

ОТЗЫВ

научного консультанта

доктора технических наук, профессора Коваля Николая Николаевича на диссертацию Воробьева М.С. «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Диссертация Воробьева М.С. выполнена в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) и посвящена актуальной проблеме – развитию и исследованию источников электронов с сеточным плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом, необходимых как для решения исследовательских задач, так и для практического применения.

Автор на основе анализа актуальной отечественной и зарубежной литературы обоснованно выбрал в качестве основного объекта исследований плазменные источники электронов со стабилизацией границы эмиссионной плазмы мелкоструктурной металлической сеткой. Такой принцип обеспечивает ряд преимуществ перед традиционными источниками электронов и позволяет формировать интенсивные электронные пучки для их использования как в вакууме для обработки поверхности различных материалов и изделий с целью изменения функциональных и эксплуатационных свойств их поверхности, так и выводить такие широкие электронные пучки в атмосферу через специально созданное выпускное фольговое окно для решения множества задач, в том числе для стерилизации медицинских и пищевых продуктов, изменения свойств различных органических материалов и др.

С привлечением современного диагностического оборудования и математического моделирования диссертантом проведены комплексные исследования процессов, происходящих как в пространстве сеточного плазменного эмиттера, так и в высоковольтном ускоряющем промежутке источника электронов, а также влияния этих процессов друг на друга.

В результате проделанной работы было создано три разных рабочих макета источников электронов с сеточными плазменными катодами на основе дуги низкого давления:

1. НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ (до 30 кэВ), позволяющий осуществлять контролируемое изменение мощности интенсивного пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности за счет пропорционального изменения тока дугового разряда в плазменном эмиттере. Данная работа, ориентированная на расширение предельных параметров электронного пучка в источнике «СОЛЮ» с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом, входящего в список уникальных установок России, была инициирована в рамках проекта РФФ № 18-79-00011 «Закономерности и механизмы стабильной генерации и транспортировки широкого интенсивного субмиллисекундного электронного пучка при его отклонении от продольной оси источника с сетчатым плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы», руководителем которого являлся Воробьев М.С. и в котором были проведены расчеты электронно-оптической системы, а в результате экспериментально продемонстрировано, что при отклонении широкого

электронного пучка от продольной оси источника возможно КРАТНОЕ увеличение электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка, что происходит за счет существенного снижения влияния коллекторной плазмы и нейтральных десорбированных паров на процесс генерации электронного пучка. Демонстрация такой сравнительно простой управляемости тока пучка за счет изменения тока дуги в плазменном эмиттере позволило продемонстрировать возможность управления мощностью электронного пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса в рамках проекта №МК-123.2019.2 по гранту Президента РФ для молодых кандидатов наук «Генерация широких интенсивных электронных пучков с контролируемо изменяющейся мощностью в течение импульса субмиллисекундной длительности в источнике с сетчатым плазменным катодом», а впоследствии реализовать возможность управления температурой поверхности обрабатываемых металлических изделий в диапазоне температур сотни-тысячи градусов Цельсия в рамках руководимого Воробьевым М.С. проекта РФФИ № 20-79-10015 "Научные основы генерации мегаваттных амплитудно- и широтно- модулированных электронных пучков субмиллисекундной длительности на основе источника с плазменным катодом для эффективной модификации поверхности металлов и сплавов", что очень перспективно для научных и технологических целей. Так, например, при облучении поверхности силумина электронным пучком с одинаковой плотностью энергии, но разной скоростью ее ввода, было показано, что более оптимальным режимом его облучения является падающая в течение импульса мощность пучка со скоростью $\sim 10^{10}$ Вт/с (в отличие от традиционной скорости $\sim 10^9$ Вт/с), а удержание температуры на уровне температуры плавления силумина в течение 1 мс ведет к формированию мелкодисперсной структуры, что позволяет кратно снизить износ и повысить прочность поверхности облучаемых образцов.

2. ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ (до 100 кэВ) с многодуговым сеточным плазменным катодом и открытой границей анодной плазмы с транспортировкой интенсивного (до 1 кА) субмиллисекундного электронного пучка в продольном магнитном поле до коллектора (на расстояние ≈ 5 м) с максимальным энергосодержанием свыше 5 кДж. Данная работа, в которой Воробьев М.С. являлся ответственным исполнителем, шла параллельно диссертационной работе и принесла положительные результаты при решении одной из проблем управляемого термоядерного синтеза. Этому способствовало многолетнее сотрудничество ИСЭ СО РАН с Институтом ядерной физики СО РАН на основе проекта Программы Президиума РАН ПП30/09, а также на основе проекта РФФИ № 16-38-50262 «Экспериментальное исследование работы источника длинноимпульсного электронного пучка с плазменным анодом и плазменным катодом с сеточной стабилизацией эмиссионной границы, предназначенного для инжекции пучка в линейную магнитную ловушку», в которых Воробьев М.С. также являлся ответственным исполнителем, что позволило провести эксперименты по введению интенсивного субмиллисекундного электронного пучка в магнитную пробку с коэффициентом адиабатического сжатия до $k=60$. Было показано, что в отличие от работы источника электронов с двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системой (ЭОС) работа источника электронов с ЭОС на основе сеточного плазменного катода и открытой границей анодной плазмы характеризуется повышенной электрической прочностью высоковольтного ускоряющего

промежутка, что позволяет повысить любой из основных параметров электронного пучка (энергию, амплитуду и длительность импульса тока пучка). В результате использование сеточного плазменного катода позволило увеличить энергосодержание транспортируемого пучка примерно в 1.8 раза, что также подтверждает перспективность использования именно сеточных плазменных катодов в предстоящих экспериментах по увеличению времени удержания плотной дейтериевой плазмы, нагретой до субтермоядерных температур в осесимметричной многопробочной ловушке «ГОЛ-3». Кроме этого, конечно, получение пучков с такими высокими удельными параметрами перспективно для модификации поверхности тугоплавких материалов с целью кратного увеличения их срока службы.

3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫСКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ (до 200 кэВ) ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ с многоапертурным сеточным плазменным катодом с эффективным выводом генерируемого пучка большого сечения ($750 \times 150 \text{ мм}^2$) в атмосферу и возможностью управления шириной его энергетического спектра. Разработанный и созданный источник электронов также был включен в список уникальных установок Российской Федерации, поскольку не имеет аналогов не только в России, но и за рубежом. Экспериментально показано, что данный источник подходит для использования в научных и промышленных целях, таких как разложение газообразного тетрафторида кремния, модификация натурального латекса, получение новых углеродных материалов из поливинилхлорида, облученных электронным пучком. Сейчас, используя данный источник, под его же руководством интенсивно разрабатывается способ радиационного обеззараживания и стимуляции роста сельскохозяйственной продукции (зерна пшеницы, ячменя, овса и др.), что соответствует задачам одного из направлений из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, связанного с переходом к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработке и внедрению систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранению и эффективной переработке сельскохозяйственной продукции, а также созданию безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания.

В результате на созданных экспериментальных стендах была проделана большая работа по исследованию генерации плазмы больших объемов; отбора электронов из такой плазмы как в условиях вакуумного диода, так и в условиях газонаполненного диода с открытой границей анодной плазмы; ускорения таких пучков, их транспортировки до коллектора в продольном магнитном поле, управлению параметрами таких пучков в течение импульса субмиллисекундной длительности, что, в конечном итоге, позволило расширить предельные параметры таких электронных пучков с целью их дальнейшего использования в научных и технологических целях. Эти работы представляют фундаментальный интерес, поскольку дают новую информацию об управлении процессами в вышеперечисленных системах, расширяют наши знания о них.

Диссертация написана грамотно и легко читается, а также хорошо иллюстрирована.

Воробьев М.С. работает в ИСЭ СО РАН с 2007 г. по настоящее время и зарекомендовал себя сложившимся учёным-исследователем, способным самостоятельно формулировать и решать поставленные научные и научно-технические задачи. 17 декабря 2015 г. в диссертационном совете Д 003.031.01 при

Институте сильноточной электроники состоялась его успешная защита диссертации «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.

В настоящий момент Воробьев М.С. является руководителем проекта РНФ, посвященного тематике источников электронов на основе сеточных плазменных эмиттеров и их применения. Воробьев М.С. зарекомендовал себя ответственным и исполнительным участником и руководителем госбюджетных работ, а также грантов и договоров, выполняемых в лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Он коммуникабелен и пользуется уважением среди сотрудников ИСЭ СО РАН и, являясь заместителем председателя Совета молодых ученых ИСЭ СО РАН, участвует как в научной, так и в общественной деятельности Института. Следует отметить, что Воробьев М.С. является руководителем научной группы, в которую входят три руководимые им аспиранта, успешно развивающие тематику по плазменной эмиссионной электронике.

По результатам работы Воробьев М.С. неоднократно занимал призовые места в различных конкурсах, в том числе конкурс УМНИК (2008 г.), лучшая научная работа ИСЭ СО РАН среди молодых ученых (2015 г., 2016 г.), лучшие доклады на конференциях различного уровня и др. За высокие научные достижения в 2016 г. Воробьев М.С. был награжден почетной грамотой Томского научного центра СО РАН, стал лауреатом премии Томской области в сфере образования, науки, здравоохранения и культуры за высокие достижения в сфере образования и науки, оказывающие эффективное влияние на развитие экономики и социальной сферы Томской области, в 2019 году награжден почетной грамотой Администрации города Томска за многолетний добросовестный труд, большой личный вклад в развитие научных исследований и в связи с празднованием 50-летия академической науки в г. Томске, а в 2021 году награжден ведомственной наградой Министерства науки и высшего образования Российской Федерации нагрудным знаком «Молодой учёный».

Профессиональные навыки, включающие знание технического и разговорного английского языка, позволили утвердить в 2017 г. кандидатуру Воробьева М.С. в качестве эксперта (одного из трех участников из России) от ИСЭ СО РАН в Секретариат для участия в совещании при проведении Летней школы МАГАТЭ по перспективному применению ускорителей электронов (19-23 июня 2017 г., г. Варшава). В 2017 г. назначен руководством ИСЭ СО РАН председателем локального организационного комитета VI Международного конгресса "Энергетические потоки и радиационные эффекты" (VI International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2018)), который успешно был проведен в 2018 г. в г. Томске при общем числе участников около 400 человек. VII Конгресс EFRE-2020, председателем ЛОКа в котором также являлся Воробьев М.С., одним из первых в мире прошел в новаторском дистанционном формате. За ответственный подход и имеющийся опыт председателем ЛОКа VIII Конгресса EFRE-2022 также был назначен Воробьев М.С. Кроме этого, Воробьев М.С. являлся/является членом других организационных комитетов таких конференций как научно-технический семинар по электронно-лучевым технологиям «Обь-2016», «Обь-2017», «Обь-2019», V Конгресс «EFRE-2016», международные конференции

«GDP-2015», «GDP-2019», VI Международный Крейнделевский семинар по плазменной эмиссионной электронике.

Всего по результатам диссертационной работы Воробьева М.С. опубликовано 54 статьи в реферируемых научных журналах и трудах конференций.

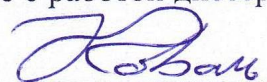
Особо следует отметить, что результаты диссертационной работы Воробьева М.С. имеют хорошие перспективы для реальных внедрений в промышленность и, в частности, для модификации поверхности металлических материалов в вакууме, реализации радиационно-стимулированного отверждения лаков и красок, вулканизации тонкопленочной резины, стерилизации лекарственного сырья и мединструментов, а также радиационной электронно-пучковой дезинфекции и дезинсекции зерна с одновременной возможностью стимуляции его роста.

Таким образом, учитывая вышесказанное, считаю, что работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Воробьев Максим Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук,
доктор технических наук, профессор
Коваль Николай Николаевич
634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, тел.: 8 (3822) 49 17 06
E-mail: koval@hcei.tsc.ru

 Н.Н. Коваль

Я, Коваль Николай Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 Н.Н. Коваль

Подпись Коваля Н.Н. удостоверяю:

Зам. директора ИСЭ СО РАН, к.ф.м.н.



 А.В. Батраков

22.08.2022 г.