнитно-фокусирующих систем с повышенной однородностью магнитного поля. Решением подобных задач занимаются многие зарубежные корпорации и научные учреждения, например, University of California Davis (США), US Naval Research Laboratory (США), Northrop Grumman (США), CPI (США, Канада), L-3 Communications (США), Beijing Vacuum Electronics Research Institute (Пекин, Китай), University of Electronics Science and Technology (Chengdu, Китай), Thales Electron Devices (Франция), Paul Scherrer Institut (Швейцария) и др. В нашей стране разработки подобного рода проводит, в частности АО «НПП «Исток», где созданы лампы обратной волны (ЛОВ), перекрывающие значительную часть ТГц диапазона<sup>4</sup>. Однако стоит отметить, что коммерчески реализуемые ЛБВ в ТГц диапазоне до сих пор отсутствуют.

По сравнению с классическими СВЧ приборами, в миниатюрных суб-ТГц и ТГц усилителях напряжения анода и ЗС могут достигать 15–20 кВ, а ток пучка составляет порядка 10-100 мА, т.е. такой пучок является низкоперевансным. Плотность тока в канале таких приборов обычно принимает чрезвычайно высокие значения порядка сотен А/см<sup>2</sup>. Поэтому для повышения стабильности и долговечности прибора целесообразно снижать плотность тока эмиссии с поверхности катода, чего можно достичь при помощи компрессии пучка. Однако пушки с компрессией формируют потоки со значительным разбросом электронов по скоростям, что создает проблемы с фокусировкой пучка в микроразмерном канале. Кроме того, существенную роль играют абберрации, возникающие в пушке из-за сложной структуры фокусирующих полей, а также из-за собственного пространственного заряда пучка. Известно, что интенсивные пространственно-развитые электронные пучки (например, ленточные и трубчатые), подвержены диокотронной неустойчивости, обусловленной дрейфом электронов в скрещенных полях — собственном поперечном электрическом поле пространственного заряда и внешнем продольном магнитном фокусирующем поле<sup>5</sup>. Диокотронная неустойчивость вызывает деформацию пучка и его осаждение на стенки канала. Следовательно, задача по исследованию ЭОС, в которой будет обеспечиваться формирование пространственно-развитого ЭП и его и устойчивая транспортировка на расстояния, необходимые для получения требуемой выходной мощности и усиления, является актуальной.

**Целью работы** является разработка систем формирования низкоперевансных пространственно-развитых ленточных электронных пучков для приборов вакуумной электроники О-типа диапазона 0.1–0.2 ТГц.

Для достижения поставленных целей в работе были решены следующие **основные задачи**:

---

<sup>4</sup>Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев К.С. Под ред. Н.Д. Девяткова. Лампы обратной волны миллиметрового диапазона и субмиллиметрового диапазона длин волн. М.: Радио и связь. 1985. 135 с..

<sup>5</sup> Pierce J.R. Instability of hollow beams // IRE Trans. Electron Dev. 1956. -Vol. 3. -No. 4. -P. 183-189.

1. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование характеристик электронной пушки, формирующей сходящийся ленточный ЭП с током 0.1 А, первеансом менее  $0.1 \times 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup> и толщиной 100 мкм.

2. Анализ транспортировки ленточного ЭП при фокусировке однородным магнитным полем, включая исследование токопрохождения при различных нарушениях оптической симметрии и сдвигах.

3. Анализ транспортировки ленточного ЭП при фокусировке реверсным магнитным полем, сопоставление с результатами исследования при фокусировке однородным магнитным полем.

4. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование электронной пушки с компрессией многолучевого ленточного пучка с первеансом менее  $0.1 \times 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup>.

**Научная новизна** работы. Все результаты, включенные в диссертацию, являются новыми, в частности:

1. Разработана новая конструкция электронной пушки с первеансом менее  $0.1 \times 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup> и компрессией ленточного ЭП ~ 16 единиц по площади. Пушка содержит фокусирующий электрод, представляющий собой четыре лепестка, и катод с размерами 0.8 мм×0.8 мм.

2. При помощи пакета CST Studio исследован процесс транспортировки низкопервеансного ленточного ЭП с компрессией в однородном магнитном поле в канале микроразмерной ЗС. Исследована сложная структура пучка в виде ядра и диффузной переходной области (гало), которая частично осаждается на стенки канала. Плотность частиц в этой области мала, вследствие чего на всей протяженности системы сохраняется высокое токопрохождение.

3. Разработана ЭОС с компрессией интенсивного ленточного пучка магнитной фокусирующей системой с реверсным полем. Показано, что введение реверсного магнитного поля позволяет уменьшить влияние диокотронной неустойчивости.

4. Предложена новая конструкция электронной пушки, формирующая пучок, состоящий из трех парциальных лучей эллиптического сечения. Пушка содержит три планарных эллиптических катодных выступа, закрытых с торцов теневой сеткой, и диафрагму с тремя эллиптическими отверстиями, которые обеспечивают компрессию до 16 единиц по площади.

5. Предложена оригинальная методика, позволяющая создавать многолучевую электронную микропушку с эллиптическими катодами, расположенными в ряд. Методика позволяет повысить точность формирования отверстий в ее электродах. Пушка, созданная при помощи данной методики, защищена патентом РФ № 179616.

6. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с катодом размером 0.1×0.7 мм<sup>2</sup> и плотностью токоотбора более 100 А/см<sup>2</sup>, формирующая прямоточный ленточный электронный пучок с током до 80 мА.

7. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с фокусирующим электродом сложной формы, формирующая ленточный ЭП с током до 135 мА. При помощи диафрагмы-анализатора проведены измерения распределения плотности тока в пучке, подтверждающие высокую компрессию пучка в вертикальном направлении.

8. Изготовлены макеты замедляющих систем миллиметрового диапазона типа «сдвоенная гребенка» и многоэтажной меандровой структуры.

**Научно-практическая значимость** работы. Результаты диссертации предназначены для использования при создании компактных широкополосных ЛБВ-усилителей диапазона 0.1-0.2 ТГц с выходной мощностью 10-100 Вт.

Результаты моделирования и экспериментального исследования электронно-оптических систем ЛБВ использованы на АО «НПП «Алмаз» (г. Саратов) в процессе выполнения опытно-конструкторской работы «Пагода-Постулат», что позволило изготовить и испытать образцы электронных пушек, а также повысить плотность тока в пролетном канале создаваемого прототипа прибора и увеличить токопрохождение.

Результаты работы использовались при проведении НИР, поддержанных грантом Фонда содействия инновациям (УМНИК-2015, Договор № 6196 ГУ/2015), грантом РФФИ № 17-12-01160, грантами РФФИ № 20-57-12001, № 19-58-45040, № 16-08-00450.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается их соответствием фундаментальным принципам и закономерностям физической электроники. Моделирование электронно-оптических систем проводилось с помощью хорошо апробированных программных пакетов CST Particle Studio Simulator и Lorentz-3EM. Результаты моделирования ЭОС, полученные с помощью различных программных комплексов, хорошо согласуются друг с другом. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с данными численного моделирования. Экспериментальные исследования электронных пушек и макетов ЭОС проводилось при помощи апробированных методов исследования и аттестованной аппаратуры.

**Основные научные положения**, выносимые на защиту:

1. Разработанная электронно-оптическая система обеспечивает формирование ленточного электронного пучка с первеансом менее  $0.1 \times 10^{-6}$  А/В<sup>3/2</sup>, характерной толщиной менее 0.1 мм, компрессией до 16 единиц и током свыше 100 мА при средней плотности тока на катоде 15.6 А/см<sup>2</sup>, а в области кроссовера — более 200 А/см<sup>2</sup>.

2. Ленточный электронный пучок, формируемый в разработанной электронно-оптической системе с высокой компрессией, имеет сложную структуру, которая включает высокоплотную центральную часть (ядро) и краевую низкоплотную диффузную область (гало), при этом оседание частиц низкоплотной диффузной области на стенки канала в процессе транспортировки пучка составляет не более 1%.

3. Разработанная электронная пушка, содержащая планарный катод в виде трех выступов эллиптической формы, теньевую сетку и планарную фокусирующую диафрагму с тремя эллиптическими отверстиями, формирует трёхлучевой электронный пучок с первеансом  $0.3 \div 0.6 \times 10^{-7}$  А/В<sup>3/2</sup>, толщиной менее 0.1 мм с компрессией до 16 единиц по площади.

4. Многолучевой электронный пучок с эллиптической формой лучей, создаваемый пушкой с высокой компрессией, при транспортировке в однородном магнитном поле 1.345 Тл распространяется в канале высотой 0.1 мм на расстояние не менее 25 мм без существенных деформаций и токооседания.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты в диссертационной работе получены автором лично: проведены численные эксперименты, разработаны и собраны исследуемые образцы электронных пушек и макет ЭОС, проведено их экспериментальное исследование. Постановка задач исследования, поиск пути их решения осуществлялась совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Рыскиным Н.М., а также с д.ф.-м.н., профессором Григорьевым Ю.А. и к.т.н. Бурцевым А.А. Вклад других соавторов отмечается в соответствующих местах по тексту диссертации.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях:

- Научно-техническая конференция, посвященная 55-летию ОАО «НПП «Алмаз» «Электронные приборы и устройства СВЧ» (Саратов, 2012);
- Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП (Саратов, 2012-2020);
- 11 Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия». (МАТИ, Москва, 2012);
- Юбилейная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 70-летию ФГУП «НПП «Исток» (Фрязино, 2013);
- Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2013);
- International Vacuum Electron Sources Conference IVESC (С.-Петербург, 2014);
- Научно-техническая конференция, посвященная 60-летию ОАО «НПП «Алмаз» (Саратов, 2017);
- Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT) 2017 Liverpool, UK, 11-13 September 2017;
- VIII Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019);
- 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 27-30 April 2021 (Virtual);

- 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 29 Aug.-3 Sept. 2021. Chengdu, China (Virtual).

По результатам диссертации опубликовано 36 работ, из них 6 статьей в рецензируемых научных журналах, индексируемых базах данных Web of Science и/или Scopus, 3 статьи в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, 20 работ в материалах международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, 6 работ в сборниках трудов всероссийских конференций и 1 патент РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения, содержит 140 страниц текста, включая иллюстрации и таблицы. Список литературы включает 134 наименования.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** характеризует актуальность темы диссертации, цели работы, положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость работы, а также апробацию полученных результатов.

**Глава 1** содержит результаты анализа современного состояния исследований электронных пушек и ЭОС для вакуумных приборов терагерцевого диапазона, а также результаты моделирования ЭОС с компрессией ленточного электронного пучка. В разделе 1.1 обсуждаются проблемы разработки и применения вакуумных приборов О-типа ТГц-диапазона. Основное внимание уделяется вопросам разработки и проектирования ЭОС для таких приборов. На основании проведенного анализа выявлены основные достоинства и недостатки различных моделей ЭОС, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В разделе 1.2 приведены результаты синтеза предварительной конструкции электронной пушки с компрессией ленточного ЭП. Данная пушка предназначена для использования в миниатюрной ЛБВ диапазона 0.2 ТГц.<sup>6</sup> Далее сложная криволинейная геометрия фокусирующих электродов пушки аппроксимируется в программном пакете CST Particle Studio. Схема пушки представлена на рис. 1а. Электронная пушка имеет четырехлепестковый рупорный фокусирующий электрод и катод с криволинейной цилиндрической поверхностью с радиусом кривизны 4.93 мм. Согласно расчетам, компрессия пучка составляет 16 ед. в вертикальном направлении. При напряжении анода 19.75 кВ ток пучка равен 96 мА, толщина пучка в кроссовере около 50 мкм (рис. 1б).

В разделе 1.3 представлены результаты анализа транспортировки ленточного ЭП в канале ЭОС. Приводится конструкция магнитной

---

<sup>6</sup>Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., et al. Gain analysis of a 0.2-THz traveling-wave tube with sheet electron beam and staggered grating slow wave structure // IEEE Trans. Electron Devices. -2018. -Vol. 65. -No. 6. -P. 2129-2134.



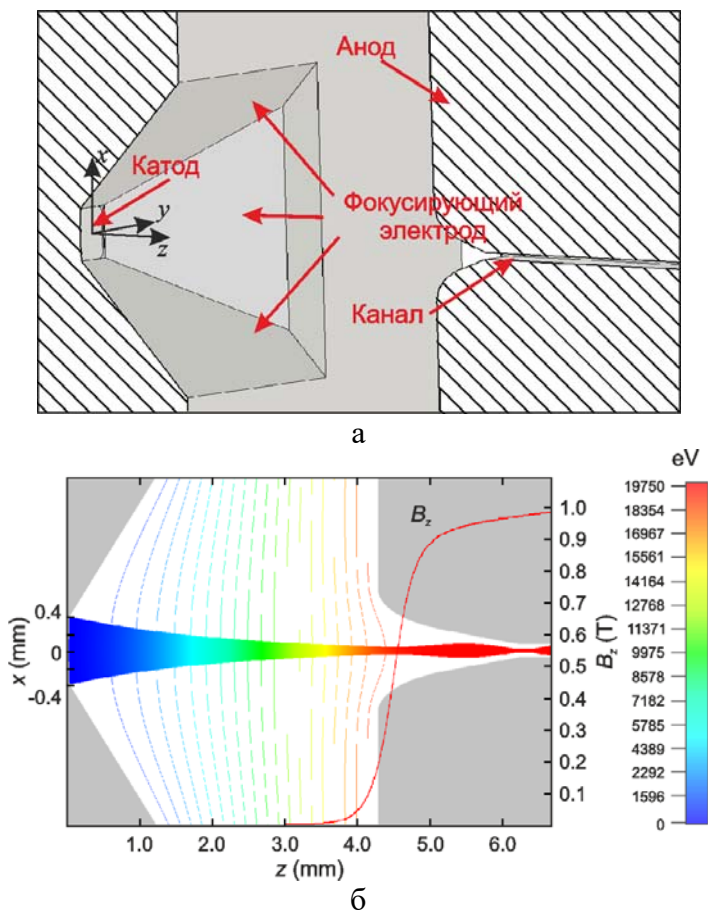


Рис. 1. Трехмерная схема электронной пушки (а) и траектории частиц в области пушки (б).

незначительного количества краевых частиц на стенки канала, токопрохождение превышает 99%.

Исследуется влияние различных нарушений симметрии ЭОС на транспортировку ленточного ЭП. Обнаружено, что наибольшее влияние оказывает поворот пушки относительно канала в плоскости  $xz$  (максимально допустимый угол поворота до  $0.3^\circ$ ), а также вертикальное смещение пушки относительно канала (до 20-25 мкм).

В Главе 2 рассматривается транспортировка многоскоростного ленточного ЭП в поле реверсной магнитной фокусирующей системы. Обсуждаются преимущества такой системы по сравнению с магнитной системой с однородным фокусирующим полем. Анализируется влияние однократного введения реверса магнитного поля на низкоплотное гало. В разделе 2.1 описана конструкция реверсной магнитной системы. Показано, что по сравнению с системой с однородным полем использование реверсной магнитной системы позволяет уменьшить массу магнитов примерно в 3.5 раза при одинаковой протяженности пролетного канала (60 мм). При этом размеры магнитов во второй секции реверса были увеличены, что позволило повысить продольную компоненту магнитного поля на 40% по сравнению с первой секцией. Описана методика введения реверса магнитного поля. Показано, что он должен находиться в области минимума пульсации пучка по вертикальной координате.

фокусирующей системы, которая состоит из двух полюсных наконечников, верхнего и нижнего магнитов и боковых магнитов-вставок для уменьшения влияния боковой компоненты магнитного поля. Магнитное поле на оси системы составляет 1.1 Тл, а протяженность однородного участка — 55 мм.

С помощью программного пакета CST Studio Suite исследуется процесс транспортировки ЭП в канале сечением  $0.1 \text{ мм} \times 0.85 \text{ мм}$ . Исследована сложная структура распределения частиц (рис. 2). Имеется высокоплотная центральная часть и краевая низкоплотная диффузная область с малым количеством частиц (гало). Показано, что, несмотря на оседание частиц на стенки канала,

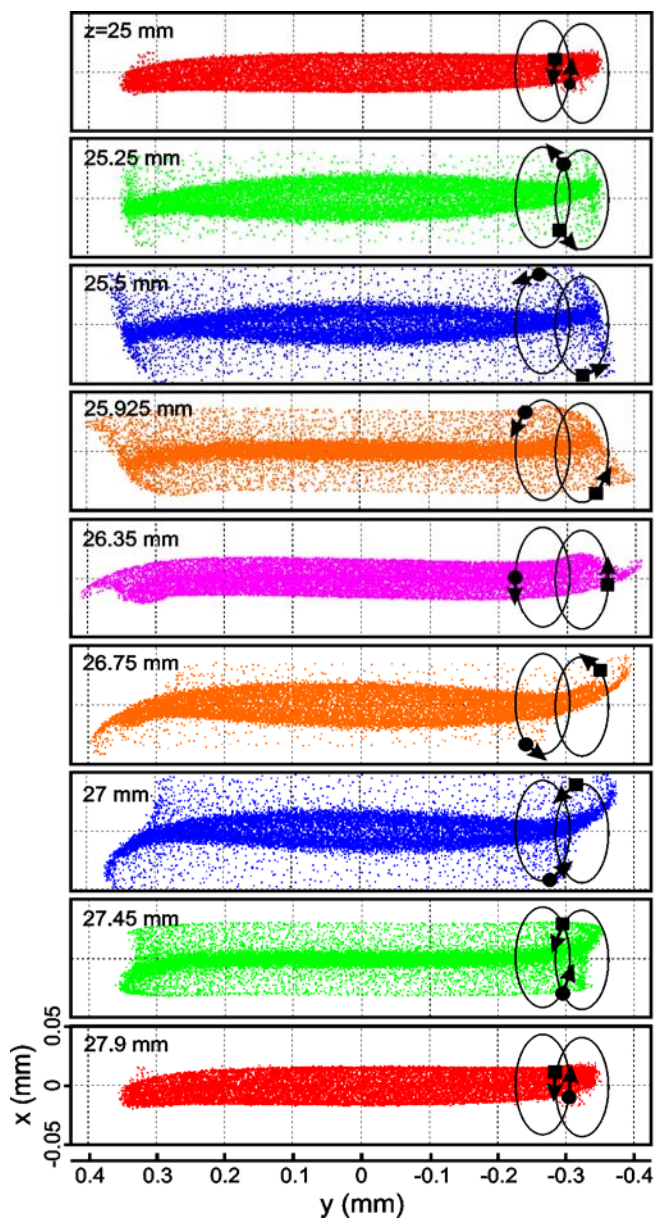


Рис. 2. Вид поперечного сечения пучка с компрессией на различном расстоянии от катода.

состоящий из трех лучей эллиптического сечения, испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии, чем одиночный пучок прямоугольной или эллиптической формы с высокоаспектным соотношением сторон.

В разд. 3.3 и 3.4 предложены и исследованы ЭОС с компрессией трехлучевого эллиптического ЭП (рис. 4). Представлены две конструкции пушки, в которых обеспечивается компрессия по площади 6.4 ед. и 16 ед. соответственно. Проведен анализ токопрохождения, который показал, что достигается транспортировка трех эллиптических пучков на расстояние до 25 мм без существенного оседания.

В разделе 2.2 исследуется транспортировка ленточного пучка в реверсном поле. Показано, что увеличение поля во второй секции позволяет улучшить токопрохождение и полностью избавиться от токооседания на стенки канала (рис. 3).

Глава 3 посвящена вопросам создания ЭОС с многолучевым ленточным ЭП. Представлены конструкции электронных пушек с компрессией многолучевого ЭП. Подобные многолучевые пучки предназначены для использования в ЛБВ диапазона 0.2 ТГц, где осуществляется взаимодействие с полем высшей поперечной моды замедленной волны<sup>7</sup>. Пушка содержит три эллиптических катода, теньевую сетку и управляющую сетку (диафрагму). Размеры эллиптических отверстий в диафрагме и тневой сетке совпадают с размерами парциальных катодов.

В разделе 3.2 проводится сравнительный анализ эквипотенциальных контуров многолучевого и однолучевого ЭП. Показано, что ЭП,

<sup>7</sup>Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, №. 2. С. 113–121.

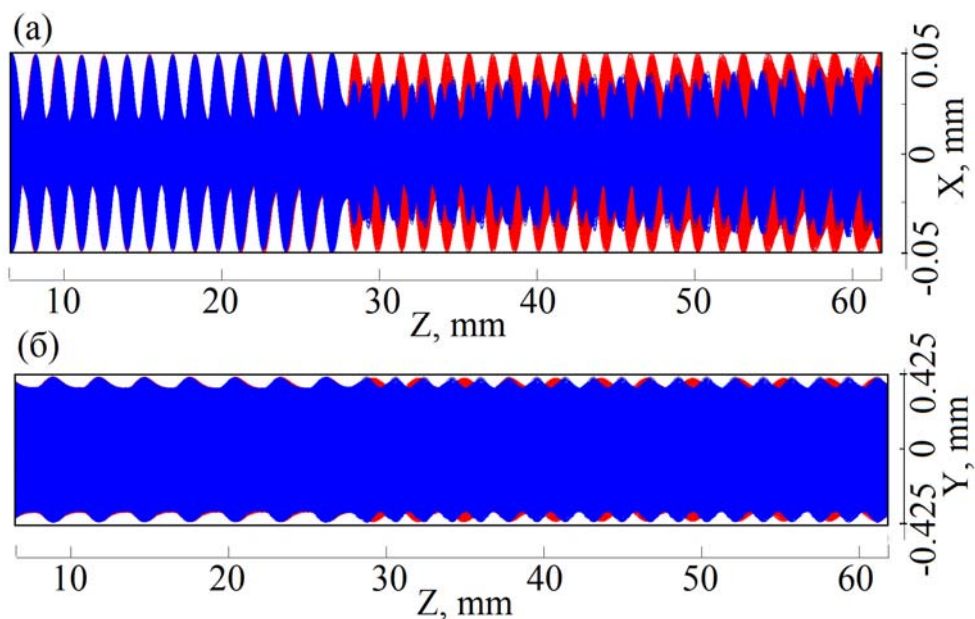


Рис. 3. Наложение изображений пучков, транспортируемых в однородном (красный) и реверсном (синий) магнитных полях: проекция частиц на плоскость  $xz$  (а); проекция частиц на плоскость  $yz$  (б).

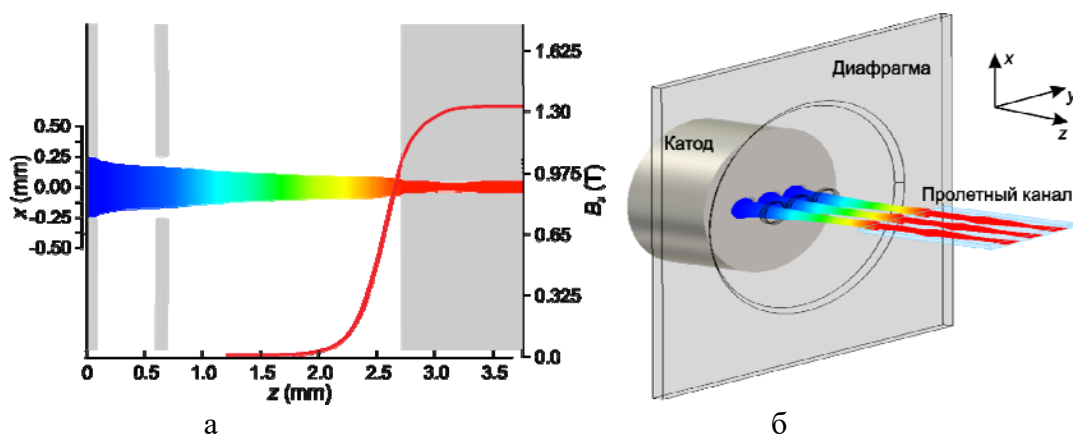


Рис. 4. Проекция электронного пучка на плоскость  $xz$  и профиль магнитного поля (а); Общий вид электронной пушки в изометрии (б).

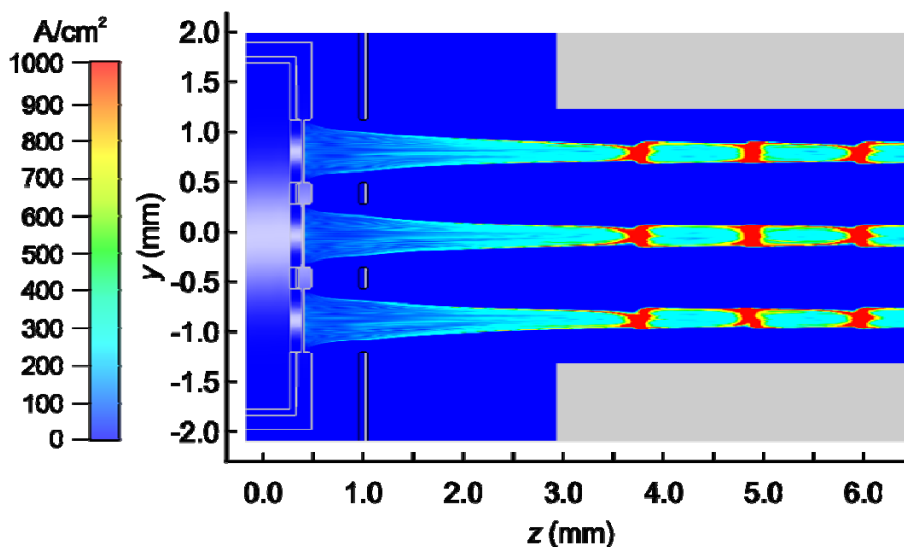
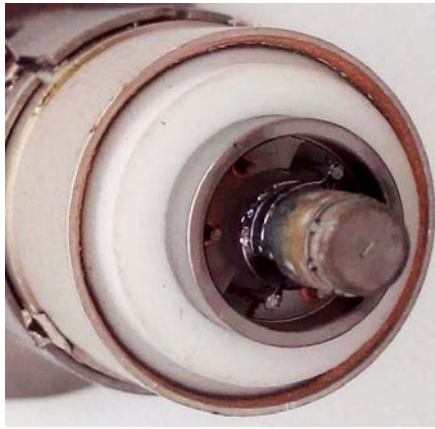
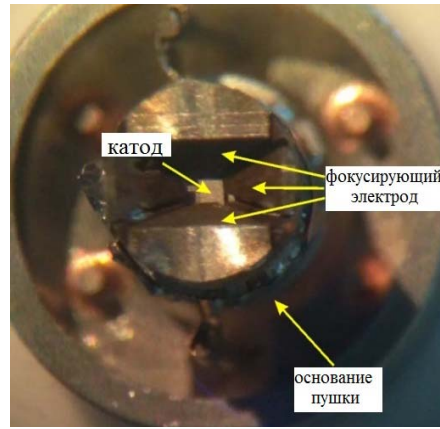


Рис. 5. Распределение плотности тока в сечении  $yz$ . Потенциал сетки  $U_g = 1.48$  кВ, потенциал анода  $U_a = 21.4$  кВ.



а



б

Рис. 6. Прямоточная пушка (а) и пушка с компрессией пучка с четырьмя фокусирующими лепестками (б).

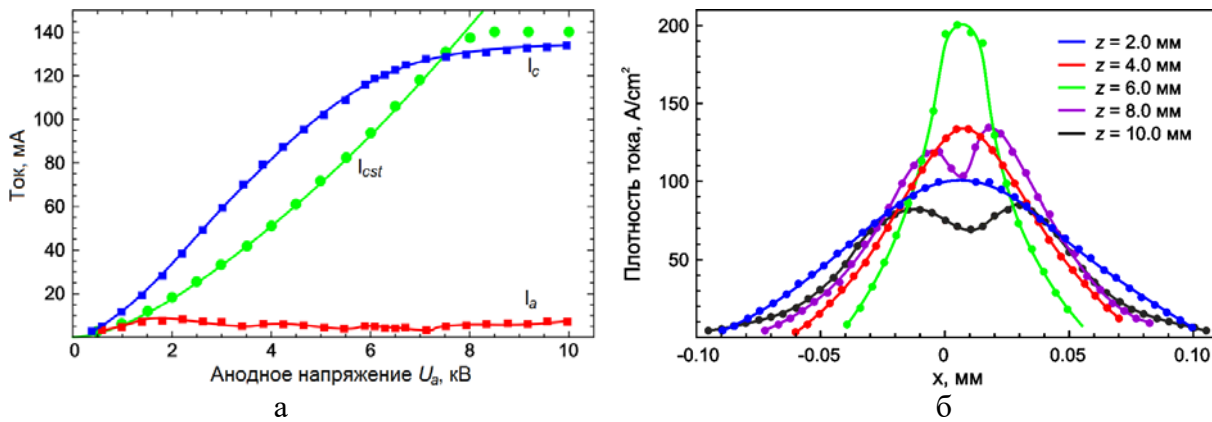


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования пушки: ВАХ (а) и распределения плотности тока на различных расстояниях от катода (б).

В ходе моделирования в пакете CST Studio Suite получен максимальный ток 186 мА (ток парциального луча 62 мА). Компрессия по площади составляет 16 единиц, плотность тока на катоде — 26.3 А/см<sup>2</sup>, средняя плотность тока в канале превышает 400 А/см<sup>2</sup>. Приведены структуры распределения плотности тока (см. рис. 5)

В главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований. Описано создание однолучевых и многолучевых электронных пушек, конструкции которых изучались в главах 1 и 3 соответственно.

В п. 4.1 описана разработанная прямоточная пушка на основе импрегнированного катода прямоугольной формы с размерами 0.1×0.7 мм<sup>2</sup>, рабочей температурой 1200 С° и плотностью тока с поверхности катода 114 А/см<sup>2</sup> (рис. 6а). В эксперименте получен ток до 80 мА.

Создана и экспериментально исследована электронная пушка с катодом прямоугольной формы размером 0.8×0.8 мм<sup>2</sup> и фокусирующим электродом в виде рупора из четырех «лепестков» (см. рис. 6б). Катод имеет криволинейную цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны 4.93 мм. В эксперименте получен ток до 135 мА (рис. 7а). Анализ структуры распределения плотности тока пучка при помощи зонда-диафрагмы показал,

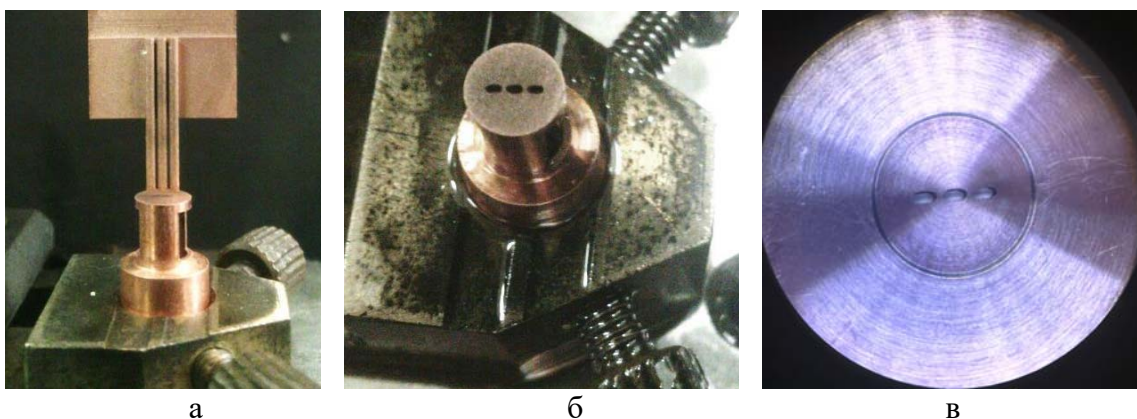


Рис. 8. Процесс изготовления электрода для прошивки катодных выступов; электрод с тремя эллиптическими штырьками, которыми прошивается теньевая и управляющая сетки (а); электрод для прошивки парциальных катодов с эллиптическими отверстиями (б); фотография электронной пушки (в).

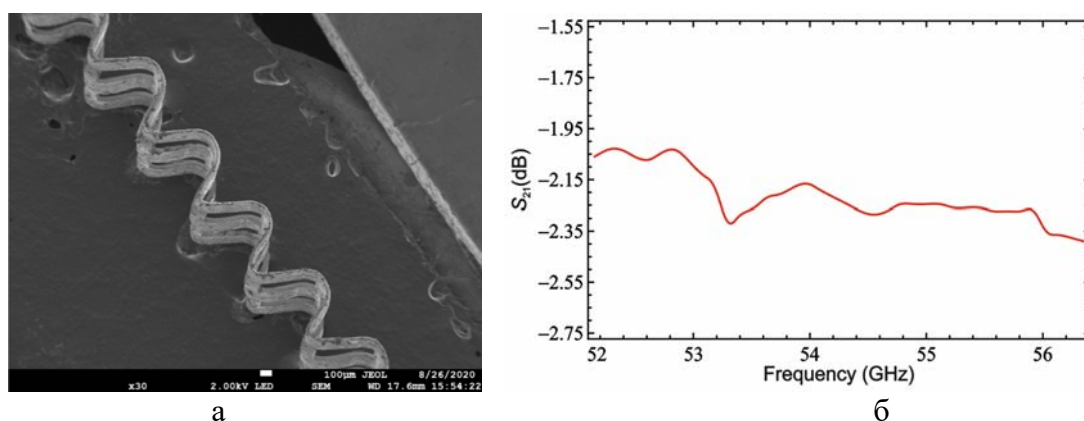


Рис. 9. SEM-изображение фрагмента ЗС типа многоэтажный меандр (а) результаты измерения S-параметров (б).

что плотность тока в кроссовере составляет  $200 \text{ A/cm}^2$ , а толщина пучка в кроссовере менее  $100 \text{ мкм}$  (см. рис. 7б).

В п. 4.2 обсуждаются вопросы создания ЭОС с трехлучевым эллиптическим ЭП. Предложена методика, позволяющая повысить точность формирования парциальных катодов и соответствующих им отверстий в электродах пушки и наконечниках ЭОС. Она заключается в том, что электрод для прошивки представляет собой основание, из которого методом электроискровой проволочной обработки изготовлены несколько штырей эллиптической формы (см. рис. 8а). Такой электрод одновременно позволяет прошивать несколько отверстий в сетках и наконечниках ЭОС. Еще одно отличие от традиционной методики заключается в том, что отверстия в специальном электроде для формирования катодной поверхности (рис. 8б) изготавливаются одновременно, а не поочередно.

На основе данной методики создана микроразмерная пушка с эллиптическими катодами (рис. 8в), защищенная патентом РФ. Экспериментально получен ток  $93 \text{ мА}$ , т.е. ток каждого парциального луча  $31 \text{ мА}$ . Проведенное исследование транспортировки пучка в макете ЭОС показало, что токопрохождение составляет  $60\%$ .

В п. 4.3 представлены результаты создания миниатюрных замедляющих систем суб-ТГц диапазона на основе планарных одиночных и сдвоенных гребенок (200-220 ГГц). Они изготавливались электроискровым методом, который, позволяет формировать сложные микроструктуры (пазы, ламели), не повреждая кристаллическую решетку детали. Также рассмотрен способ формирования многоэтажной меандровой структуры V-диапазона (50-70 ГГц). Лента меандра формируется из медной полосы толщиной 50 мкм при помощи микроразмерных зубчатых вальцов, таким образом, чтобы изгибы ленты поочередно образовывали диафрагмы с отверстиями для пролета электронных пучков. На рис. 9 представлены СЭМ-изображение фрагмента ЗС (а) и результаты измерения S-параметров (б), которые получены с помощью двухпортового панорамного измерителя КСВН Р2-69.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана ЭОС формирования ленточного ЭП с компрессией  $\sim 16$  ед. в вертикальном направлении и первеансом  $0.35 \times 10^{-7}$  А/В<sup>3/2</sup>. Электронная пушка имеет четырехлепестковый рупорный фокусирующий электрод и катод с криволинейной цилиндрической поверхностью с радиусом кривизны 4.93 мм. При напряжении анода 19.75 кВ, ток пучка составляет 96 мА, толщина пучка в кроссовере около 50 мкм.

2. Предложена конструкция магнитной фокусирующей системы, которая состоит из двух полюсных наконечников, верхнего и нижнего магнитов и боковых магнитов-вставок для уменьшения влияния боковой компоненты магнитного поля. Магнитное поле на оси системы составляет 1.1 Тл, а протяженность однородного участка — 55 мм.

3. С помощью программного пакета CST Studio Suite исследован процесс транспортировки ленточного ЭП с высокой компрессией в микроразмерном канале сечением  $0.1 \times 0.85$  мм<sup>2</sup>. Показано, что пучок имеет сложную структуру распределения частиц, а именно, высокоплотную центральную часть и краевую низкоплотную диффузную область с малым количеством частиц (гало). Несмотря на оседание незначительного количества краевых частиц на стенки канала, токопрохождение превышает 99%.

4. Изучено влияние асимметрии и несоосности на транспортировку ленточного пучка в ЭОС. Обнаружено, что наибольшее влияние оказывает поворот пушки относительно канала в плоскости  $xz$  (максимально допустимый угол поворота до  $0.3^\circ$ ) и вертикальное смещение пушки относительно канала (до 20-25 мкм).

5. Изучена транспортировка ленточного ЭП с высокой компрессией в поле реверсной магнитной системы. Показано, что по сравнению с системой с однородным полем использование реверсной магнитной системы позволяет уменьшить массу магнитов примерно в 3.5 раза. Увеличение веса магнитов во второй секции реверса повышает продольную компоненту магнитного

поля на  $\approx 40\%$  по сравнению с первой секцией. Это, в свою очередь, позволяет улучшить токопрохождение и полностью избавиться от токооседания на стенки канала. Положение реверса должно быть согласовано с областью минимальной вертикальной пульсацией пучка.

6. С помощью программного пакета Lorenz-3EM проведен анализ эквипотенциальных контуров для различных конфигураций ленточного ЭП. Показано, что ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы, при транспортировке в однородном магнитном поле испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии, чем одиночный пучок прямоугольной или эллиптической формы с высокоаспектным соотношением сторон.

7. Разработаны электронные пушки с компрессией многолучевого ЭП для ЛБВ диапазона 0.2 ТГц, где осуществляется взаимодействие с полем высшей поперечной моды замедленной волны. Пушка содержит три эллиптических катода, теньевую сетку и управляющую сетку (диафрагму). Размеры эллиптических отверстий в диафрагме и теневой сетке совпадают с размерами парциальных катодов. В ходе моделирования в пакете CST Studio Suite получен максимальный ток 186 мА, первеанс  $0.59 \times 10^{-7}$  А/В<sup>3/2</sup> (ток парциального луча 62 мА). Компрессия по площади составляет 16 единиц, плотность тока на катоде — 26.3 А/см<sup>2</sup>, средняя плотность тока в канале превышает 400 А/см<sup>2</sup>.

8. Создана и экспериментально исследована прямоочная пушка на основе импрегнированного катода прямоугольной формы с размерами 0.1×0.7 мм<sup>2</sup>, рабочей температурой 1200°С и плотностью тока с поверхности катода 114 А/см<sup>2</sup>. В эксперименте получен ток до 80 мА.

9. Создана и экспериментально исследована электронная пушка с катодом прямоугольной формы размером 0.8×0.8 мм<sup>2</sup> и фокусирующим электродом в виде рупора из четырех «лепестков». Катод имеет криволинейную цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны 4.93 мм. В эксперименте получен ток до 135 мА. Анализ структуры распределения плотности тока пучка при помощи зонда-диафрагмы показал, что плотность тока в кроссовере составляет 200 А/см<sup>2</sup>, а толщина пучка в кроссовере менее 0.1 мм.

10. Разработана и экспериментально исследована ЭОС, содержащая пушку с компрессией трехлучевого эллиптического ЭП, защищенную патентом РФ [36]. Предложена методика, позволяющая повысить точность формирования парциальных катодов и соответствующих им отверстий в электродах пушки и наконечниках ЭОС. Экспериментально получен ток 93 мА (т.е. ток каждого парциального луча 31 мА). Проведено экспериментальное исследование транспортировки пучка в макете ЭОС, достигнуто токопрохождение 60%.

11. Предложен способ формирования структуры ЗС типа «многоэтажный меандр». Он заключается в изготовлении с помощью лазерной абляции периодической системы отверстий в медной пластине. Затем с помощью формовки пластине с отверстиями придается форма

меандра. Изготовлены образцы ЗС V-диапазона. Измерения электродинамических параметров структуры показывают, что потери ВЧ-пакета в полосе частот 52–56 ГГц не превышают –2.5 дБ.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Navrotsky I.A., Ryskin N.M. Electron-optic system with high compression of a multiple elliptic electron beam for a miniaturized THz-band vacuum electron device // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 1334-1338.
2. Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Emelyanov V.V., Titov V.N., Ryskin N.M. Electron-optic system with a converged sheet electron beam for a 0.2-THz traveling-wave tube // IEEE Transactions on Electron Devices. 2021. Vol. 68. No. 2. P. 798-803.
3. Ploskih A.E., Ryskin N.M., Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Navrotsky I.A. Performance improvement of a sub-THz traveling-wave tube by using an electron optic system with a converging sheet electron beam // Results in Physics. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 799-803.
4. Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Павлов А.А., Шумихин К.В. Особенности разработки электронно-оптических систем для импульсных терагерцовых ламп бегущей волны (Обзор) // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 3. С. 464-471.
5. Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Навроцкий И.А., Роговин В.И., Сахаджи Г.В., Шумихин К.В. Экспериментальное исследование электронных пушек для вакуумных усилителей терагерцового диапазона // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 10. С. 92-98.
6. Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Журавлев С.Д., Навроцкий И.А., Сахаджи Г.В., Шумихин К.В. Исследование электронной пушки с компрессией ленточного потока для вакуумных усилителей терагерцового диапазона // Радиотехника. 2016. № 7. С. 97-100.
7. Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцового диапазона со сходящимся ленточным электронным пучком // Радиотехника. 2018. № 9. С. 8-13.
8. Starodubov A.V., Atkin V.S., Torgashov R.A., Navrotsky I.A., Ryskin N.M. On the technological approach to microfabrication of a meander-line slow-wave structure for millimeter-band traveling-wave tube with multiple sheet electron beams // Proc. SPIE, Saratov Fall Meeting 2020: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. 2021. Vol. 11846. Art. no. 118460M.
9. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Денисов Д.С. Технология получения микроразмерных замедляющих структур для вакуумных терагерцовых усилителей с ленточным электронным потоком // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2013. №4(519). С.160-163.
10. Bushuev N.A., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Sahajee G.V., Grigoriev Y.A. Forming of high current density sheet electron beams for sub-THz TWT vacuum amplifiers // 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. 2014. P. 171-172. DOI: 10.1109/IVEC.2014.6857545.
11. Burtsev A.A., Bushuev N.A., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shalaev P.D., Grigoriev Y.A. Experimental study of electron guns for TWT of terahertz range // 16th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Beijing, China. 2015. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223751.
12. Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shumikhin K.V. Development of electron-optical system with convergent sheet beam for terahertz TWT // 19th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. 2018. P. 367-368.



13. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Design and simulation of a 0.2-THz traveling-wave tube with a converging sheet electron beam // 19th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. 2018. P. 161-162. DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391560.
14. Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Ryskin N.M., Danilushkin A.V., Ploskih A.E., Titiv V.N. Studies on sub-THz sheet-beam TWT with staggered grating slow-wave structure // 20th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Busan, South Korea. -2019. DOI: 10.1109/IVEC.2019.8745213.
15. Navrotsky I.A., Ploskih A.E., Titov V.N., Burtsev A.A., Torgashov R.A., Ryskin N.M. Design study of a 0.2-THz traveling-wave tube with multiple sheet electron beam // 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 27-30 April 2021. DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722513.
16. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Ploskih A.E., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Investigations on 0.2-THz traveling-wave tubes with staggered grating slow-wave structure // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018). Nagoya, Japan. -2018. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510495.
17. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Ploskih A.E., Torgashov R.A., Titiv V.N., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Design and simulation of a 0.2-THz traveling-wave tube with sheet electron beam focused by reversal magnetic field // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Paris, France. -2019. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873758.
18. Navrotsky I.A., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Ploskih A.E., Zolotykh D.N., Emelyanov V.V. Development of high-power sub-THz traveling-wave tubes with multiple sheet electron beams // 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Buffalo, USA. 2020. DOI: 10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370716.
19. Torgashov R.A., Starodubov A., Navrotsky I.A., Titov V.N., Emelyanov V.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power millimeter-band traveling-wave tube // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Chengdu, China. 2021. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567187.
20. Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Ploskih A.E., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Navrotsky I.A., Emelyanov V.V. Development of miniature millimeter-band traveling-wave tubes with sheet and multiple electron beams // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow, Russian Federation. 2020. P. 94-97. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312288.
21. Бурцев А.А., Бушуев Н.А., Григорьев Ю.А., Навроцкий И.А. Компьютерное моделирование низкочастотных электронных пушек для усилителей терагерцового диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2012. С. 50-53.
22. Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Кожевников И.О., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Терентюк А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И. Разработка ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцового диапазонов с пространственно-развитыми замедляющими системами // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 126-130.
23. Бурцев А.А., Рыскин Н.М., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Шумихин К.В. Экспериментальное исследование сходящегося ленточного пучка при разработке усилителя ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения.

- Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 206-208.
24. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Данилушкин А.В. Параметрическое 3D моделирование низкоперевансных эллиптических электронных пучков для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 166-169.
  25. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Шумихин К.В. Разработка макета ЭОС с эллиптическими пучками для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 170-174.
  26. Navrotsky I.A., Titov V.N., Ryskin N.M. Study of multivelocitv sheet-electron-beam transportation in uniform and reversal magnetic fields // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, Russian Federation. - 2020. -P. 78-81.
  27. Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Kivokurtsev A.Y., Shumikhin K.V., Shalaev P.D., Karetnikova T.A., Ryskin N.M. Development of electron-optical system with three elliptic electron beams for a THz-band vacuum-tube device // 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Liverpool, UK. -2017. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467.
  28. Danilushkin A.V., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Shumikhin K.V., Ryskin N.M. Synthesis of a sheet beam electron optical system with a field emission cathode // 11th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Hangzhou, China. - 2018. DOI: 10.1109/UCMMT45316.2018.9015915.
  29. Bushuev N.A., Bourtsev A.A., Navrotsky I.A., Denisov D.S., Grigoriev Y.A. Forming of high current density electron beam for terahertz vacuum O-type amplifiers // 40th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2013), Abstracts IEEE International Conference. CA, USA. 2013.
  30. Навроцкий И.А., Рыскин Н.М., Данилушкин А.В. Исследование низкоперевансных эллиптических пучков и их эквипотенциальных контуров, образованных пространственным зарядом // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, Россия. 2019. С.102-107.
  31. Данилушкин А.В., Бурцев А.А., Навроцкий И.А. Моделирование формирования и пространства взаимодействия ленточных электронных пучков в усилителях терагерцевого диапазона // Физика.СПб/2018. Санкт-Петербург, Россия. -2018. - С.205-206.
  32. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Бурцев А.А., Навроцкий И.А., Данилушкин А.В. Исследование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с ленточным электронным пучком // XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов, Россия -2018. -С. 61.
  33. Навроцкий И.А., Кивокурцев А.Ю., Бабанов А.Ж., Горева Т.А., Шумихин К.В. Технология создания ЭОС вакуумного терагерцевого усилителя // Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз». Саратов, Россия. - 2017. -С.129-132.
  34. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Григорьев Ю.А. Моделирование ленточных электронных пучков высокой плотности при разработке вакуумных усилителей О-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона // «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика». Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, Россия. -2013. -С. 55-56.

35. Бабанов А.Ж., Навроцкий И.А., Конюшков Г.В., Бурцев А.А., Козлова О.В. Прецизионная электроискровая микрообработка периодических структур замедляющих систем типа «гребенка» // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 11-й научно-технической конференции, МАТИ. Москва, Россия. - 2012. - С. 294-296.
36. Пат. 179616 Российская Федерация, МПК H01J 3/02. Многолучевая электронная микропушка с эллиптическими катодами / Навроцкий И.А.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». – № 2017106416; заявл. 27.02.2017; опубл. 21.05.2018, Бюл. 15. -9 С.