

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НРиИ ТУСУР,
д.т.н., профессор

Куксиско С.П.

« 16 »



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по результатам представления диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Форвакуумный плазменный источник непрерывного ленточного пучка электронов с расширенным диапазоном рабочих давлений» выполнена на кафедре физики ТУСУР.

В период подготовки диссертации аспирант Эброем жоэль-Эрик Дагри очно обучался в аспирантуре ТУСУРа. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов №Ас/7 от 29.05.2026 выдано Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель: Климов Александр Сергеевич, доктор технических наук, доцент, основное место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры физики, ведущий научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной модификации диэлектриков кафедры физики.

В итоге обсуждения доклада по результатам научного исследования Эброем жоэль-Эрик Дагри на расширенном научно-техническом семинаре кафедры физики принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Эброем жоэль-Эрик Дагри является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, направленных на расширение рабочего диапазона давлений форвакуумного плазменного источника непрерывного ленточного электронного пучка до 0,1 Па. В работе предложена и реализована двухступенчатая разрядная система с двумя торцевыми вспомогательными полыми катодами, обеспечивающая стабильное инициирование и горение основного разряда в диапазоне давлений 0,1–10 Па. Выявлена роль обратного ионного потока в

термомеханической деформации эмиссионного электрода и предложена многоапертурная система извлечения, позволяющая снизить неоднородность распределения плотности тока пучка до 10% при сохранении 85% полного тока. Продемонстрирована возможность использования созданного источника для генерации пучковой плазмы и модификации поверхностных свойств полимеров. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационных исследований, имеют важное значение для развития физической электроники и плазменных технологий обработки материалов в форвакуумной области давлений.

Актуальность диссертационной работы

Форвакуумные плазменные источники ленточных электронных пучков уверенно работают в диапазоне давлений 5–50 Па, однако их функционирование при более низких давлениях (0,1–1 Па) ограничено проблемами зажигания и устойчивого горения разряда с протяженным полым катодом. Решение этой проблемы видится в использовании внешней инжекции электронов, но существующие конструкции не обеспечивают одновременно стабильность разряда и высокую однородность эмиссионной плазмы при давлениях 0,1–1 Па. Пучковая плазма, генерируемая ленточными электронными пучками, перспективна для модификации поверхностных свойств полимеров благодаря низкой температуре электронов и возможности независимого управления параметрами обработки. Однако данные о применении форвакуумных плазменных источников для этих целей в диапазоне давлений 0,1–10 Па ограничены. Рассмотрение и решение указанных задач, описанное в представляемой диссертационной работе, является актуальным для развития пучково-плазменных технологий обработки материалов и генерации низкотемпературной плазмы в области давлений от 0,1 до 10 Па.

Научная новизна работы заключается в том, что

1. Для тлеющего разряда с протяженным цилиндрическим полым катодом определены условия стабильного инициирования и поддержания разряда в расширенном диапазоне форвакуумной области давлений 0,1–10 Па.
2. Исследованы процессы формирования ускоренного электронного пучка с неоднородностью не более 10% как в области низких (0,1 Па) так и высоких (10 Па) давлений.
3. Определены режимы генерации пучково-плазменного разряда в широкой области давлений работы форвакуумного плазменного электронного источника. Изучено влияние пучково-плазменной обработки на параметры и поверхностные свойства полимеров.

Практическая и научная ценность работы состоит в том, что:

1. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов расширения рабочего диапазона давлений форвакуумного плазменного источника непрерывного ленточного пучка электронов в область пониженных давлений вплоть до 0,1 Па.
2. Разработан и создан форвакуумный плазменный источник непрерывного ленточного пучка электронов, функционирующий в расширенном диапазоне

рабочих давлений 0,1–10 Па, обеспечивающий генерацию пучка сечением $20 \times 2 \text{ см}^2$, энергией электронов до 5 кэВ и плотностью тока до 10 мА/см^2 при ее равномерности 90%.

3. Результаты работы могут быть использованы в электроразрядных устройствах, функционирующих в области пониженных рабочих давлений форвакуумного диапазона (плазменных ионных источниках, генераторах низкотемпературной плазмы).

Личный вклад автора состоит в проведении исследований, анализе их результатов. Автором совместно с Ю.А. Бурачевским сконструирован и создан источник ленточного электронного пучка с двухступенчатой разрядной системой, собран зонд для измерения распределения плотности тока пучка, оснастка для пучково-плазменной обработки материалов. Совместно с научным руководителем определены задачи, решаемые в работе, выбраны методики эксперимента и произведен анализ полученных в ходе экспериментов результатов. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации в соответствии с пунктом 14 Положения о присуждении ученых степеней.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик (зондовая диагностика, оптическая спектроскопия, коллекторные измерения), удовлетворительным совпадением расчетных зависимостей и моделей с полученными экспериментальными данными, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного плазменного электронного источника.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Томск, 2023 гг.); VII международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» Республика Бурятия (г. Улан-Удэ, 2023 г.), Конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (г. Томск, 2022, 2024 гг.); международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2023-2026 гг.); международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2022-2026 г.); международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2022-2025 гг.).

Соответствие содержания диссертации выбранной специальности.

Выполненная работа соответствует паспорту специальности **1.3.5 – «Физическая электроника»** (технические науки), относится к направлениям:

- п. 1.4 – плазменная электроника, включая: плазменные источники электронов и источники ионов;

- п. 2 – электрические разряды в газах и их виды (тлеющий разряд с полым катодом);
- п. 4 – плазменная электроника (плазменные эмиттеры, источники заряженных частиц);
- п. 6 – технологические применения физической электроники (обработка материалов, плазмохимия).

Все результаты, представленные в диссертации, опубликованы в журнальных статьях и материалах конференций, перечисленных в автореферате и диссертации.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, соответствующих требованиям ВАК РФ, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:

1. Fore-Vacuum Ribbon Beam Plasma Electron Source Based on a Two-Stage Discharge System / A.S. Klimov, I. Y. Bakeev, **J. E. Dagri**, E. M. Oks, A. A. Zenin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Vol. 88. – No. 4. – P. 631-636.
2. Extending the Operating Pressure Range of a Forevacuum-Pressure Plasma-Cathode Rib-bon Electron Beam Source / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, **J. E. Dagri**, A. V. Dolgova, E. M. Oks, A. A. Zenin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2024. – Vol. 52. – No. 7. – P. 2786-2791.
3. Forevacuum plasma-cathode electron source for generation of a ribbon beam over a wide pressure range / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, Yu. A. Burachevsky, **J. E. Dagri** [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2023. – Vol. 94, – No. 7. – P. 073505.
4. Thermal Regime of the Emission Electrode in a Forevacuum Plasma Source of a Continuous Ribbon Electron Beam / A.S. Klimov, I. Bakeev, A.A. Zenin, **J.E. Dagri** // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. Принята к публикации.
doi: 10.1615/HighTempMatProc.2025060987
5. Ribbon electron beam for generation of beam plasma and beam-plasma treatment of polymers in the pressure range of 0.1–10 Pa / A. S. Klimov, **J.E Dagri**, A. V. Dolgova, A. A. Zenin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – No. 2. – P. S294-S301.

Научные результаты отражены также в следующих **научных изданиях:**

6. Ленточный источник электронного пучка, функционирующий в широком диапазоне давлений / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, **Ж. Э. Дагри** [и др.] // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Vol. 5, No 3(13). – P. 28-34.

Патент:

7. Патент на полезную модель № 222392 Российской Федерации, МПК H01J 15/00. Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка, функционирующий в широком диапазоне давлений.: № 2023124426: заявл. 22.09.2023: опубл. 22.12.2023 / Климов А.С., Зенин А.А., Бакеев И.Ю., **Дагри Э.Ж.;**

заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники – 5 с.: ил.

Публикации в сборниках статей и трудах конференций:

8. Форвакуумный плазменный электронный источник с двухступенчатой разрядной системой / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, А. А. Зенин, Ж. Э. Дагри, Е. М. Окс // Плазменная эмиссионная электроника: труды VII международного Крейнделевского семинара. – 2023. – С. 308
9. О распределении концентрации эмиссионной плазмы в форвакуумном плазменном электронном источнике с двухкатодной разрядной системой / Ж. Э. Дагри, Е. А. Егоров, А. С. Климов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2022. – № 1-1. – С. 216-218.
10. О влиянии режимов горения дополнительных разрядов на однородность плотности тока источника ленточного электронного пучка / Ж. Э. Дагри, Т. В. Якобчук // Перспективы развития фундаментальных наук: – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 169-171.
11. Влияние тока вспомогательных катодов на параметры разряда форвакуумного плазменного электронного источника / Э. Ж. э. Дагри, А. С. Климов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-1. – С. 219-221.
12. Исследование параметров плазмы в ленточном источнике электронов с двухступенчатой разрядной системой / Ж. Э. Дагри, А. С. Климов, Т. В. Якобчук // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2023. – № 1-1. – С. 253-255.
13. Инициирование тлеющего разряда в форвакуумном источнике электронов с двухступенчатой разрядной системой / Ж. Э. Дагри, А. С. Климов, Т. В. Якобчук // Перспективы развития фундаментальных наук: – Томск: 2024. – С. 30-32.
14. Влияние разряда на нагрев эмиссионного электрода форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов / Ж. Э. Дагри, А. В. Долгова // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. – С. 36-38.
15. Исследование зависимости эмиссионных свойств пучковой плазмы от режимов работы плазменного источника электронов / Ж. Э. Дагри, А. В. Долгова // Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник научных трудов XXIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2026.

Диссертация «Форвакуумный плазменный источник непрерывного ленточного пучка электронов с расширенным диапазоном рабочих давлений» Эбром жозль-

Эрик Дагри рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании расширенного научно-технического семинара кафедры Физики, с привлечением специалистов кафедры электронных приборов и кафедры физической электроники.

Присутствовало на заседании 20 чел., в том числе докторов наук – 6, кандидатов наук – 5. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 58 от «15» июня 2026 г.

Председатель расширенного
научно-технического
семинара



доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики

Окс Ефим Михайлович

Секретарь расширенного
научно-технического
семинара



доктор технических наук,
профессор кафедры физики

Бурдовичин Виктор Алексеевич