

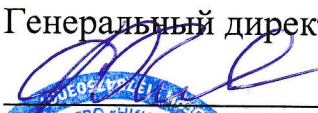


НИИЭФА
РОСАТОМ

ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова»
(АО «НИИЭФА»)

"УТВЕРЖДАЮ":

Генеральный директор

 С.В. Герцог



2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

о диссертационной работе Торбы Максима Сергеевича «Источник интенсивного субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с многодуговым сеточным плазменным катодом», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Актуальность темы. Источники интенсивных электронных пучков большого сечения находят самое разнообразное научное и практическое применение благодаря их широкому диапазону параметров и высокой эффективности вклада энергии пучка в вещество, а также уникальным эффектам, происходящим в поверхности обрабатываемого материала, которые недостижимы при использовании иных способов энергетического воздействия. Пучки большого сечения — это электронные пучки, которые формируются с

протяжённой эмиссионной поверхности, что позволяет изменять или управлять конфигурацией таких электронных пучков, обеспечивая возможность генерации планарных, кольцевых, радиально сходящихся и расходящихся пучков и др. с плотностью энергии достаточной для нагрева поверхностных слоёв различных материалов вплоть до их плавления и даже частичного испарения. Вне зависимости от способа генерации электронного пучка, такие источники, в том числе, могут использоваться для модификации поверхности различных металлических и металлокерамических материалов и изделий с целью улучшения их функциональных и эксплуатационных свойств (закалка, полировка, коррозионная стойкость и т.д.).

Существенную долю разработанных и созданных источников электронов составляют источники с планарной геометрией ускоряющего промежутка. Такие источники находят свое применение при решении обозначенных выше задач, однако имеют существенное технологическое ограничение, связанное со сложностью, а зачастую и невозможностью обработки поверхности изделий с геометрией, отличающейся от плоской (например, цилиндрической), что также приводит к необходимости сканирования по поверхности изделия электронным пучком в азимутальном направлении путем вращения изделия, и, в конечном итоге, служит причиной неудовлетворительного качества обработки его поверхности и/или низкой производительности процесса. Это заставило исследователей задуматься о целесообразности разработки источников электронов, позволяющих генерировать интенсивные радиально сходящиеся пучки электронов с катодами на основе различных типов эмиссии, каждый из которых имеет преимущества в своем диапазоне параметров, а также свои технологические особенности и ограничения. Это определяет актуальность обозначенной тематики и необходимость разработки альтернативных источников электронов с уникальными параметрами и технологическими возможностями.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 153 страницы. В работе насчитывается 59 рисунков, 1 таблица и 130 наименований в списке литературы.

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, приведены защищаемые научные положения, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору и сравнительному анализу источников электронов на основе различных типов эмиссии. Представлена аргументация в пользу использования источников с сеточными плазменными катодами, а также показана возможность генерации радиально сходящихся субмиллисекундных электронных пучков с их помощью. Продемонстрирована перспективность применения таких источников в области обработки металлических изделий. Рассмотрены различные системы электропитания сеточного плазменного катода. Сделаны выводы, позволяющие сформулировать задачи диссертационной работы.

Во второй главе детально описан экспериментальный стенд источника электронов с сеточным плазменным катодом, способный генерировать интенсивный радиально сходящийся пучок субмиллисекундной длительности. Представлена система электропитания и управления многодуговым разрядом на основе индуктивных накопителей, аргументирован её выбор. Описаны методики и техники экспериментов по проведению зондовых измерений параметров эмиссионной плазмы, генерируемой в многодуговом разряде низкого давления и коллекторных измерений интенсивного субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с помощью специально разработанной и созданной системы.

Третья глава посвящена результатам исследований по генерации многодугового разряда низкого давления и эмиссионной плазмы, а также исследованию их параметров. Описаны условия и выходные параметры

источника электропитания для стабильной генерации многодугового разряда. Продемонстрированы результаты зондовых измерений параметров эмиссионной плазмы и сделаны выводы о её развитии и генерации в сеточном плазменном эмиттере. Особое внимание уделено определению степени неоднородности эмиссионной плазмы в сеточном плазменном эмиттере на основе многодугового разряда низкого давления, сделаны выводы о количестве и расположении плазмогенераторов на основе проведённых исследований.

В четвёртой главе представлены результаты по генерации радиально сходящегося электронного пучка, получению его характеристик в зависимости от различных условий генерации. Показаны результаты исследований влияния условий генерации пучка (ускоряющего напряжения, тока дугового разряда, длительности импульса и т.д.) на стабильность работы системы и достигаемые параметры радиально сходящегося электронного пучка. Представлены результаты измерения неоднородности радиально сходящегося электронного пучка при помощи секционированного коллектора, а также рассмотрены способы стабилизации радиально сходящегося пучка и снижения его неоднородности. Проведены демонстрационные эксперименты по обработке стержней из титана ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Продемонстрированы режимы генерации пучка, которые позволяют с удовлетворительным качеством проводить модификацию поверхности цилиндрических изделий диаметром от 10 мм до 30 мм.

В заключении сформулированы основные результаты проведённых исследований.

Достоверность и обоснованность выводов по результатам диссертационной работы подтверждается их непротиворечивостью относительно существующих представлений о природе изучаемых явлений, и основана на применении современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Автором работы разработан и создан источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления. Определены стабильные режимы генерации однородного ($\pm 10\%$) радиально сходящегося электронного пучка с энергией до 700 Дж при длительности импульса до 500 мкс, что позволяет обеспечивать плотность энергии до 14 Дж/см^2 на коллекторе диаметром 16 мм.

2. Автором работы разработана и создана эмиссионная ячейка для генерации радиально сходящегося электронного пучка в секторе 60° в источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Разработанная ячейка позволяет проводить модификацию поверхности металлических изделий за один импульс тока пучка длительностью 150 мкс с током в ускоряющем промежутке до 100 А и ускоряющем напряжении до 30 кВ, обеспечивая плотности энергии пучка на коллекторе до 30 Дж/см^2 .

3. Автором продемонстрирован способ самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка, позволяющий достигать токов до 10 раз превышающих ток Чайлда-Ленгмюра для цилиндрического диода, за счёт компенсации объёмного заряда электронов пучка ионами нарабатываемой плазмы в ускоряющем промежутке.

Научная и практическая ценность

На основе проведённых исследований разработан и создан источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, позволяющий проводить модификацию поверхности цилиндрических металлических изделий с плотностью энергии пучка до 30 Дж/см^2 при ускоряющем напряжении до 50 кВ, длительности импульсов до 500 мкс и частоте их следования до 1 с^{-1} . Используя созданный источник электронов были промоделированы и экспериментально реализованы режимы генерации пучка, пригодные для модификации поверхности металлических изделий (на примере стержней диаметром от 10 до 30 мм из титана марки ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т), позволяющие увеличить микротвёрдость поверхности образца из

титана с 1,8 ГПа до 4,7 ГПа и уменьшить шероховатость поверхности нержавеющей стали с 2 мкм до 0,4 мкм. Совокупность проведенных исследований может служить основой для решения прикладных задач по увеличению износостойкости поверхности наиболее ответственных деталей машин, пар трения и т.д.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Материалы диссертационной работы отражены в 10 работах: в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» или учитываемых в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus и 1 патенте на изобретение.

Таким образом, актуальность тематики, научная значимость, новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Представленная диссертация даёт полное представление о приведённых автором исследованиях, а автореферат полностью соответствует структуре и содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Оценка содержания диссертации, её завершённость в целом

Диссертационная работа является цельным самостоятельным исследованием. Научные положения и выводы по работе аргументированы в достаточной степени и являются значимыми для развития областей науки, связанных с модификацией материалов.

Замечания по диссертации

1. В тексте диссертации присутствуют отдельные опечатки, стилистические неточности в оформлении и формулировках, использование жаргонных выражений, неточности в рисунках и т.д.

2. В главе 3 нет данных об экспериментальных исследованиях параметров эмиссионной плазмы при наличии ускоряющего напряжения. Очевидно, что

параметры эмиссионной плазмы должны существенно отличаться в условии отбора из нее электронов и наличием обратного потока быстрых ионов из ускоряющего промежутка. Предположение о значительном проникновении электрического поля внутрь эмиттера и, как следствие, неоднородности распределения эмиссионной плазмы при использовании крупной эмиссионной сетки в этом случае могло бы быть проверено/опровергнуто экспериментально.

3. В диссертации отмечено, что все экспериментальные исследования проводились после «тренировки» системы, которая заключается в постепенном выходе на требуемый режим генерации электронного пучка с постепенным увеличением ускоряющего напряжения и амплитуды тока разряда (10 минут, до 100 импульсов). При таком подходе отсутствует качественная постановка задачи в стремлении обработки поверхности за единичный импульс (Глава 4). Вопрос о том, можно ли использовать терминологию обработки за единичный импульс при наличии режима такой «тренировки» оставлен открытым.

4. В диссертации поверхностно описана стабильность и воспроизводимость параметров источника в различных режимах (на уровне «типичных» осциллограмм). Из экспериментально полученных распределений концентрации плазмы и её потенциала видно, что разброс параметров не всегда укладывается в линейные зависимости от ускоряющего напряжения или давления рабочего газа. Измерение азимутального распределения плотности тока электронного пучка проведено при токе в ускоряющем промежутке 20 А и ускоряющем напряжении 30 кВ, однако при более интенсивных режимах распределение плотности тока пучка отсутствует. Нет данных о стабильности эксплуатационных характеристик в режиме плавления поверхности за один импульс.

Заключение

Диссертация М.С. Торбы выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, которая посвящена генерации интенсивного радиально сходящегося

электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике электронов с плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления для реализации технологий модификации материалов.

Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в рецензируемых научных изданиях, апробированы на российских и международных конференциях.

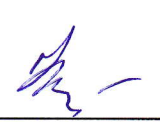
Считаем, что диссертационная работа «Источник интенсивного субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с многодуговым сеточным плазменным катодом» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021), а ее автор, Торба Максим Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.

Доклад соискателя заслушан, отзыв на диссертационную работу и автореферат рассмотрен на расширенном заседании секции «Термоядерные установки, магнитные, плазменные и лазерные технологии» НТС АО «НИИЭФА», протокол заседания №2026-06/110 от 25.06.2026 г.

Отзыв составили:

главный специалист НИЛ пучковых технологий

НИО «Плазменно-пучковые технологии»

НТЦ «Синтез», кандидат технических наук  К.И. Ткаченко

научный руководитель – заместитель генерального

директора по технологиям электродвижения,

доктор физико-математических наук  О.Г. Филатов

« 30 » июня 2026 г.

Ткаченко Константин Иванович, кандидат технических наук, главный специалист научно-исследовательской лаборатории пучковых технологий научно-исследовательского отделения «Плазменно-пучковые технологии» НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА»; тел.: +7(812) 462-77-07, электронная почта: ktkachenko@sintez.niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой д. 3.

Филатов Олег Геннадиевич, доктор физико-математических наук, научный руководитель - заместитель генерального директора по технологиям электродвижения АО «НИИЭФА»; тел.: +7(812) 464-44-59, электронная почта: filatovg@niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой д. 3.

Контактные данные ведущей организации:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (гор. Санкт-Петербург), факс: +7(812)464-79-79; тел.: +7(812) 464-89-63, электронная почта: mail@niiefa.spb.su; почтовый адрес: 196641, гор. Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3.