

УТВЕРЖДАЮ

Вр.и.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН),  
к.ф.-м.н.



Гармаев Б.З.

« 14 » июля 2026 г.

## ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность избранной темы обуславливается неослабевающим интересом исследователей к разработке источников электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, которые отличаются высокой энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы (определяемой отношением мощности затрачиваемой на генерацию плазмы к мощности генерируемого электронного пучка) и позволяют получать интенсивные электронные пучки субмиллисекундной длительности. Применение известных плазменных источников электронов связано с существенными технологическими ограничениями. Сложностью обработки поверхности изделий цилиндрической формы, приводящей к необходимости сканирования по поверхности изделий электронным пучком в азимутальном направлении, либо путем вращения изделия, и является причиной неудовлетворительного качества обработки его поверхности и низкой производительности процесса. К числу перспективных подходов относится разработка 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 и свои технологические особенности и ограничения. Это определяет актуальность обозначенной тематики и необходимость разработки альтернативных источников электронов с уникальными параметрами и технологическими возможностями.

Важным выглядит разработка и создание источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, способного генерировать интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности, позволяющий проводить модификацию поверхности металлических материалов и изделий

цилиндрической формы с удовлетворительной неоднородностью плотности тока на обрабатываемом изделии (образце).

Целесообразность исследований подтверждается обстоятельным критическим анализом реальной ситуации, сложившейся в последнее время в области исследования процессов модификации цилиндрических поверхностей, реализуемых с применением радиально сходящегося пучка электронов субмиллисекундной длительности. Основное внимание уделено разработке электродной системы и блоков электропитания источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления, генерирующего интенсивный радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности и оригинального диагностического оборудования проведения коллекторных измерений плотности тока радиально сходящегося пучка. Поиску режимов генерации субмиллисекундного радиально-сходящегося электронного пучка с плотностью энергии достаточной для модификации поверхности металлических материалов и изделий с удовлетворительной неоднородностью. Демонстрация возможности использования созданного источника электронов для модификации поверхности материалов и изделий цилиндрической формы. На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи исследований.

Изучение диссертации и публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК подтверждает, что диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку и является научно-квалификационной работой. В полной мере соответствует требованиям и критериям, установленным действующим постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Постановлениям от 21 апреля 2016 г. № 335 "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» и от 20.03.2021 г. № 426 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации...». Приказа Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей...».

Характер результатов диссертации отвечает на большие вызовы, обозначенные приоритетным направлением Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, - Указ Президента Российской Федерации от 01 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», раздел II, п. 20 «Переход ... к новым материалам и способам конструирования...». Перечнем важнейших наукоемких технологий, раздел II, «Сквозные технологии», п. 23. «Технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками» - Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших

наукоемких технологий».

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке:

- Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания по научной теме FWRM-2021- 0006 (2021-2023);

- грантами Российского научного фонда, руководитель проекта № 23-29-00939 (2023-2024), исполнитель проектов № 20-79-10015 (2020-2023), № 25-19-00745 (2025-2027), № 26-19-00927 (2026-2028).

Достоверность и обоснованность выводов по результатам исследований и положений, выносимых на защиту обусловлена 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.

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения, в частности, определение стабильных режимов генерации радиально сходящегося электронного пучка с энергией до 700 Дж и плотностью энергии до  $14 \text{ Дж/см}^2$  в источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления при длительности импульса до 500 мкс и удовлетворительной неоднородности  $\pm 10\%$  его плотности энергии на коллекторе диаметром 16 мм. Создание эмиссионной ячейки модификации поверхности металлических изделий за один импульс генерации радиально сходящегося электронного пучка в секторе  $60^\circ$  с током в ускоряющем промежутке до 100 А и длительностью 150 мкс при ускоряющем напряжении до 30 кВ, обеспечивающей энергию на коллекторе до 200 Дж при плотности энергии пучка до  $30 \text{ Дж/см}^2$ . Демонстрирование способа аксиальной самофокусировки радиально сходящегося электронного пучка с токами, значительно превышающими до  $\sim 10$  раз токи Чайлда-Ленгмюра для цилиндрического вакуумного диода за счёт компенсации объёмного заряда электронов пучка ионами нарабатываемой плазмы в ускоряющем промежутке.

Научная значимость полученных результатов заключается в значительном вкладе в понимание основных физических процессов, влияющих на генерацию радиально сходящегося электронного пучка источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления.

К наиболее значимым относятся:

Электродная система в источнике с многодуговым сеточным плазменным катодом выполняется в виде набора элементарных эмиссионных ячеек. Позволяет достичь снижения азимутальной неоднородности плотности тока радиально сходящегося электронного пучка  $< \pm 10 \%$ , повысить стабильность его генерации и исключить взаимосвязь дуговых разрядов в условиях неоднородности наработки пучковой плазмы в ускоряющем промежутке, обусловленной различными процессами на коллекторе (дегазация, плавление, испарение), возникающими локально и

дестабилизирующими работу источника электронов.

Элементарной эмиссионной ячейкой сеточного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления обеспечивается генерация низкоэнергетического до 30 кВ радиально сходящегося электронного пучка на поверхности металлического стержня диаметром 16 мм, в секторе  $60^\circ$  с током до 100 А, длительностью 150 мкс и плотностью энергии до 30 Дж/см<sup>2</sup>.

Обеспечивается генерация радиально сходящегося электронного пучка субмиллисекундной длительности разработанным и созданным прототипом источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления с уникальной совокупностью параметров: ускоряющее напряжение от 5 до 50 кВ, ток в ускоряющем промежутке от 20 до 150 А, длительность импульсов от 50 до 500 мкс, частота следования импульсов до 1 с<sup>-1</sup>, плотность энергии электронного пучка от 2,5 до 30 Дж/см<sup>2</sup> при диаметре коллектора 10 – 16 мм.

Значима практическая ценность работы. Разработан и создан источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Промоделированы и экспериментально реализованы режимы модификации поверхности металлических изделий (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 до 4,7 ГПа и уменьшить шероховатость поверхности нержавеющей стали с 2 до 0,4 мкм.

Результаты диссертационной работы удостоены:

- стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации (2024-2025).

Наряду с достаточным изложением научно обоснованных новых технических и технологических решений, в диссертации обнаруживаются следующие замечания:

- в диссертации с.10, п. 2 раздела *Научные положения, выносимые на защиту*, повторяет содержание п. 2, с. 8 раздела *Научная новизна*;

- в диссертации (с. 84, рисунок 3.5 (б)) на зависимости концентрации электронов, измеренной в различные моменты времени длительности импульса, наблюдается заметный рост концентрации электронов в плазме дугового разряда до длительности импульса разряда 60 мкс, при длительности импульса в моменты времени 60-100 мкс концентрация электронов не изменяется. Требуется пояснение утверждение, что такой ход зависимости связан ...с расширением плазмы и заполнением ею объёма сеточного плазменного катода;

- в диссертации (с. 94, рисунок 4.2) наблюдается немонотонный характер ...зависимости тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения при различных давлениях рабочего газа... При ускоряющем напряжении 35 кВ наблюдается провал на всех зависимостях в диапазоне

давлений  $(2,5-5) \cdot 10^{-2}$  Па. Определенно требует пояснения, какими факторами обусловлен такой характер зависимостей;

- в диссертации (с. 110, рисунок 4.13) представлены осциллограммы тока разряда и тока в ускоряющем промежутке, ток разряда в пределах длительности импульса 10-160 мкс практически не изменяется, при этом ток в ускоряющем промежутке в пределах длительности импульса 15-30 мкс снижается от 50 до 30 А, затем растет и при чем немонотонно от 30 до 90 А в пределах длительности импульса 30-160 мкс, требует пояснения такой характер зависимости тока в ускоряющем промежутке в пределах длительности импульса 10-160 мкс;

- в автореферате с. 21, п. 8 раздела *Заключение* отмечается: *Полученные результаты могут служить практическими рекомендациями для решения прикладных задач по увеличению износостойкости поверхности...* при этом на с. 18 абзац 1 указывается: *подтверждена принципиальная возможность ... обработки металлических изделий за десятки импульсов тока пучка с плотностью энергии до  $14 \text{ Дж/см}^2$* , однако не приводится демонстрация результатов использования созданного источника электронов с сеточным плазменным катодом для модификации поверхности материалов и изделий цилиндрической формы;

- в автореферате (раздел «Список публикаций по теме диссертации», с. 22-23, ссылки 1-4, 7-10) не указан полный перечень соавторов, что в определенной мере влияет на наукометрические показатели (цитирование) не указанных соавторов статей, опубликованных по теме диссертации.

Принимая во внимание достаточную степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации и выдвигаемых автором для публичной защиты, их достоверность и новизну. Достаточный научный уровень 10 опубликованных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, включенных в актуальную версию «Белого списка» (БС), из них 6 статей с коэффициентом уровня журналов БС1, в том числе 9 статей в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ, 1 статья в Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation, апробацию результатов диссертации на 11 международных и всероссийских научных конференциях. Предложенные автором новые принципиальные технические решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными решениями и защищены патентом RU на изобретение.

Диссертационная работа «Источник интенсивного субмиллисекундного радиально сходящегося электронного пучка с многодуговым сеточным плазменным катодом» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842, ее автор, Торба Максим Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук, по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

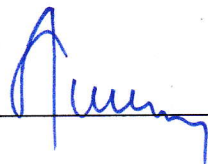
бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), доктор технических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, профессор по специальности 01.04.04 - физическая электроника,

Семенов Александр Петрович.

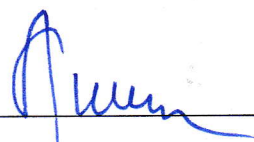
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6,

телефон: 8(3012)433184,

E-mail: semenov@ipms.bscnet.ru

 А.П. Семенов

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

 А.П. Семенов

Подпись удостоверяю, начальник Организационного отдела  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии  
наук.



Александрова А.И.

Почтовый адрес: 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6.

Телефон: 8(3012)433184, E-mail: dir@ipms.bscnet.ru

« 14 » июля 2026 г.