

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 003.031.01 созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, извещает о результатах состоявшейся 17 декабря 2015 года публичной защиты диссертации Воробьевым Максимом Сергеевичем на тему: «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Время начала заседания: 17.00

Время окончания заседания: 19.50

На заседании диссертационного совета присутствовали 18 человек из 24 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника:

1. Королёв Ю.Д – и.о.председателя диссертационного совета	д.ф.-м.н.	05.27.02
2. Рыжов В.В. – ученый секретарь	д.ф.-м.н.	05.27.02
3. Багров В.Г.	д.ф.-м.н.	01.04.04
4. Бычков Ю.И.	д.ф.-м.н.	05.27.02
5. Иванов Ю.Ф.	д.ф.-м.н.	01.04.04
6. Ким А.А.	д.т.н.	05.27.02
7. Коваль Н.Н.	д.т.н.	05.27.02
8. Ковальчук Б.М.	д.т.н.	05.27.02
9. Козырев А.В.	д.ф.-м.н.	05.27.02
10. Кошелев В.И.	д.ф.-м.н.	01.04.04
11. Окс Е.М.	д.т.н.	05.27.02
12. Пегель И.В.	д.ф.-м.н.	01.04.04
13. Ратахин Н.А.	д.ф.-м.н.	01.04.04
14. Ремпе Н.Г.	д.т.н.	05.27.02
15. Ростов В.В.	д.ф.-м.н.	01.04.04
16. Тарасенко В.Ф.	д.ф.-м.н.	05.27.02
17. Усов Ю.П.	д.т.н.	05.27.02
18. Юшков Г.Ю.	д.т.н.	05.27.02

Заседание ведет исполняющий обязанности председателя диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Королев Юрий Дмитриевич.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительный бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить М.С.Воробьеву учёную степень кандидата технических наук.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.031.01
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА СИЛЬНОТОЧНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК, ПОДВЕДОМСТВЕННОГО ФЕДЕРАЛЬНОМУ
АГЕНСТВУ НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 17.12.2015 № 35

О присуждении гражданину Российской Федерации Воробьеву Максиму Сергеевичу ученой степени кандидата технических наук. Диссертация «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу» по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника принята к защите 14.10.2015 г., протокол № 33, диссертационным советом Д 003.031.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) Федерального агентства научных организаций, 634055, г. Томск, проспект Академический, 2/3, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель **Воробьев Максим Сергеевич** 1986 года рождения. В 2009 году соискатель окончил ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», работает младшим научным сотрудником лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Коваль Николай Николаевич**, заведующий лабораторией плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН.

Официальные оппоненты:

1. **Бурдовицин Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", г. Томск.
2. **Косогоров Сергей Леонидович**, доктор технических наук, начальник лаборатории ЭЛ-2 АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург.

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)** (г. Екатеринбург) дала положительное заключение, составленное заместителем директора ФГБУН ИЭФ УрО РАН по научной работе, заведующим лабораторией пучков частиц, доктором технических наук, член-корреспондентом Российской академии наук Гавриловым Николаем Васильевичем и утвержденное врио директора ФГБУН ИЭФ УрО РАН член-корреспондентом Российской академии наук Шпаком Валерием Григорьевичем, в котором указала, что диссертация М.С. Воробьева представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для дальнейшего развития физики и техники генерации сильноточных импульсных электронных пучков, а также представлены научно обоснованные технические разработки по использованию широкоапертурного импульсного электронного пучка для ряда технологических применений: разложения тетрафторида кремния с образованием на выходе реакции пленочного кремния и свободного фтора, а также для радиационной сшивки молекул натурального латекса.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

1. Северо-Кавказский федеральный университет, отзыв подписан доктором технических наук, доцентом Мартенсом Владимиром Яковлевичем. Отзыв положительный, отмечены замечания:

1. В пункте 3 раздела «Научная новизна работы» (с. 4) сказано, в частности, что «... применение многоапертурного плазменного катода позволяет... повысить моноэнергетичность пучка во времени за счет снижения просадки напряжения конденсаторной батареи», однако в автореферате нет никакой информации об этих исследованиях.

2. На рис. 2б (с. 8) в качестве единицы измерения напряжения U_0 указаны В, а должны быть кВ.

3. На с. 10, вторая строка снизу, написано: «Максимум напряженности магнитного поля величиной ≈ 50 мТл...». Напряженность магнитного поля измеряется в А/м, а в мТл измеряется магнитная индукция.

2. ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, отзыв подписан старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук Астрелиным Виталием Тимофеевичем. Отзыв положительный, отмечено замечание, связанное с излишне уплотненным взаимным размещением рисунков и текста, затрудняющем чтение.

3. ФГБУН Омский научный центр СО РАН, отзыв подписан членом-корреспондентом РАН, доктором химических наук Лихолобовым Владимиром Александровичем. Отзыв положительный, отмечены замечания:

1. Снижение прочности фольги до 230 МПа автор связывает с достижением максимальной температуры фольги 460 К. Однако, при этом не учитывается, что имеющийся градиент температуры фольги по радиусу

отверстия (рис. 4б) приводит к возникновению дополнительных механических напряжений, которые при длительной эксплуатации фольги будут снижать указанное значение ее прочности.

2. Сравнение данных энергодисперсионного анализа области отпечатка на коллекторной пластине из нержавеющей стали для исследованных катодных узлов (рис. 6 и рис. 10) показывает, что для нового катодного узла характерно резкое (в 3,4 раза) увеличение содержания углерода в исследуемом слое, что свидетельствует об образовании углеродсодержащего слоя, толщиной не менее 1 мкм. Однако нет никаких пояснений причин столь интенсивного образования углеродного слоя именно для нового катодного узла и его возможного влияния на работу последнего.

3. Приводя данные о поглощенных дозах в латексе, автор не поясняет, являются ли эти величины расчетными или экспериментально измеренными и какова точность их определения.

4. ФГБУН Институт физического материаловедения СО РАН, отзыв подписан старшим научным сотрудником, кандидатом технических наук Милоновым Александром Станиславовичем. Отзыв положительный, замечания отсутствуют.

5. ФГУП «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина», отзыв подписан ведущим научным сотрудником, доктором технических наук, профессором Завьяловым Михаилом Александровичем. Отзыв положительный, отмечены замечания:

1. Недостаточно четко сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Так, в пункте 2, состоящем из одного предложения из более 80-ти слов с перечислением многих технических деталей, читателю при полном сосредоточении трудно выделить собственно «научное положение».

2. Текст реферата перегружен лишним описанием узлов с указанием их размеров (что было бы оправдано в спецификациях конструкторской документации) в ущерб ясного и более глубокого изложения физических процессов в достаточно сложном электрофизическом объекте исследования.

3. В научной работе автору следовало бы избегать применения жаргонных выражений типа «перепыление катода», «просадка напряжения», «удержание пятна», «укладка маски», «кратно увеличить» и др., а также быть более аккуратным в некоторых выражениях. Например «напряженность магнитного поля величиной примерно 50 мТл» - но эта единица измерения относится к индукции магнитного поля. Или «сделан вывод, что для генерации ПБС наиболее перспективными являются источники с плазменными катодами и сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы» - но этот вывод был сделан несколько десятилетий назад.

6. ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, отзыв подписан заведующим лабораторией, доктором технических наук Куксановым Николаем Константиновичем. Отзыв положительный, отмечены замечания:

1. При обосновании актуальности работы, автор как-то упускает достаточно важный параметр источника – низкая энергия и приводит

примеры технологического использования электронных пучков, где ускорители с данными параметрами не являются оптимальными и где используются более высокие энергии и мощности. В тоже время не приводит не менее массовых применений, где пучки большого сечения низкой энергии не имеют альтернативы (поверхностная обработка, полиграфия, возможность in-line реализации и т.д.).

2. Не в полной мере доказанными являются утверждения автора о том, что ускорители с плазменным катодом имеют больший срок службы по сравнению с термокатадами, не критичны к вакуумным условиям, высокой энергетической эффективности. Здесь нужно проводить сравнение вполне конкретных конструкций, ускорителей с вполне конкретными параметрами. Так, например, в высоковольтных ускорителях срок службы термокатада составляет многие тысячи и даже десятки тысяч часов. Эффективность ускорителей трансформаторного типа превышает 90%. В данном источнике для поддержания рабочего давления необходимо обеспечивать натекание, т.е. постоянную загрузку вакуумных насосов, непрерывный контроль вакуума. В случае термокатада – вакуум выше, насосы работают в легком режиме. Экологическая ниша ускорителей с ПБС – именно низкие энергии.

3. Источник предназначен для технологических применений. Автор приводит ресурс источника 10^7 импульсов, что при частоте следования импульсов 50 Гц составляет около 50 часов. Безусловно, это предмет дальнейшей деятельности.

4. При рассмотрении работы выпускного устройства непонятно о каких параметрах (плотность мощности, температура) идет речь: мгновенных или средних. Если средние, то по какому периоду происходит усреднение, если мгновенные, то хорошо бы понять влияние термоциклирования.

5. Считаю излишним включение в работу экспериментов по разложению тетрафторида кремния и модификации натурального латекса. Судя по автореферату, диссертационная работа является очень информативной, вопрос о возможном применении подобных электронных источников не вызывает сомнений. Данные эксперименты могут быть проведены на любом другом ускорителе, т.е. они не подчеркивают уникальных свойств данного ускорителя и нет необходимости перегружать работу.

7. Белорусское учреждение образования «Полоцкий государственный университет», отзыв подписан заведующим кафедрой физики, доктором физико-математических наук Залесским Виталием Геннадьевичем и профессором кафедры физики, доктором технических наук, профессором Груздевым Владимиром Алексеевичем. Отзыв положительный, отмечены замечания:

1. В автореферате отсутствуют результаты экспериментов, свидетельствующие о том, что именно наличие маски приводит к стабилизации эмиссионного тока, а не уменьшение величины тока эмиссии при снижении эффективности извлечения или тока разряда. В автореферате также отсутствуют сведения об извлечении электронов в системах с более мелкоструктурными сетками. Поэтому остается недостаточно ясным

механизм стабилизации эмиссионного тока, реализованный в работе (стр. 13 и далее).

2. На стр. 15 отмечено наличие эффекта переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, однако не указано в чем суть такого эффекта и какое влияние указанный эффект оказывает на эффективность извлечения.

3. В автореферате отсутствуют сведения о влиянии потенциала маски на эффективность извлечения и стабильность тока эмиссии.

8. ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, отзыв подписан заведующим лабораторией, доктором технических наук, профессором Сергеевым Виктором Петровичем. Отзыв положительный, замечания отсутствуют.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, – 7, 1 работа в зарубежном научном издании, (общий объём публикаций – 8,8 печатных листа, личный вклад автора – 80%).

Наиболее значительные работы:

1. **Воробьёв, М.С. Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности** / М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 2014. – Т.40. – Вып.12. – С. 24–30.
2. **Kozyrev, A.V. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes** / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, **M.S. Vorobyov**, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, N.N. Koval, V.F. Tarasenko // Laser and Particle Beams, 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15. – doi:10.1017/S0263034615000324.
3. **Воробьёв, М.С. Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу** / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // ПТЭ, 2015. – №5. – С. 112–120.
4. **Воробьёв, М.С. Радиационная обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным эмиттером** / М.С. Воробьёв, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, В.В. Шугуров, В.В. Яковлев, К. Uemura, P. Raharjo // ХВЭ, 2015. – Т.49. – №3. – С. 169–172.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью оппонентов и ведущих сотрудников организации в соответствующей сфере исследований, широко известных и имеющих публикации в данной отрасли науки и способных определить научную и практическую ценность диссертации, а также дать рекомендации по использованию ее результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый метод увеличения эффективности вывода тока пучка из вакуумного высоковольтного ускоряющего промежутка в атмосферу при использовании многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической

системы, позволяющей минимизировать потери тока пучка на ребрах опорной решетки выпускного фольгового окна, а также разработан катодный узел плазмогенератора на основе дугового разряда низкого давления стабильно функционирующего в диапазоне токов разряда $I_p=(10\div 100)$ А без его обрывов при длительности импульсов $t=(10\div 100)$ мкс и частоте их следования до $f=50$ с⁻¹ с ресурсом, превышающим $N=10^7$ имп.;

предложен способ уменьшения неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка путем использования маски, имеющий переменный диаметр отверстий, выбор которого зависит от плотности плазмы на заданном эмиссионном участке;

доказана эффективность использования указанного способа снижения потерь тока пучка на ребрах опорной решетки для ускорителей электронов с плазменным катодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы;

введено новых терминов: новых терминов не введено.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что при использовании многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системы коэффициент вывода тока пучка из вакуума в атмосферу увеличивается;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс базовых экспериментальных методик исследования параметров генерируемого электронного пучка, а также комплекс численных методов оценки распределения магнитного поля в межэлектродных промежутках;

изложены основные аргументы и условия, доказывающие возможность эффективного использования плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы для генерации пучков большого сечения;

раскрыты физические механизмы, ответственные за дополнительную генерацию низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объемах в условиях электронной эмиссии;

изучены основные факторы, влияющие на эффективность извлечения электронов из плазменного катода и эффективность вывода электронного пучка из вакуумного высоковольтного ускоряющего промежутка в атмосферу;

проведена модернизация физической модели и численных методов исследования основных механизмов энергетических потерь в источнике

электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и создан оригинальный автоматизированный источник электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы;

внедрена методика разложения газообразного тетрафторида кремния под действием электронного пучка (некоммерческое партнерство по научной и инновационной деятельности «Томский атомный центр»), а также результаты обработки натурального латекса под действием электронного пучка заказчику (ООО «Пучково-плазменные технологии»);

определены пределы устойчивой работы многоапертурного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы в условиях перераспределения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки;

создана система практических рекомендаций по увеличению электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка в источниках электронов с плазменными катодами с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию источников электронов с плазменным катодом для генерации плазмы на основе дугового разряда низкого давления в больших объемах с целью увеличения эффективности извлечения электронов и уменьшения неоднородности распределения плотности тока по сечению электронного пучка.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты, полученные на двух различных экспериментальных установках, хорошо совпадают, используются наборы апробированных и дублирующих методик измерения, результаты

исследований получены на сертифицированном диагностическом оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследований в различных условиях;

теория влияния собственного магнитного поля и пространственного заряда на транспортировку электронного пучка, а также способов стабилизации катодного пятна на поверхности катода, подтверждается результатами проведенных экспериментов и согласуется с опубликованными экспериментальными данными других авторов;

идея стабилизации катодного пятна на поверхности полого катода плазмогенератора на основе дугового разряда низкого давления путем введения внешнего магнитного поля с диафрагмированием выходного электрода, находящегося под потенциалом катода, а также **идея** использования многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системы для транспортировки и вывода электронного пучка в атмосферу, **базируются** на анализе практики использования устройств на основе такого разряда и обобщении передового опыта использования систем подобного типа;

использовано сравнение авторских данных, полученных при исследовании способов генерации плазмы и эффективности вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу, и данных, полученных ранее для аналогичных систем другими авторами;

установлено качественное совпадение авторских результатов по генерации плазмы и эффективности вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу, с результатами, представленными в независимых литературных источниках;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации для определения и анализа параметров генерируемого электронного пучка и вывода его в атмосферу.

Личный вклад автора состоит в создании экспериментальной установки, в выборе методик экспериментов, в проведении исследований, в

анализе результатов и их обобщении. Автором самостоятельно сформулированы защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по внедрению результатов работы в создание автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом, а также в апробации результатов исследований и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

На заседании 17.12.2015 года диссертационный совет принял решение присудить Воробьёву Максиму Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

И.о. председателя диссертационного совета
Д 003.031.01,
доктор физико-математических наук



Ю.Д. Королёв

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 003.031.01,
доктор физико-математических наук

В.В. Рыжов

«17» декабря 2015 г.