

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и цифровому развитию  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

д. физ.-мат. н., профессор

Алексей Александрович Короновский

«07» июня 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по диссертации **Навроцкого Игоря Александровича** «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцевого диапазона» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5.—«Физическая электроника», выполненной на кафедре динамических систем на базе Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 16.12.2021 № 191-Д.

Соискатель **Навроцкий Игорь Александрович** окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2011 г. по специальности «Прикладная информатика (в экономике)» с присвоением квалификации «информатик-экономист».

Справка о сданных кандидатских экзаменах № 28-2022 выдана 11.05.2022 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации и по настоящее время является соискателем (приказ ректора СГУ от 11.10.2021 г. № 139-Д), прикрепленным для написания диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физическая электроника». Работает старшим научным сотрудником АО «НПП «Алмаз», г. Саратов.

Научный руководитель — *Рыскин Никита Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора СГУ от 16.12.2021 № 191-Д, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ, других образовательных учреждений высшего образования и научных организаций.

На заседании присутствовали:

1. *Рыскин Никита Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН.
2. *Исаева Ольга Борисовна*, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, доцент кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН.
3. *Тюрюкина Людмила Владимировна*, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН, доцент кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН.
4. *Вадивасова Татьяна Евгеньевна*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиопизики и нелинейной динамики СГУ.
5. *Глухова Ольга Евгеньевна*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой радиотехники и электродинамики СГУ.
6. *Давидович Михаил Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики СГУ.
7. *Пономаренко Владимир Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии СГУ.
8. *Попов Вячеслав Валентинович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник СФ ИРЭ РАН.

9. *Бегинин Евгений Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики СГУ.
10. *Рожнев Андрей Георгиевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики СГУ.
11. *Адилова Асель Булатовна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем СГУ.
12. *Гришин Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн СГУ.
13. *Титов Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ.
14. *Золотых Дмитрий Николаевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ, начальник отдела АО «НПП «Алмаз».
15. *Емельянов Валерий Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, начальник отдела АО «НПП «Алмаз».
16. *Шалаев Павел Данилович*, кандидат технических наук, главный научный сотрудник АО «НПП «Алмаз».

Рецензенты диссертации:

*Давидович Михаил Владимирович*, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв.

*Титов Владимир Николаевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

### **Заключение**

по диссертации Навроцкого Игоря Александровича  
«Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для  
приборов вакуумной электроники субтерагерцевого диапазона»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.5.–«Физическая электроника»

В диссертации Навроцкого И.А. проведено исследование процессов формирования и транспортировки низкоперевансных пространственно-развитых ленточных электронных пучков для приборов вакуумной электроники диапазона 0.1–0.2 ТГц. Созданы и экспериментально исследованы электронные пушки, формирующие ленточные и многолучевые электронные потоки с высокой плотностью тока.

### **Научная новизна результатов работы.**

1. Разработана новая конструкция электронной пушки с компрессией низкоперевансного ленточного ЭП ~ 16 единиц по площади. Пушка содержит фокусирующий электрод, представляющий собой четыре лепестка и катод прямоугольной формы с размерами 800 мкм×800 мкм.

2. При помощи пакета CST Studio исследован процесс длительной транспортировки низкоперевансного ленточного ЭП с компрессией в однородном магнитном поле в канале микроразмерной ЗС. Обнаружено, что пучок имеет сложную структуру в виде ядра и диффузной переходной области (гало), которая частично осаждается на стенки канала. Однако, поскольку плотность частиц в этой области мала, на всей протяженности системы сохраняется высокое токопрохождение.

3. Разработана электронно-оптическая система (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, формирующей трехлучевой пучок 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 и запатентована оригинальная методика, позволяющая создавать многолучевую электронную микропушку с эллиптическими катодами, расположенными в ряд. Методика позволяет повысить точность формирования отверстий в электродах пушки.

6. Изготовлена электронная пушка с катодом размером 0.1×0.7 мм<sup>2</sup> и плотностью токоотбора более 100 А/см<sup>2</sup>, формирующая ленточный электронные пучки. Экспериментально получен ток до 80 мА.

7. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с ленточным ЭП с фокусирующим электродом сложной формы. Проведены экспериментальные измерения ВАХ пушки, достигнут максимальный ток 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** результатов диссертации, состоит в том, что они могут быть использованы для создания компактных широкополосных ламп бегущей волны (ЛБВ) диапазона 0.1-0.2 ТГц с выходной мощностью 10-100 Вт. Подобные приборы могут найти применение в системах беспроводной передачи данных нового поколения, в системах космической связи и радиолокации. Результаты моделирования и экспериментального исследования ЭОС позволяют повысить плотность тока в пролетном канале 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.

**Ценность научных работ** соискателя определяется тем, что в диссертации развиты методики моделирования и проведены расчеты ЭОС, на основе которых были созданы и исследованы оригинальные экспериментальные макеты электронных пушек с пространственно-развитыми ленточными и многолучевыми электронными пучками для приборов вакуумной электроники О-типа диапазона 0.1–0.2 ТГц. В частности, впервые предложена конструкция электронной пушки, формирующая трехлучевой пучок эллиптического сечения с компрессией (патент РФ № 179616).

**Личный вклад.** 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.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается их соответствием фундаментальным принципам и закономерностям физической электроники. Моделирование ЭОС проводилось с помощью хорошо апробированных программных пакетов CST Particle Studio Simulator и Lorentz-ЗЕМ. 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.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на 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).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 36 работ, из них 9 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, или входящих в список изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

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 терагерцевых 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 терагерцевого 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 терагерцевого 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 субтерагерцевого 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 терагерцевых усилителей с ленточным электронным потоком // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2013. №4(519). С.160-163.

По результатам диссертации зарегистрирован патент РФ: 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.

**Общая оценка диссертации.** Диссертация «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцевого диапазона» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи физической электроники, заключающейся в разработке систем формирования и транспортировки пространственно-развитых ленточных и многолучевых электронных пучков с плотностью тока  $100 \text{ А/см}^2$  и выше для приборов вакуумной электроники диапазона 0.1–0.2 ТГц, в создании макетов микроразмерных электронных пушек и экспериментальном исследовании их характеристик.

Основные положения и результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных статьях и материалах конференций. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.5.–«Физическая электроника». Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцевого



диапазона» Навроцкого Игоря Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5.—«Физическая электроника» как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ, других образовательных учреждений высшего образования и научных организаций. На заседании присутствовало 16 человек, из них 6 докторов наук и 10 кандидатов наук по профилю диссертации. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – нет, воздержались – нет (протокол № 5 от 02 июня 2022 г).

Председательствующий:

доцент кафедры динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН  
института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,  
к.ф.-м.н., доцент



**Исаева Ольга Борисовна**



«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель

научно-технического

совета АО «НПП «Алмаз»,

генеральный директор

АО «НПП «Алмаз», к.э.н.

**М.П. Апин**

г. Саратов



**Протокол №4**  
**заседания НТС АО «НПП «Алмаз» от 07.06.2022г.**

**На заседании присутствовали:**

Заместитель председателя НТС  
Ученый секретарь НТС

Рафалович А.Д.  
Роговин В.И.

**Члены НТС в соответствии с явочным листом:**

Архипов Д.А.  
Бабкова Н.И.  
Галкина Ю.В.  
Данилов А.Б.  
Золотых Д.Н.

Нефедов С.А.  
Семенов С.О.  
Сенчуров В.А.

Приглашенные: Шалаев П.Д., Шестеркин В.И.

**Повестка дня:**

1. Представление старшим научным сотрудником отдела ОПИНТ **Навроцким Игорем Александровичем** диссертационной работы на тему: «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцевого диапазона» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника», выполненной на предприятии АО «НПП «Алмаз» в период с 2012 по 2022 г.

Тема диссертационной работы утверждена на научном семинаре отдела ОПИНТ НПП «Электронные системы» 17.01.2019.

Соискатель **Навроцкий Игорь Александрович** окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского» в 2011 г. по специальности «Прикладная информатика (в экономике)» с присвоением квалификации «информатик-экономист».

Справка о сданных кандидатских экзаменах № 28-2022 выдана 11.05.2022 г Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

В настоящее время является соискателем в ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» (приказ ректора СГУ от 11.10.2021 г. № 139-Д), прикрепленным для написания диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физическая электроника». Работает старшим научным сотрудником АО «НПП «Алмаз», г. Саратов.

Научный руководитель — *Рыскин Никита Михайлович*, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», заведующий кафедрой динамических систем на базе СФ ИРЭ РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора СГУ от 16.12.2021 № 191-Д, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Рецензенты диссертации:

1. *Семенов Сергей Олегович*, доктор физико-математических наук, начальник сектора отдела 13 НПЦ «Электронные системы», АО «НПП «Алмаз».
2. *Архипов Данила Алексеевич*, кандидат технических наук, начальник тематического отдела НПЦ «Электронные системы» АО «НПП «Алмаз».
3. *Шалаев Павел Данилович*, кандидат технических наук, главный научный сотрудник АО «НПП «Алмаз».

В диссертации Навроцкого И.А. проведено исследование процессов формирования и транспортировки низкоперевансных пространственно-развитых ленточных электронных пучков для приборов вакуумной электроники диапазона 0.1–0.2 ТГц. Созданы и экспериментально исследованы электронные пушки, формирующие ленточные и многолучевые электронные потоки с высокой плотностью тока.

#### **Научная новизна результатов работы.**

1. Разработана новая конструкция электронной пушки с компрессией низкоперевансного ленточного ЭП ~ 16 единиц по площади. Пушка содержит фокусирующий электрод, представляющий собой четыре лепестка и катод прямоугольной формы с размерами 800 мкм×800 мкм.
2. При помощи пакета CST Studio исследован процесс длительной транспортировки низкоперевансного ленточного ЭП с компрессией в однородном магнитном поле в канале микроразмерной ЗС. Обнаружено, что пучок имеет сложную структуру в виде ядра и диффузной переходной области (гало), которая частично осаждается на стенки канала. Однако, поскольку плотность частиц в этой области мала, на всей протяженности системы сохраняется высокое токопрохождение.
3. Разработана электронно-оптическая система (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, формирующей трехлучевой пучок 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 и запатентована оригинальная методика, позволяющая создавать многолучевую электронную микропушку с эллиптическими катодами, расположенными в ряд. Методика позволяет повысить точность формирования отверстий в электродах пушки.

6. Изготовлена электронная пушка с катодом размером  $0.1 \times 0.7$  мм<sup>2</sup> и плотностью токоотбора более 100 А/см<sup>2</sup>, формирующая ленточные электронные пучки. Экспериментально получен ток до 80 мА.

7. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с ленточным ЭП с фокусирующим электродом сложной формы. Проведены экспериментальные измерения ВАХ пушки, достигнут максимальный ток 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** результатов диссертации, состоит в том, что они могут быть использованы для создания компактных широкополосных ламп бегущей волны (ЛБВ) диапазона 0.1-0.2 ТГц с выходной мощностью 10-100 Вт. Подобные приборы могут найти применение в системах беспроводной передачи данных нового поколения, в системах космической связи и радиолокации. Результаты моделирования и экспериментального исследования ЭОС позволяют повысить плотность тока в пролетном канале прибора и увеличить токопрохождение.

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

**Ценность научных работ** соискателя определяется тем, что в диссертации развиты методики моделирования и проведены расчеты ЭОС, на основе которых были созданы и исследованы оригинальные экспериментальные макеты электронных пушек с пространственно-развитыми ленточными и многолучевыми электронными пучками для приборов вакуумной электроники О-типа диапазона 0.1–0.2 ТГц. В частности, впервые предложена конструкция электронной пушки, формирующая трехлучевой пучок эллиптического сечения с компрессией (патент РФ № 179616).

**Личный вклад.** 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.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается их соответствием фундаментальным принципам и закономерностям физической электроники. Моделирование ЭОС 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.

**Апробация работы.** Работа выполнена в АО «НПП «Алмаз» в период 2012-2022 гг. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на 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 «Наноэлектроника, 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).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликовано 36 работ, из них 9 статьей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus, или входящих в список изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

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.

По результатам диссертации зарегистрирован патент РФ: 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.

**Общая оценка диссертации.** Диссертация «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцового диапазона» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной задачи физической электроники, заключающейся в разработке систем формирования и транспортировки пространственно-развитых ленточных и многолучевых электронных пучков с плотностью тока  $100 \text{ А/см}^2$  и выше для приборов вакуумной электроники диапазона 0.1–0.2 ТГц, в создании макетов микроразмерных электронных пушек и экспериментальном исследовании их характеристик.

Основные положения и результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных статьях и материалах конференций. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.5. – «Физическая электроника». Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Присутствовало на заседании НТС 2 доктора наук и 6 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования:

«за» - 10 чел. (члены НТС),

«против» - нет,

«воздержавшихся» - нет.

**Решение:**

Диссертация «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцевого диапазона» Навроцкого Игоря Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника» как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Ученый секретарь НТС



В.И. Роговин