

УТВЕРЖДАЮ:

Врио директора
ФГБУН ИЭФ УрО РАН
чл.-корр. РАН В.Г. Шпак



«12» ноября 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Воробьева Максима Сергеевича «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Применение электронных пучков для обработки больших поверхностей и газовых объемов представляет значительный научный и практический интерес. Пучки большого сечения, выведенные в атмосферу или газ высокого давления, применяют для полимеризации мономеров, очистки атмосферы и сточных вод от загрязнений, в плазмохимии и радиационной химии, для накачки мощных газовых лазеров, для коммутации больших токов, стерилизации пищевых продуктов и медицинского инструмента и других приложений. Перспективность применения для этих целей ускорителей с плазменными катодами с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы обусловлена такими достоинствами этих ускорителей, как возможность независимой регулировки параметров пучка в широких пределах, большой ресурс катода, не критичность к вакуумным условиям и равномерное распределение плотности тока в поперечном сечении пучка. Поэтому тематика диссертационной работы М.С. Воробьева, **целью** которой является исследование процессов извлечения электронов из многоапертурного плазменного катода на основе дуги низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, формирования, транспортировки и вывода многолучевого электронного пучка большого сечения через выпускное фольговое окно, а также исследование стабильности работы и энергетической эффективности такого источника электронов представляется актуальной.

При выполнении работы в диссертации решен ряд **задач**, последовательно реализующих поставленную цель:

разработка катодного узла с увеличенным ресурсом работы, обеспечивающего стабильное горение импульсного разряда в заданном диапазоне параметров без обрывов и модуляции тока разряда и минимальное поступление микрокапельной фракции в анодную область разряда;

исследование процессов формирования, транспортировки и вывода электронного пучка большого сечения в атмосферу в источнике с многоапертурным плазменным катодом;

разработка импульсно-периодического источника электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления, генерирующего пучки большого сечения с эффективным выводом в атмосферу.

По всем рассмотренным проблемам в диссертации получены новые и научно-значимые результаты.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений с общим объемом 197 страниц, содержит 76 рисунков и 1 таблицу.

Во введении показана актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлена научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу электронно-оптических систем источников электронных пучков большого сечения с эмиттерами на основе взрывной, ионно-электронной и термоэлектронной эмиссии, а также с плазменным эмиттером с сеточной стабилизацией. Сделан вывод, что для генерации электронных пучков большого сечения наиболее перспективными являются источники с плазменными катодами, способные обеспечивать широкий диапазон перестройки параметров генерируемого пучка при сохранении высокой эффективности вывода пучка в атмосферу. Рассмотрены предварительные результаты испытаний многоапертурных систем и способов генерации в них эмиссионной плазмы и сформулированы основные задачи исследований.

Во второй главе описаны методики и техника экспериментов. Описана конструкция макета источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и схемы электропитания. Рассмотрены особенности измерения энергетического спектра электронов пучка, выведенного в атмосферу, его калориметрия и способы измерения распределения плотности тока по сечению пучка.

В третьей главе описана конструкция, принцип действия и результаты испытаний разработанного катодного узла, который отличается устойчивостью работы в широком диапазоне токов разряда ($5\div 100$ А), повышенным ресурсом работы по сравнению с известными аналогами и отсутствием микрокапель материала катода в области анодной плазмы. Приведены результаты исследования свойств плазменного эмиттера с многоапертурным эмиттерным электродом и показано, что использование более крупных ячеек сетки и оптимизация конфигурации маски позволяют перераспределить ток разряда преимущественно в ячейки эмиссионной структуры без ухудшения стабильности горения разряда, чем достигается увеличение плотности эмиссионного тока и повышение коэффициента извлечения электронов из плазмы дугового разряда. Показано, что использование двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы приводит к уменьшению потерь ускоренных электронов на опорной решетке и позволяет увеличить в 2 раза коэффициент вывода пучка в атмосферу и повысить коэффициент полезного действия источника электронов.

Четвертая глава посвящена разработке на основе проведенных исследований автоматизированного широкоапертурного источника электронов с многоапертурным сеточным плазменным катодом. Описаны конструкция источника электронов и схемные решения, обеспечивающие автоматизацию управления вакуумной системой, системой электропитания плазменного эмиттера и высоковольтной системой. Приведены характеристики источника электронов, достигнутые параметры пучка и результаты некоторых применений источника электронов, в частности, показана

принципиальная возможность разложения молекулы тетрафторида кремния, и конденсации кремния как в виде порошка, так и в виде пленки, а также возможность эффективного использования широкоапертурного импульсного электронного пучка для радиационной сшивки натурального латекса.

В заключении анализируются основные результаты работы. Список цитируемой литературы (166 наименований) содержит обширную и вполне достаточную библиографию по всем вопросам, рассмотренным в диссертации.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработаны обладающие повышенным ресурсом катодные узлы, обеспечивающие стабильное горение разряда в заданном диапазоне значений амплитуды и длительности импульса тока разряда и отсутствие капельной фракции в анодной плазме дугового разряда.

2. Показано, что применение двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы с сеточной стабилизацией плазменной границы повышает стабильность работы плазменного катода как за счет увеличения перепада давлений между областями генерации плазмы и ускорения электронов, так и в результате уменьшения поступления в плазму высокоэнергетичных ионов, образующихся при ионизации газа, десорбируемого электронным пучком с поверхности фольгового окна.

3. Показано, что применение многоапертурного плазменного катода позволяет увеличить коэффициент β вывода тока пучка из вакуума в атмосферу через выпускное фольговое окно до значений $\beta=0,75$, что обеспечивает увеличение КПД источника электронов, рост тока выведенного в атмосферу пучка и снижение разброса энергии электронов в пучке.

Научная и практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Для источников широких электронных пучков с плазменным катодом предложены технические решения, обеспечивающие достижение высоких значений коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу, что существенно улучшает технико-эксплуатационные характеристики источников электронов данного типа.

2. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный источник электронов импульсно-периодического режима действия, который по совокупности параметров пучка и диапазону их независимой перестройки перспективен для использования в научных и промышленных целях.

Достоверность и обоснованность результатов работы результатов работы подтверждаются удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей, систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных и расчетных методик, практической реализацией научных положений и выводов при проектировании и создании автоматизированного источника электронов, генерирующего пучок большого сечения с выводом его в атмосферу.

Диссертация М.С. Воробьева выполнена на достаточно высоком научном уровне. Автор владеет методами современной экспериментальной физики и понимает суть исследуемых физических явлений.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 работах, в том числе 7 статей в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также 10 полных текстов докладов в трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний.

Таким образом, актуальность работы и новизна результатов не вызывают сомнений. Однако работа не лишена и недостатков, на которых мы считаем необходимым остановиться.

1. **Утверждение о том, что личный вклад** автора состоит в создании экспериментальной установки (стр. 9) несколько преувеличен и его следовало бы конкретизировать в соответствии со стр. 149 диссертации. Установки такого масштаба создаются коллективами, однако справедливости ради следует отметить, что реальный вклад автора, заключающийся в коренной модернизации установки, достаточно весом.

2. Текст диссертации содержит большое количество стилистических погрешностей, автор пренебрегает правилами соединения слов в словосочетания и предложения, злоупотребляет жаргонными выражениями (просадка напряжения, схема запитывается, низкая однородность и т.п.).

3. В качестве прототипа катодного узла автору следовало бы взять для сравнения не катодный узел на основе ячейки Пеннинга, а более близкий по конструкции и свойствам катодный узел с иницированием экранированного катодного пятна электрическим пробоем в газе низкого давления в коаксиальной системе электродов в магнитном поле, который был применен в источнике мощных электронных и ионных пучков импульсно-периодического режима действия (Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндел, О.А. Шубин. ПТЭ, 1991, с.129-134).

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

Качество оформления диссертационной работы высокое. По каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание материала. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

В целом, диссертация М.С. Воробьева представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для дальнейшего развития физики и техники генерации сильнооточных импульсных электронных пучков, а также представлены научно-обоснованные технические разработки по использованию широкоапертурного импульсного электронного пучка для разложения тетрафторида кремния с образованием на выходе реакции пленочного кремния и свободного фтора, а также для радиационной сшивки натурального латекса.

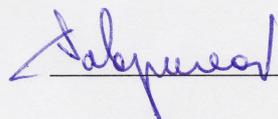
Полученные М.С. Воробьевым в процессе диссертационных исследований результаты и выводы можно рекомендовать для использования в организациях, таких как ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет, ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН, и ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

На основании изложенного считаем, что диссертация М.С. Воробьева **отвечает всем требованиям**, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени

кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв рассмотрен и одобрен на научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 9 от 11.11.2015 г.).

Заведующий лабораторией пучков частиц
д.т.н., член-корреспондент РАН

 Гаврилов Н.В.

Гаврилов Николай Васильевич почтовый адрес: г. Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 106, телефон: 8-(343)-267-87-78, адрес электронной почты: gavrilov@ier.uran.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), должность - заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией пучков частиц, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук.