

Минобрнауки России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11,
г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 16 ИЮЛ 2026 № 15311 – 44/11-38/2009

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерной физики имени
Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)
Академик РАН

Доктор физ.-мат. наук
Логачев Павел Владимирович



2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук на диссертацию Москвина Павла Владимировича

«Повышение стабильности генерации интенсивных импульсных пучков в
источниках электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого
давления»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы диссертации

Импульсные источники электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, генерирующие пучки шириной от единиц сантиметров с плотностью мощности от долей МВт/см² используют для исследований, направленных на улучшения свойств поверхности сталей и сплавов. Такой подход является ресурсосберегающим за счёт введения энергии в поверхность. Наблюдаемое изменение микроструктуры материала и, как следствие, улучшение эксплуатационных свойств, зачастую не достигается традиционными методами термической обработки.

Промышленное использование источников электронов накладывает требования на повторяемость результата воздействия, которая напрямую зависит от повторяемости параметров пучка электронов, поэтому повышение стабильности генерации интенсивных импульсных пучков является актуальной темой.

Оценка структуры и содержания работы

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц текста, 63 рисунка и 13 таблиц. Список литературы содержит 97 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, обозначены цель и задачи работы, приведены защищаемые научные положения, а также отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Перечислены основные методы исследования.

В первой главе представлен обзор литературных данных о применении пучков электронов и способах расширения их параметров. Рассмотрены основные процессы, дестабилизирующие работу источников электронов, пути их подавления. Определены основные задачи и направления исследований.

Во второй главе подробно описаны используемые экспериментальные стенды, источник электронов «СОЛО», имеющееся и созданное в ходе выполнения работы диагностическое оборудование, изложены особенности созданных устройств электропитания и синхронизации. В главе представлена методика зондовых измерений параметров катодной и анодной плазмы источника электронов. Приведён способы расчёта доверительных интервалов для доли импульсов с пробоем ускоряющего промежутка.

В третьей главе приведены результаты исследований параметров горения разряда, формирующего плазменный катод, в зависимости от условий генерации, наличия эмиссии и величины ионного тока в ускоряющем промежутке источника электронов. Рассмотрено влияние величины ионного тока на потенциал катодной плазмы, исследована динамика распределения плотности тока разряда на сетке – аноде разрядной ячейки. Исследован распад катодной плазмы при резком отключении тока разряда, измерен коэффициент извлечения тока пучка.

В четвертой главе представлены способы уменьшения доли импульсов с пробоями ускоряющего промежутка и расширения предельных параметров источника электронов. Показано, что увеличение фронта тока разряда до времени установления стационарного распределения плотности его тока обеспечивает кратное снижение частоты возникновения пробоев ускоряющего промежутка. Путём использования поворотной магнитной системы транспортировки пучка достигнуто ослабление влияния коллекторной плазмы на стабильность работы источника электронов и увеличен максимальный ток пучка. Приведён способ создания плазменного анода до начала генерации электронного пучка для улучшения условий его транспортировки на начальной стадии формирования, также понижающий долю импульсов с пробоями. С применением данных технологий проведено пробное алитирование (покрытие слоем алюминия) стали 20 в трех режимах, показавшее кратное повышение микротвердости и износостойкости ее поверхности.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

Содержание и структура диссертации соответствуют цели исследования. Диссертация выстроена логически, материал изложен последовательно, а ее содержание соответствует заявленной специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника и теме диссертации.

Автореферат и публикации адекватно и полно отражают содержание диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений обусловлена следующим:

1. Достоверность первого научного положения основана на использовании общепринятой стандартной методики осциллографирования электрических сигналов с их последующей обработкой и анализом, измерении распределения плотности тока электрическими коллекторами, эмпирическом определении частоты возникновения пробоя согласно известной методике на основе большого (600 для каждого набора условий) количества наблюдений;

2. Достоверность второго научного положения подтверждается применением стандартного общепринятого подхода к измерению плотности энергии, приносимой пучком электронов на мишень, общепринятым методом измерения импульсных токов поясами Роговского одновременно с определением частоты возникновения пробоев;

3. Достоверность третьего научного положения подтверждается использованием стандартных зондовых методов измерения параметров плазмы, применением известного статистического метода для определения частоты возникновения пробоев с высокой надёжностью;

Достоверность и обоснованность выводов по результатам исследований и положений, выносимых на защиту, обусловлена их непротиворечивостью относительно существующих представлений о природе изучаемых явлений, а также на применении современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Выявлено существенное различие в распределении плотности анодного тока в осесимметричной разрядной ячейке плазменного эмиттера электронов на основе дугового разряда низкого давления на начальном этапе формирования разряда и в установившемся режиме его горения.

2. Предложен и реализован способ оценки коэффициента извлечения электронов из плазменного катода при наличии тока ионов в ускоряющем промежутке, основанный на анализе срезов импульсов тока разряда и тока ускоряющего промежутка. Метод не требует определения эффективного коэффициента вторичной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода.

3. Предложено решение, обеспечивающее увеличение доли импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов плазменного источника на основе дугового разряда низкого давления, заключающееся в отклонении электронного пучка (на 90 градусов) от оси источника электронов и увеличении длины трубы дрейфа пучка.

Научная и практическая значимость полученных результатов

1. Предложенные и применённые в диссертационной работе способы повышения стабильности генерации интенсивного электронного пучка по отдельности и в сочетании применимы для любого импульсного источника электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы с оговоренными ограничениями эффективности способа, зависящим от условий генерации пучка.

2. Для источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы создан генератор плазмы в скрещённых электрическом и магнитном полях для формирования вспомогательного плазменного анода, расширяющий диапазон рабочих давлений источника и кратно увеличивающий долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для модификации поверхности изделий с целью улучшения ее функциональных и/или эксплуатационных характеристик, недостижимых или сложно реализуемых с использованием альтернативных способов модификации поверхности.

4. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные могут быть использованы для теоретических расчётов процессов генерации и транспортировки пучков электронов.

Замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертации присутствуют отдельные ошибки оформления, которые не влияют на качество и понимание полученных результатов, но ухудшают восприятие и впечатление от проделанной работы. Например:

1.1 На стр.14 "... Плотность ионного тока на секту..." – опечатка.

1.2. На рисунке 2.14 не подписаны индексы «а», «б». На рисунках 3.14, и 4.5 в подписи к рисунку отсутствует привязка к рисункам «а» и «б».

1.3. Часть представленных осциллограмм являются скриншотами рабочего окна осциллографа и содержат большое количество лишней/ненужной информации (например, Рис. 4.16).

1.4. Автор диссертации небрежно подходит к выбору угла съёмки для фотографических материалов, так, что в ряде случаев представить габариты системы или узла установки очень сложно.

2. В тексте диссертации автор достаточно ответственно подошёл к вопросам статистики, в работе подробно описан подход к статистическому анализу полученных результатов и выбор соответствующих коэффициентов.

2.1. Тем не менее в работе есть достаточно большое количество экспериментальных результатов, аппроксимационные кривые для которых проходят вне доверительных интервалов. Полученное несоответствие никак не комментируется. Например, на рисунках: 3.17(а), 4.5, 4.15(б).

2.2. Никак не комментируется существенный разброс в размерах доверительных интервалов в рамках единой серии экспериментов. Например, рисунки 4.15 и 4.21.

2.3. К рисунку 3.9, где относительные распределения энергии по сечению электронного пучка принимают отрицательные значения, возникает вопрос – это что, неудачная аппроксимация?

3. В разделе 3.2 на рисунке 3.6(а) автор приводит сигналы с зондов в отсутствие перераспределяющего электрода, а на рисунке 3.6(б) осциллограммы разряда при наличии данного электрода. Для лучшего понимания стоило разделить рисунки по наличию перераспределяющего электрода и показать осциллограммы и сигналы зондов для одного и того же случая.

4. В Таблице 3.1 приведены данные по потенциалу плазмы и плотности электронного тока в разных областях эмиттера. При этом никак не прокомментировано отсутствие данных по центру эмиттера.

5. В разделе 3.2. на рисунке 3.10а приводятся результаты моделирования распределения концентрации плазмы внутри эмиттера с явно неполной постановкой задачи и с минимальными комментариями. В таком виде моделирование в данной работе носит лишь иллюстративный характер.

6. В главе 4 автор рассматривает модернизированную систему, в которой поворот эл. пучка происходит на угол 90 градусов с радиусом кривизны 50 см. Однако в тексте диссертации не приведены расчёты или комментарии по выбору угла поворота и радиуса кривизны.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное научное исследование. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

Заключение

Диссертационная работа Москвина Павла Владимировича «Повышение стабильности генерации интенсивных импульсных пучков в источниках электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления» является законченной научно-квалификационной работой, в которой проведено исследование, направленное на

уменьшение количества импульсов, в которых возникает электрический пробой ускоряющего промежутка источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления со стабилизированной катодной и открытой анодной поверхностью плазмы для повышения стабильности генерации электронного пучка. Исследование проведено на высоком уровне и имеет существенное практическое значение для разработки и применения источников такого типа. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Москвин П.В. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. – Вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных на открытом научном семинаре плазменных лабораторий ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, состоявшемся 7 июля 2026 г. и утвержден на заседании Ученого совета плазменных лабораторий 9 июля 2026 г., протокол № 6.

Проект отзыва составил:

главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН,

доктор физико-математических наук, профессор,

шифр и наименование научной специальности: 01.04.08 — «Физика и химия плазмы»

телефон: +7 (383) 329-46-02;

электронная почта: A.V.Burdakov@inp.nsk.su

 Александр Владимирович Бурдаков

Подпись А.В. Бурдакова заверяю

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН:

кандидат физико-математических наук

телефон: +7 (383) 329-47-99;

электронная почта: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su

 Алексей Викторович Резниченко

