

УТВЕРЖДАЮ:

Директор
ФГБУН ИЭФ УрО РАН
д.ф.-м.н.



С.А. Чайковский С.А. Чайковский

«04» 07 2019 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) на диссертационную работу Бакеева Ильи Юрьевича «Генерация форвакуумным плазменным источником электронов сфокусированных непрерывных пучков для обработки диэлектрических материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Актуальность темы исследования

Важным преимуществом плазменных источников электронов по сравнению с термокатодными источниками является способность функционировать при повышенных давлениях рабочего газа и в присутствии химически агрессивных сред. Это свойство открывает перспективу широкого использования плазменных источников электронов в таких технологических применениях, как электронно-лучевая сварка, плавка, испарение и осаждение покрытий, наплавка и послойный синтез изделий из порошкового материала, особенностью которых является интенсивное газовыделение. В наибольшей степени это преимущество плазменных источников электронов реализуется в так называемых форвакуумных плазменных источниках электронов, функционирующих в области давлений от единиц до сотни паскалей. Повышение рабочего давления источника электронов позволяет не только существенно упростить вакуумное оборудование, но и реализовать новые электроннолучевые технологии, в которых используется возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов без использования дополнительного оборудования для снятия заряда с обрабатываемой поверхности, так как плазма, создаваемая при прохождении пучка в газовой среде, нейтрализует поверхностный заряд.

Однако, наряду с открывающимися новыми возможностями применения электронных пучков, повышение рабочего давления создает и дополнительные проблемы, обусловленные рассеянием электронного пучка на газе, возникновением условий для газового пробоя и пучково-плазменного разряда, что может ограничивать предельно достижимые параметры сфокусированного электронного пучка. Переход от разрядов в потоке газа к изобарическим разрядам также требует определения устойчивых режимов генерации плотной плазмы и оптимизации условий отбора электронов.

Поэтому диссертация И.Ю. Бакеева, посвященная проблеме повышения удельных параметров электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений, представляется актуальной.

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании и численном моделировании процессов эмиссии, формирования и магнитной фокусировки непрерывного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, направленных на повышение его удельных параметров.

Научная новизна диссертации

заключается в том, что для форвакуумных плазменных источников электронов впервые:

1. Определены условия, обеспечивающие максимальную плотность эмиссионной плазмы на оси разрядной системы с полым катодом в отсутствие перепада давления между разрядной областью и областью ускорения электронного пучка, что обеспечивает повышение плотности эмиссионного тока через центральный эмиссионный канал в эмиссионном электроде до 10 A/cm^2 .

2. Определена роль и степень влияния геометрии эмиссионных каналов, конфигурации ускоряющего промежутка, а также фокусирующей магнитной системы на удельные параметры электронного пучка при давлениях рабочего газа 10-30 Па.

3. Предложены оригинальные технические решения, обеспечивающие повышение плотности мощности электронного пучка плазменного источника с магнитной фокусировкой в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, до уровня 10^6 Вт/cm^2 .

Практическая значимость диссертации.

1. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов генерации сфокусированных электронных пучков плазменными источниками с полым катодом, функционирующими в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона. Определены условия, позволяющие улучшить магнитную фокусировку электронного пучка и, тем самым, повысить его удельные параметры.

2. Создан опытный образец форвакуумного плазменного источника электронов с двойной магнитной фокусирующей системой, обеспечивающий при давлениях рабочего газа вплоть до 30 Па генерацию электронного пучка с плотностью мощности 10^6 Вт/cm^2 .

3. Продемонстрирована возможность применения форвакуумного источника сфокусированного электронного пучка для селективного электронно-лучевого спекания керамических порошков, а также резки высокотемпературных диэлектрических материалов на глубину до нескольких сантиметров.

4. Результаты работы могут быть использованы в других плазменно-эмиссионных приборах, функционирующих в области повышенных давлений форвакуумного диапазона и имеющих аналогичные разрядные и эмиссионные системы.

Положения, выносимые на защиту, полностью отражают научную новизну и практическую значимость и имеют хорошо доказательную базу.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых экспериментальных методик, соответствием экспериментальных результатов с численными оценками, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного источника непрерывного сфокусированного пучка.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Автором лично определены задачи, решаемые в работе, выбраны методики эксперимента и произведен анализ полученных в ходе экспериментов результатов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждений результатов анализа экспериментальных данных активное участие принимали научный руководитель Е.М. Окс, а также В.А. Бурдовицин и А.С. Климов. Все эксперименты проводились автором самостоятельно. Автором самостоятельно разработаны модели, представленные в работе, и на их основе произведены расчеты. Автором самостоятельно были выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и составлены рекомендации, на основании которых произведена модернизация конструкции форвакуумного источника сфокусированного непрерывного пучка, применяемого для прецизионной обработки диэлектрических материалов.

Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором

Результаты работ опубликованы в 4 статьях в российских изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а также учитываемых в этом перечне 3 статьях в зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus. Результаты исследований по диссертационной работе также опубликованы в виде 17 полнотекстовых докладов в сборниках конференций Международного и Всероссийского уровней, 5 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2016, 2017, 2018 гг.); VI Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, 2016 г.); International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016, EFRE-2018) (г. Томск, 2016, 2018 гг.); XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Новосибирск, 2017 г.); Двадцать четвертая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-24 (г. Томск, 2018 г.); VI Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (г. Улан-Удэ, 2018 г.).

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста, содержащего 111 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 108 источников.

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели, научная новизна, научная и практическая ценность работы. Излагается краткое содержание диссертации, формулируются выносимые на защиту научные положения.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы сведений об особенностях формирования электронных пучков малого сечения источниками, принцип работы которых основан на отборе электронов из плазмы тлеющего разряда с полым катодом. В главе рассмотрены способы повышения плотности эмиссионной плазмы в источниках электронов на основе разряда с полым катодом различных конфигураций, нацеленные на повышение эмиссионного тока в плазменных источниках с одиночным эмиссионным каналом. Рассмотрены особенности магнитной фокусировки электронного пучка, проявляющиеся при эмиссии электронов с подвижной плазменной границы в источниках, функционирующих в условиях среднего и высокого вакуума. Приведены последние достижения в области получения сфокусированных электронных пучков, генерируемых форвакуумными плазменными источниками электронов, в том числе, сформулированы условия, ограничивающие процессы эффективной фокусировки пучка в области повышенных давлений. Отмечено, что на момент начала выполнения настоящей диссертационной работы максимальная плотность мощности электронного пучка и минимальный диаметр сфокусированного пучка составляли 10^5 Вт/см² и 0,6 мм соответственно. Представлены результаты применения сфокусированных электронных пучков, генерируемых форвакуумными плазменными источниками для обработки непроводящих высокотемпературных диэлектриков в таких технологических операциях как плавка, сварка, резка керамики, а также пайка керамики с металлом. Показано, что повышение удельной плотности мощности электронного пучка форвакуумных плазменных источников до уровня 10^6 Вт/см², позволило бы применять такие устройства для более широкого круга технологических задач. В заключение главы сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик и оборудования, используемых для генерации и исследования электронных пучков в форвакуумной области давлений.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования процессов формирования сфокусированного электронного пучка, генерируемого плазменным источником в форвакуумной области давлений. Определены условия, обеспечивающие максимальную плотность эмиссионной плазмы на оси разрядной системы с полым катодом в отсутствие перепада давления между разрядной областью и областью ускорения электронного пучка, что обеспечивает повышение плотности эмиссионного тока через центральный эмиссионный канал в эмиссионном электроде до 10 А/см². Определена роль и степень влияния геометрии эмиссионных каналов, конфигурации ускоряющего промежутка, а также фокусирующей магнитной системы на удельные параметры электронного пучка при давлениях рабочего газа 10-30 Па. Предложены оригинальные технические решения, обеспечивающие повышение плотности мощности электронного пучка плазменного источника с магнитной

фокусировкой в области повышенных давлений форвакуумного диапазона, до уровня 10^6 Вт/см².

Четвертая глава посвящена описанию конструкции модернизированного форвакуумного источника электронов, предназначенного для генерации сфокусированного электронного пучка при повышенных давлениях рабочего газа. Продемонстрированы результаты применения электронного пучка, генерируемого данным источником, для резки высокотемпературных диэлектрических материалов, а также для селективного электронно-лучевого спекания керамических порошков.

В **заключении** приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы содержит обширную и достаточную библиографию по тематике диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные И.Ю. Бакеевым в процессе диссертационного исследования результаты и выводы можно рекомендовать для использования в организациях, таких как Институт сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), Институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) и других ВУЗах и НИИ.

Замечания по диссертационной работе:

1. Если перспективность применения форвакуумных источников электронов в технологиях, основанных на взаимодействии широкого электронного пучка с газовой средой, не вызывает сомнений, то целесообразность использования источников сфокусированных пучков форвакуумного диапазона для обработки твердых тел требует доказательств, основанных на сравнении с методом, в котором используется вывод электронного пучка в газовую среду форвакуумного давления через газодинамическое окно.

2. Использование тлеющего разряда и низкая эффективность извлечения электронов из плазмы ограничивают предельно достижимую мощность электронного пучка как из-за перехода разряда в дуговой режим, так и по причине роста мощности, потребляемой в разряде. Имеются ли возможности дальнейшего повышения параметров пучка?

3. Является ли оптимальной выбранная конфигурация электродной системы? Известны конструкции источников электронов на основе разряда с полым катодом, в которых стабильность зажигания и горения тлеющего разряда обеспечивается дополнительным анодным электродом. Это также позволило уменьшить размер контрагирующего отверстия в катодной вставке и повысить эффективность извлечения электронов из плазмы.

4. Во вводной главе автор ограничился рассмотрением плазменных источников электронов, разработанных коллегами в томских исследовательских коллективах. Кроме этих работ разряд с полым катодом использовался в плазменном источнике электронов, работающем в изобарическом газовом режиме [Н.В.Гаврилов, М.А.Завьялов, С.П.Никулин, А.В.Пономарев. Изобарический газовый режим мощного электронного источника на основе разряда в магнитном поле. Письма в ЖТФ, 1993 г., т. 19, в. 21, с. 57-60] и в источнике сфокусированного электронного пучка импульсно-периодического режима действия [Соковнин С.Ю., Ильвес В.Г. Применение импульсного электронного пучка для получения нанопорошков некоторых оксидов металлов. Екатеринбург:РИО УрО РАН, 2011 – 318 с.].

5. К сожалению, в работе нет детального обсуждения причины ограничения диаметра контрагирующей катодной апертуры на уровне 8 мм. Если нестабильности разряда возникают при отборе электронов, то не связано ли это с появлением положительного анодного падения и разрушением ионного слоя в канале эмиттерного электрода?

6. В диссертации утверждается, что минимальный диаметр сфокусированного пучка ограничен сферической абберацией магнитной линзы. Поэтому можно предположить, что при использовании многоапертурного плазменного эмиттера для улучшения фокусировки имело смысл исключить центральное отверстие.

7. На стр. 42 диссертации утверждается, что «...в области распространения электронного пучка образуется пучковая плазма, размеры которой за счет ее **теплового расширения** превышают размеры электронного пучка». Правильнее было бы говорить о диффузии плазмы, тепловое расширение характерно для твердых тел.

8. Во 2 Главе автореферата описывается (далее авторский текст) «...экспериментальный макет **плазменного эмиттера электронов**...». В данном контексте термин «плазменный эмиттер электронов» используется неудачно, поскольку он больше применим для описания физической сути явления, плазменный эмиттер не является конструкционным элементом.

9. В названии Раздела 3.3 «Формирование электронного пучка при отборе электронов из плазмы через **множество эмиссионных каналов**» можно было использовать общепринятый термин «многоапертурный электрод».

Приведенные замечания, тем не менее, не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

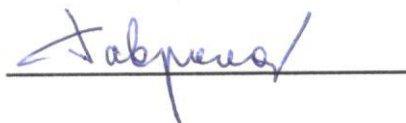
Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация представляет собой завершённую исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, являются важным вкладом в развитие физической электроники, техники генерации электронных пучков и электроннолучевых технологий. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Диссертационная работа отвечает требованиям п.10, п.11, п. 12, п. 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а автор Бакеев Илья Юрьевич, заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв на диссертацию Бакеева И.Ю. обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории пучков Института электрофизики УрО РАН в качестве отзыва ведущей организации (протокол № 6 от «19» июня 2019 г.)

Заведующий лабораторией пучков частиц:

Доктор технических наук,
член-корреспондент РАН



Н.В. Гаврилов

Секретарь семинара:
и.о. ученого секретаря
д.ф.-м.н.



Кучинский Э.З.

Заведующий лабораторией пучков частиц, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук Гаврилов Николай Васильевич (gavrilov@ier.uran.ru) и и.о. ученого секретаря Кучинский Эдуард Зямович (kuchinsk@ier.uran.ru) – сотрудники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), почтовый адрес: г. Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 106, Телефон: 8-(343)-267-87-96, Факс: (343) 267-87-94, E-mail: admin@ier.uran.ru, <http://www.ier.uran.ru/>