

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПФ РАН

академик РАН

Г.Г. Денисов

«30» сентября 2022 г.

М.П.

## ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Прикладной Физики РАН» на диссертационную работу Навроцкого Игоря Александровича «Формирование ленточных электронных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцового диапазона», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. - Физическая электроника.

### **Актуальность темы исследования**

Большое количество новых научных и технических приложений требует создания компактных, относительно дешевых и надежных источников электромагнитного излучения субтерагерцового (0.1-0.3 ТГц) диапазона с выходной мощностью порядка единиц-десятков ватт. Среди большого разнообразия классов СВЧ приборов этим требованиям в наибольшей степени отвечают вакуумные генераторы и усилители, основанные на черенковском механизме излучения – лампы бегущей волны (ЛБВ). Специфика ЛБВ субтерагерцового диапазона, прежде всего очень малые характерные размеры как замедляющей системы, так и остальных элементов конструкции, предъявляют весьма специфические и очень жесткие требования к электронно-оптической системе, которая должна формировать пучок с очень малыми размерами, малыми пульсациями и в то же время - огромными (сотни ампер на квадратный сантиметр) плотностями тока. В настоящее время решение указанной задачи нельзя признать завершенным, поэтому тема диссертационной работы Навроцкого Игоря Александровича посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию новых систем формирования ЛБВ субтерагерцового диапазона несомненно актуальна.

### **Общая характеристика работы**

**Введение** содержит сведения об актуальности темы исследования, ее новизне и практической значимости, цели и задачах работы, основных положениях работы.

**В первой главе** проанализированы новые требования к электронно-оптическим системам ЛБВ субтерагерцового диапазона, вытекающие из необходимости обеспечения достаточно высоких мощностей электронного пучка, проходящего через мелкомасштабную (сотни микрон) волноведущую систему и на этой основе сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Далее, в этой же главе для первоначального поиска оптимальной конфигурации электронной пушки ЛБВ с частотой 0.2 ТГц применен метод синтеза. Отметим, что использование метода синтеза является эффективным методом поиска хорошего начального приближения и позволяет существенно сократить поиск оптимальных конфигураций ЭОС. Последующая оптимизация и «доводка» геометрии осуществлены на базе хорошо апробированного комплекса программ CST Studio Suite. Подробно исследована поперечная структура пучка в разных сечениях канала транспортировки. В результате удалось создать ЭОС с магнитоэкранированным катодом при компрессии пучка 16 с большим аспектным соотношением и токопрохождением более 99%. Отдельно следует отметить разработку компактной магнитной системы для транспортировки интенсивного ленточного пучка.

**Вторая глава** посвящена сравнительному анализу и оптимизации ЭОС с однородным фокусирующим магнитным полем и систем с однократным реверсом поля. Предложены конструкции соответствующих магнитных систем на основе постоянных магнитов. Найдено оптимальное положение области реверса магнитного поля и показано, что введение реверса позволяет при той же длине канала транспортировки снизить массу магнитов в несколько раз. Еще одним достоинством предложенной схемы с реверсом является обеспечение 100% токопрохождения пучка через канал транспортировки.

**Третья глава** посвящена исследованию многолучевых ЭОС. Предложены конструкции таких систем. Важным выводом, подтвержденным траекторным анализом, является утверждение, что в трехлучевой ЭОС с парциальными лучами эллиптической формы возможно значительное снижение деформации формы электронного потока при одновременном снижении чувствительности к нарушениям симметрии по сравнению с одиночным пучком при том же аспектном соотношении сторон пучка в поперечном сечении. Предложена и оптимизирована трехлучевая магнитоэкранированная электронная пушка с компрессией 16 с рекордной для ЛБВ плотностью тока  $400 \text{ А/см}^2$  в канале транспортировки при хорошем токопрохождении.

Особо выделяются результаты **четвертой главы** диссертации, где предложенные ранее варианты электронных пушек исследуются экспериментально. Автором использованы разнообразные и весьма трудоемкие при практической реализации методики экспериментального измерения характеристик формируемых электронных

пучков, что говорит о его высокой квалификации как физика-экспериментатора. Помимо этого следует отметить разработку эффективных технологий изготовления конструкций электронных пушек. На одну из предложенных конструкций получен патент. Итогом этой части работы следует считать разработку и практическую реализацию однолучевой электронной пушки с компрессией 16 и трехлучевой ЭОС с общим током более 200 мА.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Диссертационная работа Навроцкого И.А. представляет собой завершенное научное исследование. Текст работы логичен, хорошо структурирован и изложен качественным научным языком, оформлен технически грамотно.

Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

### **Научная новизна работы**

К числу наиболее значимых научных результатов диссертационного исследования Навроцкого И.А. можно отнести следующие:

1. Автором адаптирована и далее применена методика моделирования сложных 3-мерных систем формирования интенсивных электронных пучков для субтерагерцовых ЛБВ, включающая в себя использование на первом этапе 2-мерного метода синтеза для определения электродных конфигураций и далее, на втором этапе – 3-мерного траекторного анализа с помощью пакета программ CST Studio Suite. Указанный подход позволяет эффективно оптимизировать электронные пушки ЛБВ с высокими значениями компрессии и рекордными плотностями токов в канале транспортировки. Такой подход позволил разработать ЭОС для формирования ленточного пучка с компрессией 16 и током около 100 мА в канале с большим аспектным соотношением при очень высоком коэффициенте токопрохождения, превышающем 99%.
2. Предложен и рассчитан ряд новых магнитных систем для субтерагерцовых ЛБВ, в частности – с реверсом магнитного поля. Показано, что в последнем случае возможно многократное снижение габаритов магнита при сохранении качества магнитной фокусировки.
3. Показано, что многолучевой электронный пучок с эллиптическим сечением каждого луча испытывает меньшие деформации при транспортировке и менее чувствителен к нарушению симметрии ЭОС при ошибках изготовления, чем одиночный пучок с большим аспектным соотношением.

4. Разработана трехлучевая электронная пушка для ЛБВ с частотой 0.2 ТГц с компрессией каждого луча 16 и суммарной мощностью пучка около 4 кВт, обеспечивающая рекордную плотность тока  $400 \text{ А/см}^2$  в узком канале транспортировки.

5. Выполнен цикл экспериментальных исследований разработанных в диссертации электронно-оптических систем субтерагерцовых ЛБВ с большой компрессией пучка, позволивший, в частности, в однолучевом ЭП реализовать плотность тока  $200 \text{ А/см}^2$  при размере пучка 100 микрон, а в многолучевом приборе получить суммарный ток около 10 мА (мощность около 2 кВт).

### **Практическая значимость результатов диссертации**

1. Развита методика проектирования и оптимизации электронных пушек с большой компрессией, основанная на совместном использовании методов синтеза и траекторного анализа. Указанная методика ВЭП позволяет быстро проводить анализ и оптимизацию новых 3-мерных электронно-оптических систем ЛБВ субтерагерцового диапазона при учете основных физических факторов, влияющих на скоростное распределение и форму электронного пучка.

2. Предложены новые компактные варианты магнитных систем на постоянных магнитах, позволяющие существенно снизить массо-габаритные характеристики ЛБВ субтерагерцового диапазона.

3. Показано, что многолучевые электроно-оптические системы, по сравнению с однолучевыми, позволяют существенно снизить искажения формы электронного пучка по сравнению с однолучевыми, что имеет важное значение при проектировании новых электронно-оптических систем коротковолновых ЛБВ с большой плотностью тока пучка в канале.

4. Создан и экспериментально исследован целый ряд электронных пушек ЛБВ с планарными пучками, позволяющих в перспективе значительно улучшить выходные характеристики субтерагерцовых черенковских усилителей и генераторов.

### **Достоверность результатов и степень обоснованности научных выводов**

Достоверность полученных результатов основана на использовании ряда хорошо известных алгоритмов численного моделирования и экспериментальных методик определения качества формируемых электронных пучков, а также подтверждается сопоставлением с данными расчета по другим программам численного моделирования и совпадением данных траекторного анализа с результатами прямых экспериментальных измерений методом тормозящего поля.

## Публикации соискателя

Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 36 печатных работах, в том числе 9 статьях, в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 26 работах в сборниках трудов российских и международных конференций и одном патенте на изобретение.

### Замечания по диссертационной работе

1. При изложении материала гл.1 остается неясным, в каком режиме работает электронная пушка: температурного ограничения эмиссии или режима ограничения тока пространственным зарядом. Было бы полезным более подробно объяснить, как происходит вычисление плотности эмиссионного тока.
2. В работе не изложены такие важные характеристики процесса численного моделирования, как число траекторий, число узлов сетки, каким методом решается уравнение Пуассона. Это полезно указать с точки зрения оценки трудоемкости и временных затрат на проведение расчетов. Необходимо пояснить, какая модель использована для расчета параметров электронного пучка: метод трубок тока или метод крупных частиц.
3. Желательно дать физическое пояснение ряду утверждений, в частности почему «в низкопереванских ЭОС увеличивается влияние поперечных тепловых скоростей электронов» (стр. 16); «если граница пучка совпадает с эквипотенциальной линией, дрейф возникать не будет»; справедливо ли утверждение о заметном влиянии шероховатостей катода для ЭП работающей в режиме пространственного заряда (стр.50); каким образом наличие реверса магнитного поля уменьшает пульсации электронного потока (стр.59); чем обусловлено значительное различие экспериментальных и расчетных данных приведенных на рис.4.4.
4. В чем причина появления ореола с большими вращательными скоростями? Это тепловые скорости или это скорости, возникающие из-за неправильного ввода пучка в магнитное поле (нет согласования с силовыми линиями)? Возможно что этот эффект обусловлен перфокусировкой пучка, иначе бы эти пульсации не возникли.

Таким образом, основное замечание связано с большим обилием технических деталей, в то время как физика процесса формирования электронного потока и особенно физические принципы поиска оптимальных конфигураций полей и электродов описаны весьма кратко.

Сделанные замечания имеют рекомендательный частный характер и не снижают общую положительную оценку работы.

## Заключение

Диссертационная работа Навроцкого И.А. «Формирование ленточных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцового диапазона», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 - Физическая электроника, представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой представлены теоретические и экспериментальные исследования новых электронно-оптических систем для ЛБВ субтерагерцового диапазона.

Автореферат по своему содержанию соответствует диссертации и содержит все основные научные положения, результаты и выводы по проведённому диссертационному исследованию.

Учитывая актуальность изученного вопроса, научную новизну, практическую значимость полученных результатов, их достоверность и обоснованность выводов, можно заключить, что диссертационная работа Навроцкого И.А. «Формирование ленточных пучков с высокой плотностью тока для приборов вакуумной электроники субтерагерцового диапазона» отвечает требованиям пп. 9, 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а ее автор Навроцкий И.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. - Физическая электроника

Диссертационная работа Навроцкого И.А. рассмотрена и одобрена на заседании научно-квалификационного семинара отделения физики плазмы и электроники больших мощностей (протокол от 29.09.2022г.).

Председатель семинара,  
Зам.директора ИПФ РАН по научной работе  
д.ф.-м.н.

М.Ю.Глявин

Секретарь семинара  
к.ф.-м.н.

О.С.Моченева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт Прикладной Физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова 46  
Телефон: (831)4366202  
Сайт: <https://ipfran.ru/>  
E-mail: [dir@ipfran.ru](mailto:dir@ipfran.ru)