

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет 24.1.115.02 (Д 003.031.01), созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, извещает о результатах публичной защиты диссертации Черкасовым Александром Алексеевичем состоявшейся 12 декабря 2025 года на тему: «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. вакуумная и плазменная электроника.

Время начала заседания: 15.00

Время окончания заседания: 18.15.

На заседании диссертационного совета присутствовали 14 человек из 16 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 2.2.1. –вакуумная и плазменная электроника:

- | | | |
|---|-----------|--------|
| 1. Ратахин Николай Александрович – председатель диссертационного совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 2. Романченко Илья Викторович – зам. председателя диссертационного совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 3. Озур Григорий Евгеньевич – ученый секретарь диссертационного совета | д.т.н. | 2.2.1. |
| 4. Воробьев Максим Сергеевич – член совета | д.т.н. | 2.2.1. |
| 5. Иванов Юрий Фёдорович – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 6. Климов Александр Сергеевич – член совета | д.т.н. | 2.2.1. |
| 7. Коваль Николай Николаевич – член совета | д.т.н. | 2.2.1. |
| 8. Козырев Андрей Владимирович – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 9. Кошелев Владимир Ильич – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 10. Ломаев Михаил Иванович – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 11. Окс Ефим Михайлович – член совета | д.т.н. | 2.2.1. |
| 12. Ростов Владислав Владимирович – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 13. Соснин Эдуард Анатольевич – член совета | д.ф.-м.н. | 1.3.5. |
| 14. Юшков Георгий Юрьевич – член совета | д.т.н. | 2.2.1. |

Заседание вел председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, академик РАН Ратахин Николай Александрович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 14, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Черкасову Александру Алексеевичу учёную степень кандидата технических наук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.115.02 (Д 003.031.01), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.12.2025 г. № 3

О присуждении Черкасову Александру Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков», по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника принята к защите 10 октября 2025 года (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.1.115.02 (Д 003.031.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 634055, Томск, просп. Академический, д. 2/3, приказ о создании совета № 1555/нк от 21 ноября 2022 г.

Соискатель Черкасов Александр Алексеевич, 7 августа 1998 года рождения, в 2025 г. окончил очную аспирантуру ИСЭ СО РАН по направлению подготовки 11.06.01 – электроника, радиотехника и системы связи, и научной специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника. Работает младшим научным сотрудником ИСЭ СО РАН.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории плазменных источников ИСЭ СО РАН. Научный руководитель – кандидат технических

наук, старший научный сотрудник ИСЭ СО РАН Шандриков Максим Валентинович.

Официальные оппоненты:

Сахаров Юрий Владимирович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ФГАОУ ВО «ТУСУР»), заведующий кафедрой физической электроники, г. Томск.

Казиев Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент кафедры физики плазмы (№21), г. Москва
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург (ИЭФ УрО РАН) в своем положительном отзыве, подписанном заведующим лабораторией пучков частиц, член-корр. РАН, д.т.н. Гавриловым Николаем Васильевичем и утвержденном директором ИЭФ УрО РАН член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Чайковским Станиславом Анатольевичем, указала, что диссертационная работа Черкасова А.А. «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков» представляет собой законченное исследование, в котором решается актуальная научно-техническая задача снижения рабочего давления сильноточного импульсного магнетронного разряда. Исследование проведено на высоком уровне и соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертации «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г, а сам Черкасов А.А. заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 8 в рецензируемых научных изданиях, 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.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных работах.

Наиболее значимые работы соискателя:

1) Parameters and ion mass-to-charge composition of a high-power impulse magnetron discharge with electron injection / M. V. Shandrikov, A. A. Cherkasov, E. M. Oks, // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 200. – С. 111056.

2) Low-pressure high-current pulsed magnetron discharge with electron injection from a vacuum arc plasma emitter / M. V. Shandrikov, A. A. Cherkasov, E. M. Oks, A. V. Vizir, D. B. Zolotukhin // *Vacuum*. – 2024. – Vol. 219. – P. 112721.

3) Low-pressure high-current magnetron discharge with electron injection: From self-sputtering with multiply charged metal ions to non-sputtering with “pure” gas ions / M. V. Shandrikov, A. A. Cherkasov, E. M. Oks, K. P. Savkin // *Vacuum*. – 2024. – Vol. 228. – P. 113512.

4) Corrosion Performance of Chemically Passivated and Ion Beam-Treated Austenitic–Martensitic Steel in the Marine Environment / V. Semin, A. Cherkasov, K. Savkin, M. Shandrikov, E. Khabibova // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9. – №. 5. – P. 167.

5) Modified residual gas analyzer for measuring the ion mass-to-charge composition of a repetitively pulsed plasma / M. V. Shandrikov, A. A. Cherkasov, E. M. Oks, A. V. Vizir, // *AIP Advances*. – 2022. – Vol. 12. – №. 2.

На автореферат диссертации поступили отзывы:

1. Отзыв от главного научного сотрудника ФГБУН Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН, г. Улан-Удэ), доктора технических наук, профессора Семенова Александра Петровича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«– требует пояснения утверждение (пункт 2, с. 6, подраздел ...научные положения), «... Увеличение тока инжекции... способствует увеличению концентрации генерируемой плазмы и плотности ионного тока на подложку... что... приводит к увеличению... степени кристалличности напыляемого покрытия»;

– (с. 9) указано «...Для более эффективного использования энергии инжектируемых электронов использовался отражательный электрод 3, находящийся под отрицательным потенциалом мишени», в этом случае электрод 3 и его держатель будет распыляться ионами и загрязнять покрытие неконтролируемой примесью, при этом вносит неконтролируемую примесь и эрозия стержневого катода и иницилирующего электрода вакуумной дуги;

– (с. 16, рисунок 12) трудно читается, отсутствует структурная схема ионного источника, приведена только фотография общего вида.»

2. Отзыв от старшего научного сотрудника ФГБУН Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН г. Новосибирск), кандидата физико-математических наук, Соколовой Евгении Олеговны. Отзыв положительный, имеется замечание:

– «Автореферат достаточно емко отражает содержание диссертации. Однако ввиду разнообразия примененных методов и проведенных исследований не все из них в полной мере описаны в автореферате. Поэтому выводы, приведенные в автореферате, не всегда полностью обоснованы. Однако это нельзя считать недостатком работы, а только побуждает к ознакомлению с полным текстом диссертации».

3. Отзыв от заведующего кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутского государственного университета» (ИГУ г. Иркутск), доктора физико-математических наук, профессора Паперного Виктора Львовича. Отзыв положительный, имеется замечание:

– «В качестве замечания, отмечу следующее. В последние десятилетия усилия специалистов в данной области были направлены на повышение параметров ионных потоков, эмитируемых магнетронными системами, и были достигнуты впечатляющие результаты по увеличению ионного тока, понижению рабочего давления и т.д. Автору следовало более детально пояснить преимущества предложенной системы по сравнению, например, с известной системой NiPIMS, а также другими подобными системами».

4. Отзыв от профессора кафедры экспериментальной физики ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (СКФУ, г. Ставрополь), доктора технических наук Мартенса Владимира Яковлевича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«– С. 17, нет обозначений а) и б) на двойном рисунке 14.

– В автореферате нет никакой информации о величине магнитного поля в планарном магнетроне. А это важный параметр разрядов в скрещенных полях. Изменяя величину магнитного поля, можно влиять на параметры плазмы магнетронного разряда, наряду с током разряда и током инжектированных электронов, давлением и сортом газа, материалом катода (мишени) магнетрона.

– В автореферате нет информации о материале катода вакуумной дуги. Не «засоряет» ли вакуумная дуга плазму магнетронного разряда, а значит и осаждаемые покрытия и ионный пучок, атомами и ионами материала катода вакуумной дуги?»

5. Отзыв от доцента кафедры электронных приборов ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР, г. Томск), кандидата технических наук Аксенова Александра Ивановича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«– В работе использовался отражательный электрод, (стр.9). Очевидно, что находящийся в области плотной плазмы электрод, имеющий отрицательный потенциал, равный потенциалу распыляемого катода (мишени) будет вносить примесь в ионный состав плазмы магнетронного разряда. Влияние этого эффекта не рассматривается.

– На странице 9 автореферата говорится о двухкратном увеличении ресурса эмиттера, однако, для полного понимания было бы полезно привести конкретные цифры ресурса эмиттера.

– В описании результатов третьей главы говорится об изменении масс-зарядового состава ионов плазмы магнетронного разряда при снижении рабочего давления. Однако, представлены зависимости только для разряда с инжекцией электронов. Было бы нагляднее представить сравнение с масс-зарядовым составом обычного магнетрона, без дополнительной инжекции электронов.»

6. Отзыв от начальника лаборатории ионной имплантации «АО НИИ ТМ» (г. Москва, г. Зеленоград), кандидата физико-математических наук, доцента Мамедова Никиты Вадимовича. Отзыв положительный, имеются замечания:

«– В автореферате (стр.16) не представлена схема ионного источника.

– В работе было использовано несколько разных материалов мишеней, однако данные по максимальной доле ионов металла в плазме в автореферате представлены только для медной мишени.

– В описании четвертой главы представлена идея использования экспандера с отрицательным относительно анода магнетрона потенциалом для увеличения эмиссионного ионного тока источника. Тем не менее, остается неясно использовал ли автор данную электродную систему в своих экспериментах и какие максимальные параметры были достигнуты в этом случае.»

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался тем, что оба оппонента и ведущая организация имеют практический опыт и компетенции в области физики и техники магнетронных распылительных систем; могут дать достоверную оценку полученным результатам и рекомендации к дальнейшему развитию тематики диссертационной работы.

Диссертационный совет считает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Реализован и детально исследован сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги, функционирующий в режиме самораспыления.

Определено влияние дополнительной инжекции электронов из плазмы импульсного вакуумного дугового разряда, ускоренных в катодном слое магнетронного разряда, на параметры и условия функционирования сильноточного импульсного магнетронного разряда в режиме самораспыления в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па).

Разработаны макеты планарной магнетронной распылительной системы, а также источника ионов газа и металла с предельным рабочим давлением вплоть до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Продемонстрировано, что в ионном источнике использование экспандера с отрицательным относительно анода магнетрона потенциалом обеспечивает дополнительную осцилляцию электронов в пространстве дрейфа распыленных атомов и их дополнительную ионизацию, позволяя увеличить извлекаемый ионный ток в 2÷4 раза при сохранении долевого отношения металлического и газового ионных компонентов.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

Определены условия стабильного функционирования импульсного сильноточного разряда в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па), а результаты были использованы при создании численной модели магнетронного разряда с инжекцией электронов.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что:

Определены параметры сильноточного импульсного магнетронного разряда и вспомогательного вакуумно-дугового разряда (инжектора электронов), которые могут быть использованы в подобных системах для снижения минимального рабочего давления, и как следствие для увеличения их эффективности.

Показано, что снижение рабочего давления в процессе магнетронного распыления материалов, у которых реализуется режим самораспыления (Cu, Cr, Zr и др.), увеличивает скорость напыления покрытий в 1,3–1,7 раза, снижает шероховатость поверхности, повышает адгезионные свойства покрытий.

Продемонстрировано, что разработанный ионный источник может быть использован для поверхностной модификации различных материалов с целью увеличения коррозионной стойкости, изменения гидрофобных свойств.

Оценка достоверности результатов выявила, что результаты получены с использованием известных апробированных методик, современного экспериментального оборудования, а также современного технического и программного обеспечения для численной и статистической обработки экспериментальных данных.

Использованы как стандартные, так и независимые дублирующие методики измерения параметров плазмы.

Личный вклад автора заключался в комплексном исследовании сильноточного импульсного магнетронного разряда с дополнительной инжекцией электронов, подготовке публикаций по теме диссертации, представлении результатов работы на различных Всероссийских и Международных конференциях. Выдвигаемые научные положения и основные выводы по работе были сформулированы автором диссертации лично. Проведение отдельных экспериментов и обсуждение их результатов осуществлялись при участии соавторов, фамилии которых указаны в списке опубликованных по теме диссертации работах.

Соискатель Черкасов А.А. ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с рядом обоснованных замечаний и привел собственную аргументацию.

На заседании 12 декабря 2025 года диссертационный совет принял решение:

за разработку и апробацию новых технических решений, обеспечивающих снижение рабочего давления функционирования сильноточного импульсного магнетронного разряда, имеющих большое значение для развития вакуумной и плазменной электроники, присудить Черкасову А. А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.2.1 — вакуумная и плазменная электроника, участвовавших в заседании совета, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за — 14, против — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Председатель диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
академик РАН



Ратахин Николай Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

12 декабря 2025 г.

Озур Григорий Евгеньевич