

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы (диссертации) на тему:
«ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО СУБМИЛЛИСЕКУНДНОГО
РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В
ИСТОЧНИКЕ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ»

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия
Профиль подготовки (специальность):
1.3.5 Физическая электроника

Аспирант



(подпись)

Торба Максим Сергеевич

Научный руководитель:
Воробьёв Максим Сергеевич,
д.т.н., в.н.с.

Введение и актуальность темы научного исследования

В настоящее время источники электронов находят широкое научное и практическое применение благодаря широкому диапазону параметров генерируемого пучка, определяемого способом его генерации. В частности, такие источники могут использоваться для проведения обработки органических материалов (пищевые или медицинские продукты) [1–3], а также для обработки поверхности различных металлических и металло-керамических материалов и изделий с целью улучшения свойств их поверхности (закалка, полировка) [4–6].

Отдельную нишу занимают источники электронов, позволяющие генерировать электронные пучки, получаемые при использовании сеточных плазменных эмиттеров (СПЭ). СПЭ представляет собой электродную систему, позволяющую генерировать плазму в сравнительно больших объемах (до 1 м³ и больше). Отличительной особенностью СПЭ является использование с одной или более сторон эмиттера мелкоструктурной металлической сетки, которая позволяет стабилизировать границу эмиссионной плазмы, обеспечивая слабую зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения. Слойная стабилизация границы эмиссионной плазмы требует согласования геометрии эмиссионных отверстий (ячеек сетки) с характерным размером слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от эмиссионного электрода. В результате этого эмиссия электронов происходит с частично открытой поверхности плазмы. В центральной зоне ячейки, где слои не перекрываются, возможен свободный выход электронов, тогда как в периферийной области эмиссия ограничена потенциальным барьером. По мере увеличения толщины слоя доля открытой области уменьшается, что приводит к снижению эффективной эмиссионной площади. Поскольку плотность электронного тока в отсутствие барьера значительно выше, чем при его наличии, общий эмиссионный ток через одно отверстие в основном определяется площадью открытого участка плазмы. В этих условиях возрастание тока эмиссии электронов приводит к росту потенциала плазмы относительно анода и, как следствие, приводит к увеличению слоя пространственного заряда, что способствует сокращению

площади открытой плазменной поверхности и уменьшению тока эмиссии электронов [7]. Именно сеточная/слоевая стабилизация границы эмиссионной плазмы позволяет независимо и в широких пределах управлять основными параметрами пучка (длительность, ток, энергия электронов, частота следования импульсов). Такое управление сложно или невозможно реализовать в источниках электронов с другими типами эмиттеров.

Отдельно стоит отметить СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, которые отличаются высокой энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы и позволяют генерировать интенсивные субмиллисекундные электронные пучки. Однако использование в таких системах точечных источников плазмы приводит к появлению ее локальной неоднородности, что негативно влияет на распределение плотности тока пучка по его сечению. Наличие такой неоднородности является одной из основных причин нестабильной работы таких источников, что, чаще всего, связано с нарушением сеточной стабилизации границы эмиссионной плазмы и снижением электрической прочности ускоряющего промежутка, а в итоге усложняет дальнейшее использование таких электронных пучков.

Стоит отметить, что при генерации планарных электронных пучков имеется недостаток, связанный со сложностью модификации поверхности изделий сложной формы, например, цилиндрической, что приводит к необходимости вращения изделия вокруг своей оси и перемещении пучка в аксиальном направлении. Таким образом, в настоящее время стоит актуальный вопрос разработки источников электронов, позволяющих генерировать не планарные, а радиально сходящиеся электронные пучки [8–10], которые позволили бы улучшить качество обработки и производительность системы, сохраняя при этом все вышеперечисленные преимущества таких источников.

Таким образом, данная работа посвящена разработке и созданию источника электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, способного генерировать радиально сходящийся электронный пучок с реализацией независимого управления его параметрами, позволяющего проводить модификацию

поверхности металлических изделий цилиндрической формы с удовлетворительным качеством обработки.

Цель работы: разработка, создание и применение стабильно работающего источника электронов, позволяющего осуществлять генерацию радиально сходящегося субмиллисекундного электронного пучка с плотностью энергии, достаточной для модификации поверхности металлических изделий цилиндрической формы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Разработка и создание экспериментального стенда источника электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, генерирующего радиально сходящийся электронный пучок.
- Разработка и создание системы электропитания СПЭ на основе индуктивных накопителей энергии.
- Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для исследования параметров эмиссионной плазмы дугового разряда.
- Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для коллекторных измерений тока радиально сходящегося пучка.
- Осуществить поиск режимов генерации субмиллисекундного радиально-сходящегося электронного пучка с плотностью энергии удовлетворяющей требованиям модификации поверхности металлических материалов и изделий.
- Демонстрация возможности использования созданного источника электронов с СПЭ с целью модификации поверхности различных цилиндрических изделий.

Методы исследования

Основным методом исследования в настоящей работе являлся физический эксперимент и траекторный анализ, в ходе которых осуществлялось:

1. Измерение вольт-амперных характеристик дугового разряда и распределение токов радиально сходящегося пучка в ускоряющем промежутке при варьировании величиной ускоряющего напряжения;

2. Снятие зондовых вольт-амперных характеристик дугового разряда (концентрации плазмы, температуры электронов, потенциала плазмы) и зондовые измерения аксиального и азимутального распределения концентрации плазмы дугового разряда с помощью созданной оригинальной автоматизированной системы измерения;

3. Измерение азимутального распределения плотности тока радиально сходящегося пучка с использованием созданной оригинальной системы коллекторных измерений.

4. Проведен траекторный анализ электронного пучка, позволивший реализовать в эксперименте устойчивые режимы генерации пучка в условиях его самофокусировки за счет нарабатываемой плазмы.

5. Выполнены механические (измерение микротвёрдости методом Викерса) и трибологические (определение износостойкости и коэффициента трения) испытания образцов, облученных электронным пучком. Выявлены оптимальные режимы облучения образцов в режимах, позволяющих формировать поверхностный слой образца, обладающий сравнительно высокими износостойкостью и твердостью. Показано, что микротвердость поверхности рассматриваемой системы может превышать микротвердость исходного (до облучения) более чем на 22%, а скорость износа снижается \approx в 1300 раз при незначительном изменении коэффициента трения.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования:

1. Создана оригинальная система электропитания многодугового плазменного эмиттера, отличающаяся накоплением и передачей запасенной энергии в разряд через двухобмоточные индуктивные накопители, имеющие независимое от тока дуги напряжение холостого хода до 3 кВ, обеспечивающая устойчивую генерацию импульсов тока дугового разряда субмиллисекундной длительности суммарной амплитудой от 30 А до 250 А, не зависящую от импеданса разрядного промежутка.

2. Секционирование полого анода многодугового сеточного плазменного эмиттера позволяет экранировать области горения дуговых разрядов друг от друга, нивелируя, тем самым, локальное развитие тока в ускоряющем промежутке, обусловленное различными процессами на коллекторе (дегазация, плавление, испарение и др.), возникающими локально и дестабилизирующими работу источника электронов, а также снижает азимутальную неоднородность плотности тока пучка с 60% до 10%

3. При давлении рабочего газа до 10^{-1} Па и ускоряющем напряжении до 50 кВ реализована возможность радиальной сходимости и аксиальной самофокусировки электронного пучка с токами, значительно превышающими (до 10 раз) токи Чайлда-Ленгмюра для цилиндрического диода. Самофокусировка электронного пучка на коллекторе осуществляется за счёт компенсации объёмного заряда электронов нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке. При давлении рабочего газа порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющем напряжении 20 кВ и токе электронного пучка до 100 А область фокусировки составляет до половины размера эмиссионного окна шириной 50 мм при диаметре коллектора 16 мм и длине ускоряющего зазора 100 мм.

4. В источнике электронов с плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления получен радиально сходящийся электронный пучок субмиллисекундной длительности с уникальной совокупностью параметров: ток в ускоряющем промежутке до 50 А, ускоряющее напряжение до 50 кВ, длительность импульса до 500 мкс, частота следования импульсов 1 с^{-1} , плотность энергии электронного пучка до 15 Дж/см^2 на длине 50 мм при диаметре коллектора 16 мм. Такой пучок с удовлетворительной неоднородностью ($\pm 10\%$) оплавляет цилиндрическую поверхность нержавеющей стали 12Х18Н10Т, приводя к снижению шероховатости её поверхности с 2,04 мкм до 0,42 мкм.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность выводов по результатам исследований и положений, выносимых на защиту, обусловлена их непротиворечивостью

относительно существующих представлений о природе изучаемых явлений, и основана на применении современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных

Научная новизна

Создан источник электронов, позволяющий производить модификацию поверхности цилиндрических изделий с плотностью энергии пучка до 20 Дж/см^2 , при ускоряющем напряжении до 50 кВ, токе пучка до 50 А, длительности импульсов до 500 мкс и частоте их следования до 1 с^{-1} . Определены стабильные режимы генерации радиально сходящегося электронного пучка с удовлетворительной неоднородностью ($\pm 10\%$) его плотности энергии, достигающей 20 Дж/см^2 . Продемонстрирован способ снижения неоднородности плотности тока пучка за счёт секционирования полого анода сеточного плазменного эмиттера. Продемонстрирован способ аксиальной самофокусировки и радиальной сходимости электронного пучка с токами, значительно превышающими (до 10 раз) токи Чайлда-Ленгмюра для цилиндрического диода за счёт компенсации объёмного заряда электронов нарабатываемой плазмой в ускоряющем промежутке.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 относятся к списку публикаций, в которых излагаются основные результаты диссертации (5 статей в журналах из перечня ВАК [1а–5а]), 7 статей в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus [2а–4а, 6а–8а, 10а], 2 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций [6а, 9а].

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. V научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «ОБЬ-2024» (10 – 14 июня, 2024 г.), Новосибирск, Россия;
2. VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (31 июля – 6 августа 2023 г.) с. Максимиха, Республика Бурятия, Россия;
3. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (17 – 19 мая, 2023 г.), Томск, Россия;
4. 8-й и 9-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (7th, 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2022 (2 – 8 октября, 2022 г.); EFRE 2024 (16 – 21 сентября, 2024 г.)), Томск, Россия;
5. 10-я Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (X International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT – 10 (12 – 16 сентября, 2022 г.)), Минск, Беларусь;
6. XII Всероссийская конференция по физической электронике, ФЭ – 2022 (19 – 22 октября, 2022 г.), Махачкала, Россия;
7. 15-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (15th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications, GDP 2021 (5 – 10 сентября, 2021 г.)), Екатеринбург, Россия;

Личный вклад автора

Представленные в работе результаты получены автором лично, а также при совместной работе с соавторами публикаций: М.С. Воробьёвым, Н.Н. Ковалем, С.Ю. Дорошкевичем, А.А. Гришковым, Р.А. Картавцовым, В.И. Девятковым, В.А. Шугуровым, И.В. Лопатиным, С.А. Сулакшиным, М.А. Мокеевым и В.И. Шином. Постановка задач осуществлялась научным руководителем д.т.н. М.С. Воробьёвым с регулярными консультациями д.т.н., проф. Н.Н. Ковалю при участии автора работы.

Основная часть

В качестве объекта исследования был выбран источник электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, генерирующий радиально сходящийся пучок электронов (Рисунок 1).

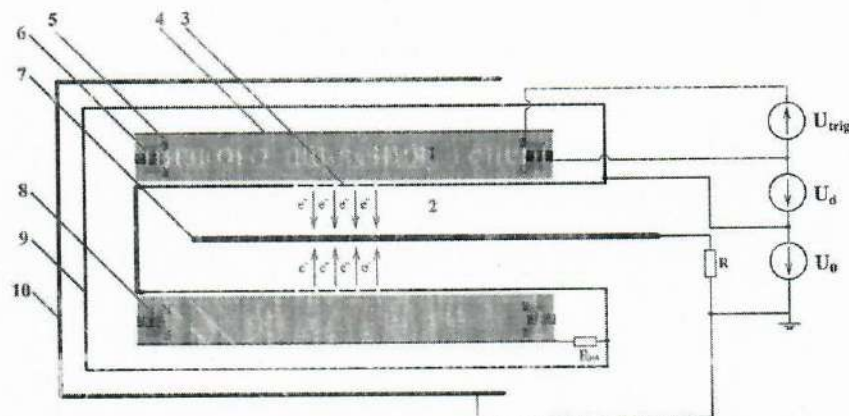


Рисунок 1 – Схема источника электронов с СПЭ: 1 – коллектор; 2 – эмиссионная сетка; 3 – вакуумная камера; 4 – полый анод; 5 – катодные узлы

Конструкция источника, представленная также в работах [1а, 9а, 10а], включает в себя вакуумную камеру 10, которая находится под потенциалом земли и СПЭ, который представляет собой полый цилиндр из нержавеющей стали длиной 320 мм, внешним диаметром 460 мм и внутренним диаметром 220 мм. Внешняя стенка плазменного эмиттера представляет собой полый анод 4, который подключен через сопротивление R_{ha} к эмиссионной сетке 3 для улучшения условий извлечения электронов из плазменного эмиттера. Внутренняя стенка плазменного эмиттера представляет собой эмиссионную сетку 3, которая разделяет разрядный 1 и ускоряющий 2 промежутки. Эмиссионная сетка 3 представляет собой мелкоструктурную металлическую сетку с размером ячейки $0,14 \times 0,14$ мм, которая находится под потенциалом анода.

Для создания катодного узла был проведен анализ литературы, в ходе которого сделано предпочтение в использовании дугового разряда открытого типа с инициированием катодного пятна пробоем по поверхности диэлектрика. Выбор дуги открытого типа обусловлен простой и надежной конструкцией, а также слабой зависимостью от напуска рабочего газа по сравнению с контрагированным дуговым

разрядом, который на большой длительности импульса (уровня сотен микросекунд) или амплитуды тока может приводить к обрывам тока разряда при нехватке рабочего газа в канале контрагирования. Для обеспечения приемлемой однородности распределения эмиссионной плазмы как аксиально, так и азимутально, было принято решение расположить в торцах эмиттера 6 плазмогенераторов (по 3 с каждой стороны) и разнести их по азимуту на угол 60 градусов относительно друг друга. Такое количество плазмогенераторов было выбрано по нескольким причинам, во-первых, имеющийся высоковольтный кабель состоит из 7-ми жил, из которых шесть должны быть подключены к катодам и один к аноду. Во-вторых, увеличение количества катодных узлов приводит к усложнению системы электропитания плазменного эмиттера, а также усложнению его монтажа и конструкции. В качестве рабочего газа выбран аргон вследствие своей инертности и сравнительно большого сечения ионизации. Для равномерной подачи аргона в плазменный эмиттер каждый катод имеет аксиальное отверстие 1 мм, через которое осуществляется напуск газа по трубкам одинаковой длины. Вследствие ограниченного количества токоведущих жил в высоковольтном кабеле, подача импульса поджига на каждый катодный узел происходит через каждый провод катода и общий анод разряда с помощью источника U_{trig} , а поддержание тока разряда обеспечивается источником I_d . При этом, каждый электрод поджига подключен с анодом 8 через сопротивление (15 Ом). Таким образом, сначала генерируется высоковольтный импульс поджига, происходит пробой по поверхности диэлектрика, инициирующий катодное пятно на поверхности катода, что способствует зажиганию дугового разряда. Для более диффузного горения дуги напротив каждого катода устанавливается перераспределяющий электрод, соединенный с анодом через электрод поджига 5 и сопротивление. Полый анод 4, подключенный через сопротивление к эмиссионной сетке 3, позволяет ускорить переключение тока дугового разряда от каждого катодного узла в область эмиссионной сетки для повышения коэффициента извлечения электронов из эмиттера. Отбор электронов из эмиссионной плазмы и их ускорение до коллектора осуществляются через ячейки эмиссионной сетки под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 50 кВ, приложенного между эмиссионным

электродом и коллектором.

Размеры плазменного эмиттера ограничиваются имеющейся вакуумной камерой с одной стороны и размером обрабатываемых изделий с другой. Учитывая, что планируемый размер обрабатываемых изделий будет не более ~15 см в диаметре, расстояние от коллектора (изделия) до эмиссионной сетки было выбрано 22 см, чтобы снизить влияние возникающего потока газа и частиц материала при оплавлении поверхности изделия на параметры разряда и пучка. Расстояние от вакуумной камеры до плазменного эмиттера, равное 7 см, подобрано с учётом обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка при напряжении до 50 кВ. Длина плазменного эмиттера также выбрана максимально возможной с учётом длины вакуумной камеры, для того чтобы иметь возможность обрабатывать изделия длиной до 28 см (зависит от ширины эмиссионной области). На торце, в центре плазменного эмиттера установлен разъём для соединения с высоковольтным кабелем. Помимо электрического контакта разъём обеспечивает распределение напуска рабочего газа по всем катодам.

Внешний вид плазменного эмиттера представлен на Рисунках 2, 3.

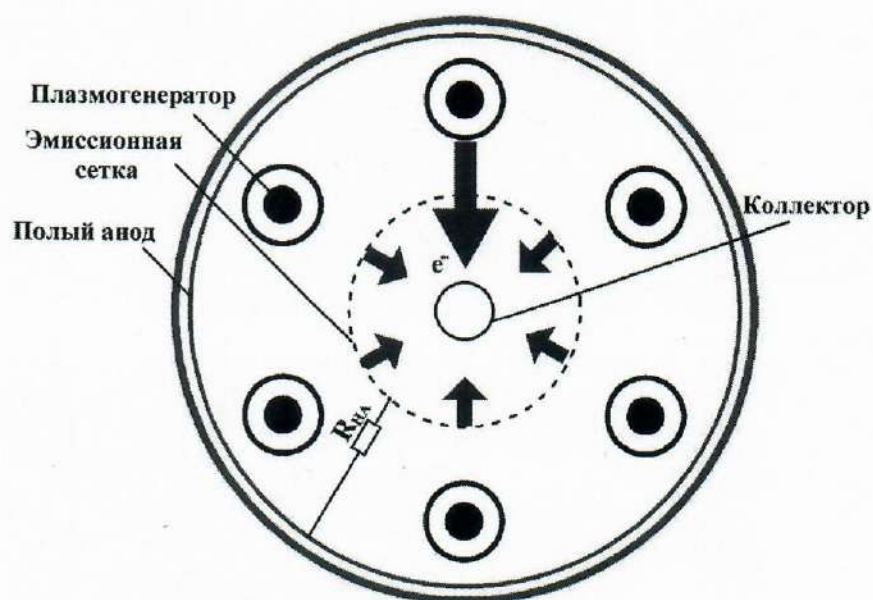


Рисунок 2 – Внешний вид плазменного эмиттера (вид с торца)



Рисунок 3 – Внешний вид плазменного эмиттера

Источник питания состоит из двух блоков: блока управления и силового блока, состоящего из блока поджига и блока разряда.

Схема электропитания дугового разряда низкого давления на основе индуктивных накопителей энергии, представлена на Рисунок 1.

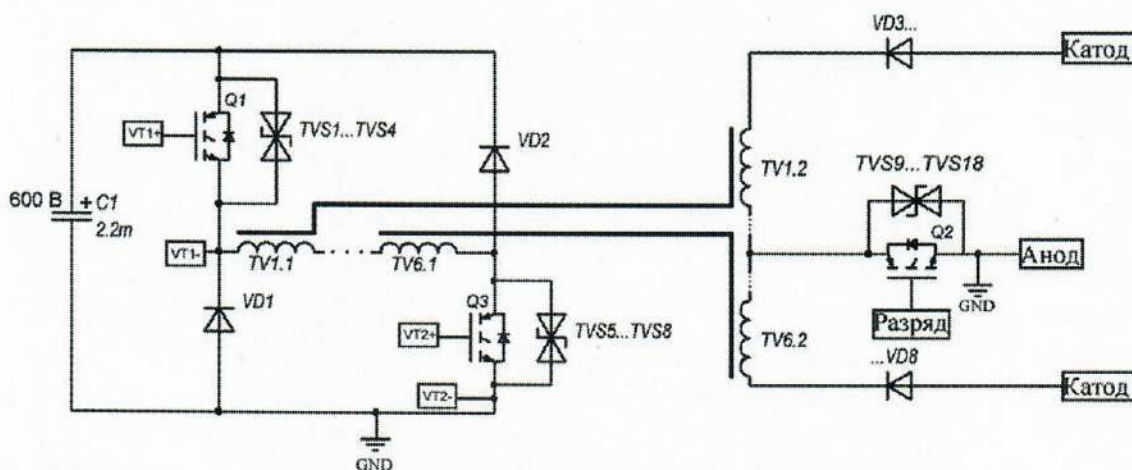


Рисунок 1 – Схема электропитания плазменного эмиттера

Эмиссионную плазму генерируют шесть плазмогенераторов, ток каждого из которых обеспечивает соответствующий двухобмоточный индуктивный накопитель (TV1 ... TV6). Электропитание схемы реализовано с помощью первичного накопителя – конденсаторной батареи, на которую подается 220 В сетевого напряжения через схему двойного умножения напряжения для ее зарядки до 600 В, и вторичных накопителей – двухобмоточных дросселей. Первичные обмотки дросселей имеют одинаковую индуктивность и соединены последовательно, поэтому на каждой первичной обмотке падение напряжения составляет около 100 В. При

подаче управляющих импульсов на затворы ключевых элементов Q1 и Q3 и их переходе в отрытое состояние схема начинает работать в фазе накопления энергии в магнитном поле дросселей. При переходе ключевых элементов Q1 и Q3 в закрытое состояние инициируется поджигающий импульс тока разряда, и схема начинает работать в фазе передачи энергии в нагрузку. Посредством магнитной индукции осуществляется передача энергии из первичного контура дросселя во вторичную обмотку с коэффициентом трансформации, равным шести. Таким образом, к каждому из шести дросселей во вторичной обмотке также прикладывается по 600 В. В момент закрытия ключевых элементов Q1 и Q3 ключевой элемент Q2 уже находится в открытом состоянии, и при смене полярности напряжения на вторичных обмотках дросселя через них начинает протекать ток. Напряжение прикладывается к разрядному промежутку (катод – анод). В случае, если дуговой разряд загорелся хотя бы на одном из плазмогенераторов, происходит уменьшение падения напряжения как на вторичной, так и на первичной обмотке соответствующего дросселя. Таким образом, напряжение, прикладываемое в первичном контуре к такому дросселю, уменьшается, а оставшееся напряжение (100В минус падение напряжения на дросселе после зажигания разряда) равномерно распределяется между остальными 5-ю плазмогенераторами, ввиду последовательного соединения их первичных контуров. Такое перераспределение приводит к тому, что напряжение во вторичном контуре увеличивается на тех плазмогенераторах, на которых не загорелся разряд. Таким образом, чем больше плазмогенераторов сработало, тем большее напряжение прикладывается к соответствующему промежутку «катод-анод», разряд в котором не загорелся. В случае, если дуговой разряд не загорелся, происходит рекуперация энергии в первичный контур через разрядные диоды VD1 и VD2. Таким образом, система электропитания функционирует в самоподдерживающемся режиме.

На Рисунке 5 представлены осциллограммы работы источника. На представленном рисунке красным цветом обозначен зарядный ток, который протекает в первичном контуре через ключи Q1 и Q3. Зелёным цветом выделен ток разряда или общий ток, протекающий по вторичной стороне источника электропитания через ключ Q2.

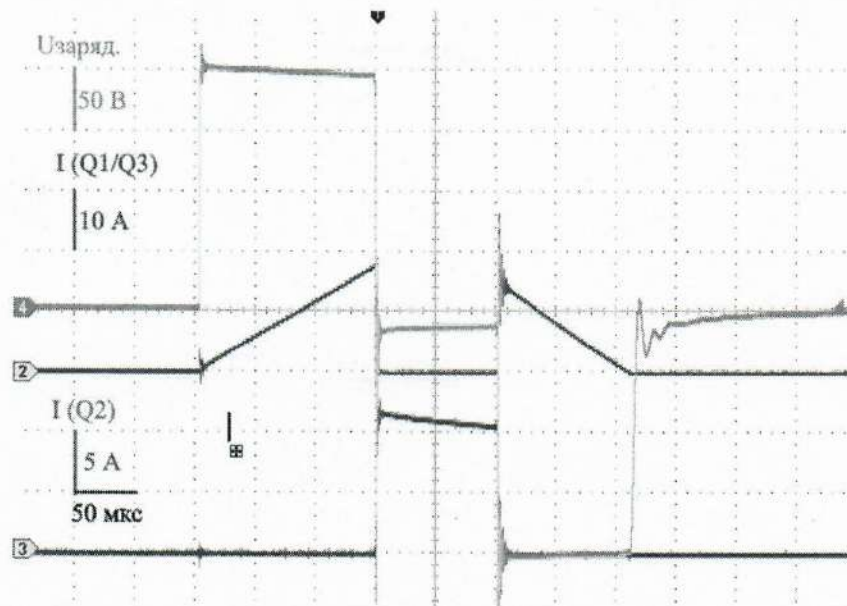


Рисунок 5 – Осциллограммы работы источника

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) дугового разряда определялась путем измерения напряжения разряда с помощью высоковольтного щупа АКТАКОМ АСА-0639 с внутренним резистивным делителем 1:1000, а ток разряда регистрировался поясом Роговского с чувствительностью 50 А/В. Полученные ВАХ для разного давления аргона представлены на Рисунок 6.

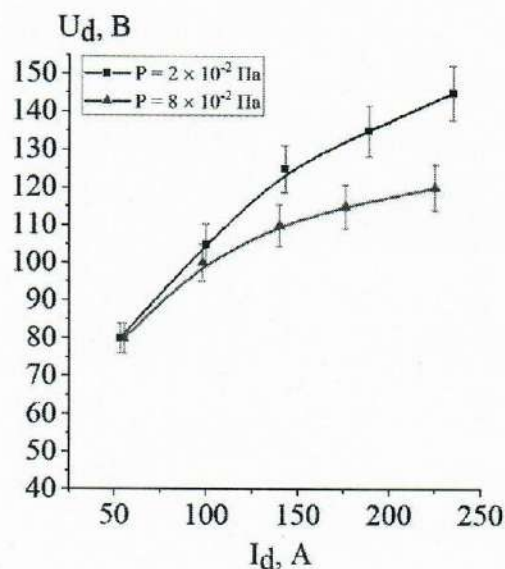


Рисунок 6 – ВАХ дугового разряда низкого давления

Полученные ВАХ являются растущими, а также наблюдается снижение напряжения горения разряда при повышении давления рабочего газа, связанное с

увеличением количества актов ионизации в объёме и повышением концентрации эмиссионной плазмы. К примеру, при токе разряда $I_d = 140$ А, напряжение разряда при повышении давления газа уменьшается на ~ 15 В.

Зондовые измерения

Следующим шагом после определения ВАХ разряда стали эксперименты по измерению параметров эмиссионной плазмы с помощью одиночного зонда Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром 0,5 мм. Использование системы автоматического измерения зондовых характеристик позволило обеспечить статистическую достоверность проводимых экспериментов, а также провести измерения в различные моменты генерации разряда, что дало возможность оценить скорость наработки и распространения плазмы в объёме. Схема измерения зондовых характеристик представлена на Рисунок 7.

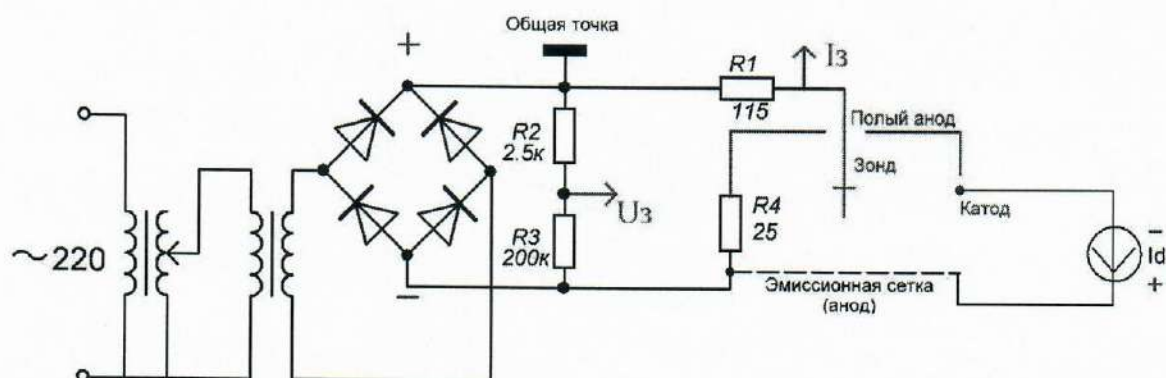


Рисунок 7 – Схема измерения зондовой характеристики относительно анода дугового разряда

Положение зонда Ленгмюра при проведении зондовых измерений схематично представлено на Рисунок 8.

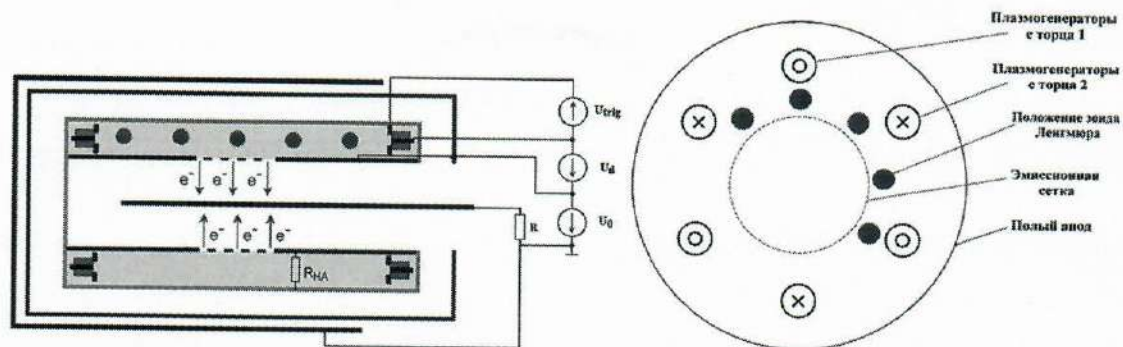


Рисунок 8 – Положение одиночного зонда Ленгмюра при проведении экспериментов

Измерение параметров плазмы дугового разряда при различных токах разряда (Рисунок 9а), давлениях рабочего газа (Рисунок 9б) и в различные моменты измерения в течение импульса (Рисунок 9с) проводилось в центре эмиссионной области.

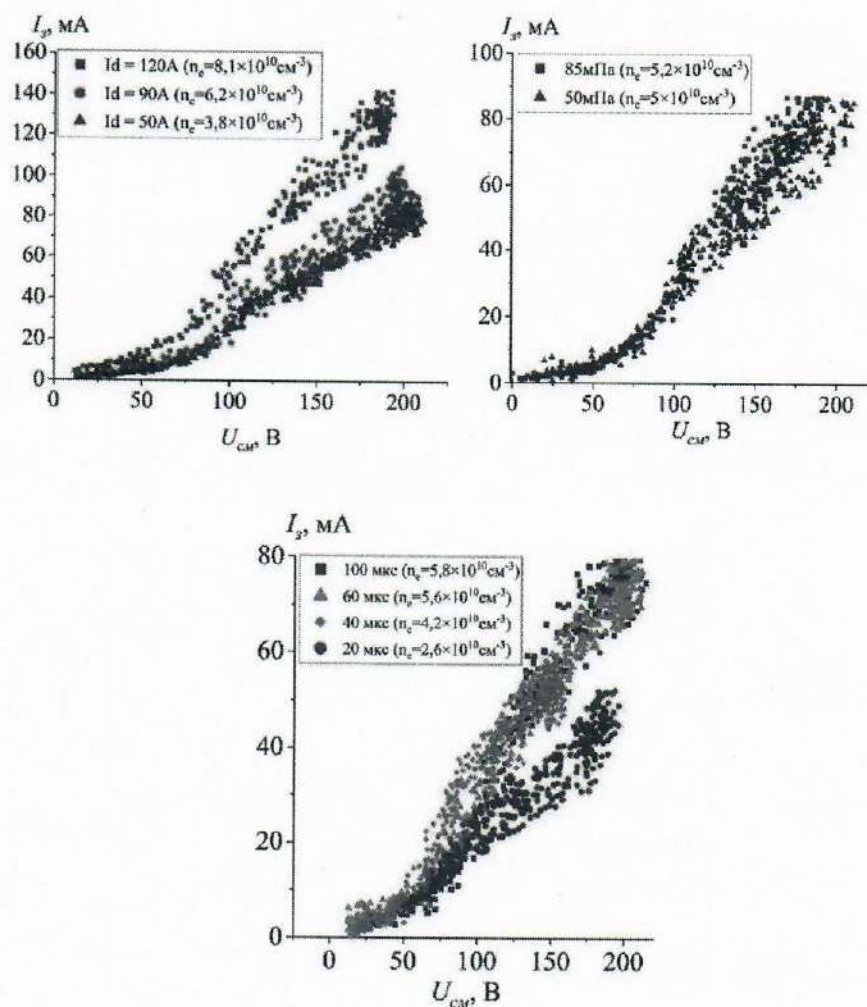


Рисунок 9 – Зондовые измерения

Повышение тока разряда приводит к росту концентрации плазмы в рабочем диапазоне давлений. Так, например, при $p = 5 \times 10^{-2}$ Па, увеличение тока разряда с 50 А до 120 А приводит к росту концентрации плазмы n_e с $3,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ до $8,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, что обусловлено увеличением эмиссии с катода, напрямую влияющей на концентрацию электронов в плазме. Изменение давления рабочего газа (Рисунок 9б) с $p = 5 \times 10^{-2}$ Па до $p = 8,5 \times 10^{-2}$ Па не оказало существенного влияния на систему. На Рисунок 9с представлена зондовая характеристика дугового разряда в различные моменты в течение импульса. Представленные зависимости демонстрируют развитие плазмы дугового разряда в объёме и значительный рост концентрации электронов в плазме дугового разряда до 60-й мкс, после чего рост становится незначительным. Это связано с развитием плазмы, а также ее наработкой в эмиссионной области. На Рисунок 10, Рисунок 11 представлены графики аксиального и азимутального распределения концентрации эмиссионной плазмы, построенные на основе полученных зондовых характеристик.

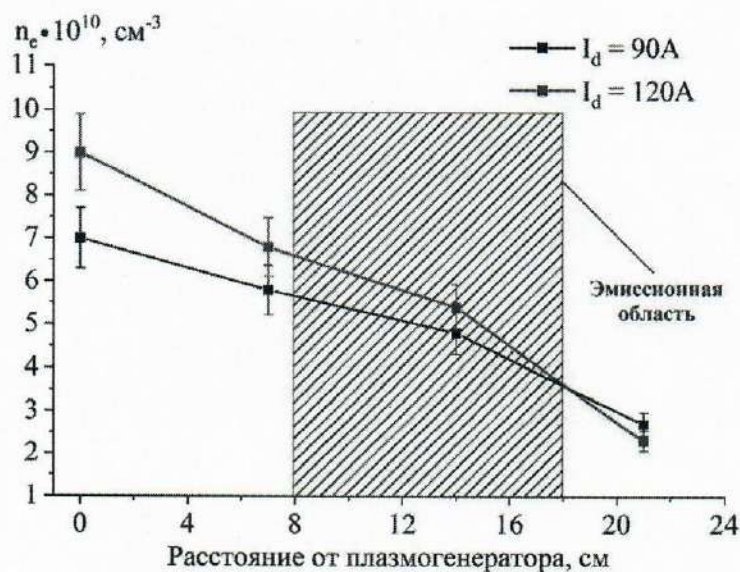


Рисунок 10 – Аксиальное распределение концентрации эмиссионной плазмы,
 $p = 5 \times 10^{-2}$ Па

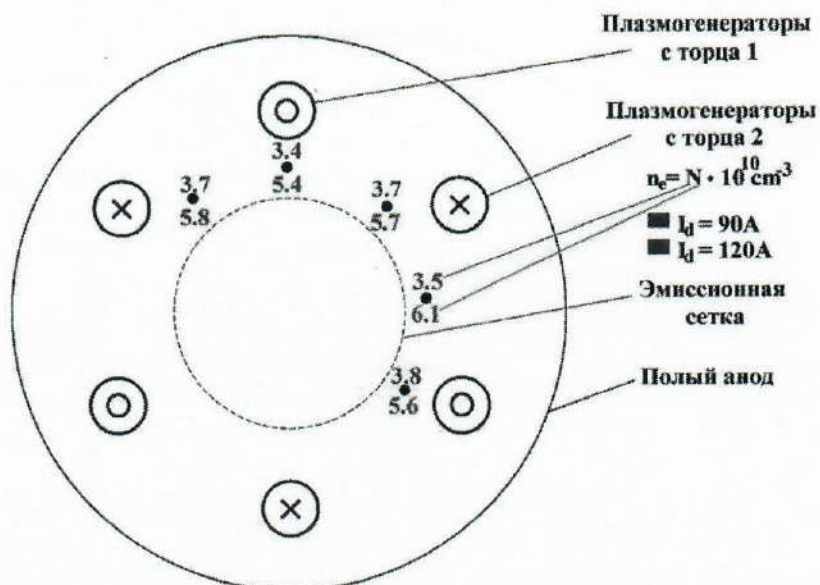


Рисунок 11 – Азимутальное распределение концентрации эмиссионной плазмы,

$$p = 5 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

Результаты зондовых измерений можно назвать удовлетворительными как в аксиальном, а так и в азимутальном направлении. Таким образом азимутальная неоднородность эмиссионной плазмы ($\approx 10\%$), аксиальная ($\approx 40\%$). Хотя, при обработке изделий цилиндрической или другой сложной формы азимутальная неоднородность является преимущественно основным параметром, аксиальная неоднородность также является довольно важным параметром при работе таких систем. В исследуемом источнике азимутальная неоднородность составила около 10%, что является приемлемым результатом для проведения модификации поверхности материалов, однако аксиальная неоднородность около 40% не может гарантировать качественную обработку длинных деталей. Такое высокое значение неоднородности может быть связано с расположением катодных узлов в плазменном эмиттере. В ходе проведения экспериментов оказалось, что угол в 60 градусов и шахматное расположение катодных узлов являются неоптимальными для получения однородной эмиссионной плазмы и, соответственно, радиально сходящегося электронного пучка. Таким образом плазма, генерируемая катодными узлами на разных торцах эмиттера, не может однородно заполнять объём между эмиссионной сеткой и полым анодом. Результаты, полученные в ходе выполнения зондовых измерений, требовали внесения изменений в схему СПЭ для того, чтобы улучшить

аксиальную неоднородность плазмы.

Из-за большого значения неоднородности эмиссионной плазмы была проведена модернизация плазменного эмиттера с целью уменьшения неоднородности эмиссионной плазмы. Улучшение характеристик в данной системе, исходя из анализа причин появления столь большой неоднородности, можно добиться перестановкой катодных узлов на одну плазменного эмиттера, при этом катодные узлы расположены 60 градусов относительно друг друга, что позволяет добиться снижения неоднородности генерируемой эмиссионной плазмы. Стоит отметить, что в новой представленной системе (Рисунок) получение зондовых характеристик при подаче высокого напряжения не представляется возможным, поэтому снижение неоднородности плазмы возможно оценить лишь по коллекторным измерениям генерируемого радиально сходящегося пучка или по отпечатку пучка на коллекторе.

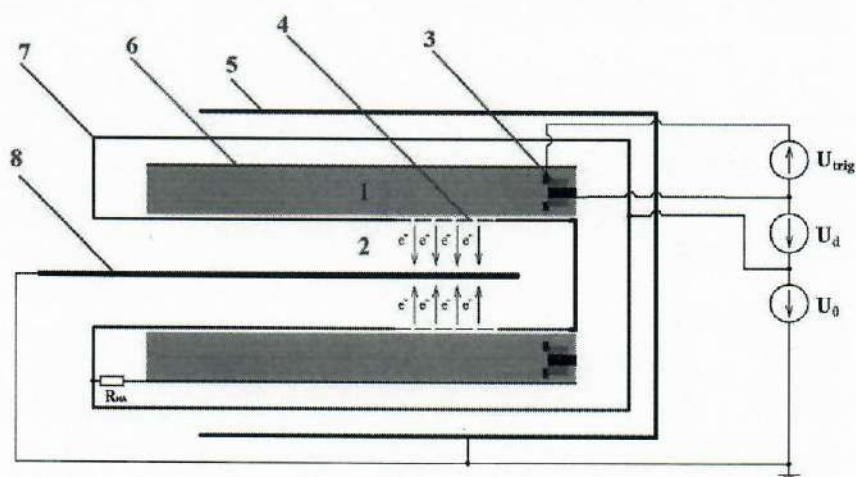


Рисунок 12 – Принципиальная схема источника: 1 – область горения разряда, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – катодные узлы, 4 – эмиссионная сетка, 5 – вакуумная камера, 6 – полый анод, 7 – защитный кожух, 8 – коллектор

Коллекторные измерения

Неоднородность распределения плотности тока пучка по сечению коллектора является очень важным параметром для всех источников электронов, которые используются для воздействия на материалы. Требования по неоднородности, которые должна обеспечить предлагаемая установка всегда различны и зависят от поставленных задач, однако, как правило, для задач плавления и обработки

материалов требования к неоднородности плотности тока пучка по его сечению должны быть не хуже $\pm 10\%$. Для измерения неоднородности плотности тока радиально сходящегося электронного пучка использовался секционированный коллектор, который представляет собой трубку, на конце которой через керамическую вставку закреплены четыре пластины из нержавеющей стали, изолированные друг от друга (Рисунок 13).



Рисунок 13 – Секционированный коллектор

Размер каждой пластины составил $0,8 \times 1$ см. Поверх керамической вставки был установлен фольговый экран с целью исключить накопление заряда на керамике, искажающего условия генерации пучка и снижающего электрическую прочность ускоряющего зазора, что может привести к появлению пробоев ускоряющего промежутка и ухудшению работы источника в целом. Каждая секция коллектора подключалась к потенциалу “земли” проводом, который был помещён внутрь трубки, чтобы избежать попадания на него радиально сходящегося пучка. Ток на каждом коллекторе регистрировался с помощью пояса Роговского с чувствительностью 4 А/В. В экспериментах секционированный коллектор помещался в центр эмиссионной области равноудалённо от эмиссионной сетки.

На Рисунок 1 представлены результаты коллекторных измерений при давлении рабочего газа $p = 4 \times 10^{-2}$ Па и токе пучка $I_b = 20$ А, из которых видно, что на одну из пластин секционированного коллектора замыкается в несколько раз больше тока, чем

на другие пластины.

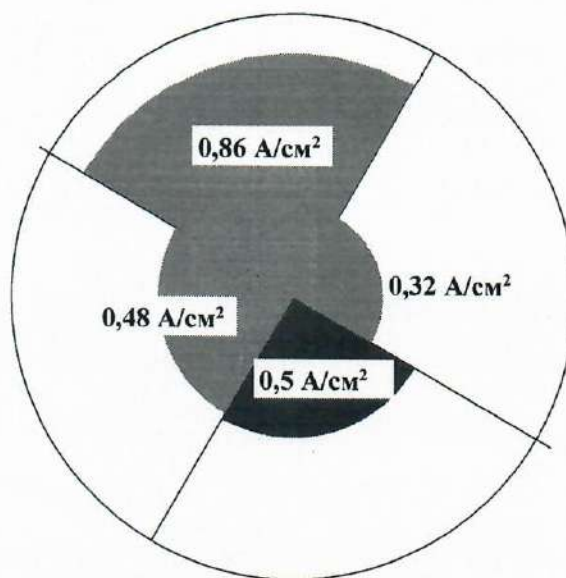


Рисунок 14 – Результаты коллекторных измерений

После обработки полученных данных по формуле XX была рассчитана неоднородность плотности тока пучка, которая составила $\pm 60\%$.

$$N = \pm \left| \frac{J_{\text{макс}} - J_{\text{ср}}}{J_{\text{ср}}} \right| \times 100\%$$

Секционирование полого анода

Результаты экспериментов, полученные ранее, показали, что неоднородность плотности тока радиально сходящегося электронного пучка является неудовлетворительной для задач плавления и модификации поверхности металлических материалов и изделий. В ходе проведённых экспериментов было сделано предположение, что локальное замыкание тока пучка на одну из секций коллектора вызвано появлением дестабилизирующих эффектов на поверхности коллектора. Согласно выдвинутой теории, локальное замыкание тока на одну из секций коллектора в начале импульса тока пучка приводит к локальному оплавлению, что было отмечено на цельном металлическом коллекторе и что

приводит к локальному оплавлению и испарению металла, локальному повышению давления и, как следствие, возникновению локального потока ионов из ускоряющего промежутка в ограниченную область плазменного эмиттера и бомбардировке ускоренными ионами полого анода. Ионная бомбардировка полого анода приводит к появлению ионно-электронной эмиссии с его поверхности и к снижению разницы потенциалов между полым анодом и эмиссионной плазмой, что приводит к переключению доли быстрых электронов из хвоста энергетического спектра функции распределения электронов по энергиям на полый анод.

Для того чтобы проверить достоверность выдвинутой теории было решено модернизировать плазменный эмиттер, а именно установить в него секционированный полый анод вместо цельнометаллического, а также использовать дополнительные стенки, ограничивающие область горения дугового разряда для каждого катодного узла. В такой конфигурации различные процессы (дегазация, плавление, испарение и др.), локально возникающие на коллекторе и дестабилизирующие работу источника электронов, не могут влиять на те участки эмиссии, которые находятся вне телесного угла участка коллектора, на котором развиваются данные дестабилизирующие процессы. Для стабильного зажигания дуговых разрядов и повышения эффективности извлечения электронов в ускоряющий зазор, в цепь каждого полого анода было установлено сопротивление 10 Ом. В результате, секционирование полого анода и ограничение области горения дугового разряда должны позволить снизить неоднородность распределения плотности тока электронного пучка на коллекторе для повышения качества оплавления его поверхности [1а]. Схема модернизированного плазменного эмиттера (а) и его внешний вид (б) представлены на Рисунок 1.

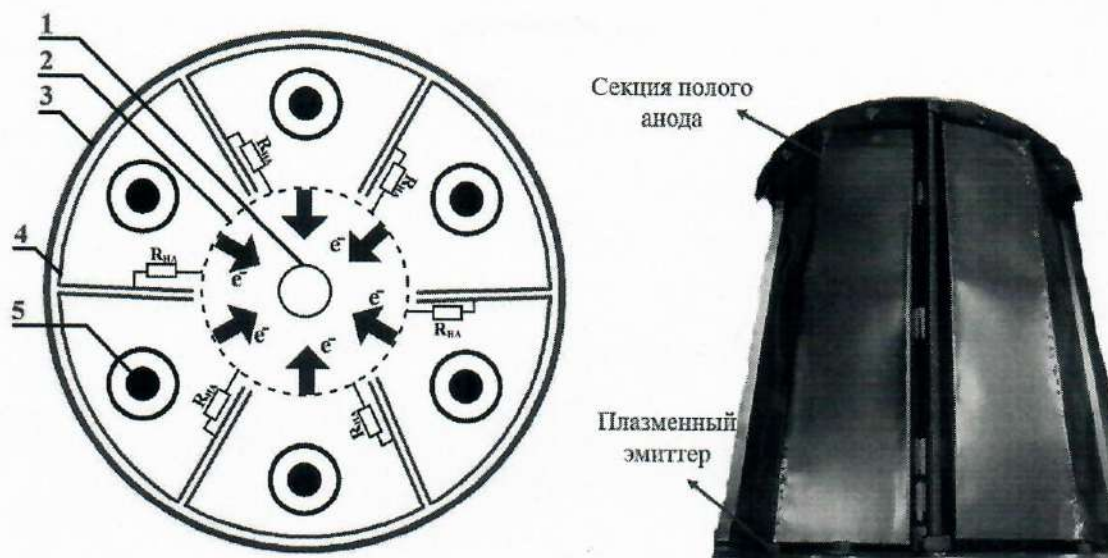


Рисунок 15 – а – Схема модернизированного плазменного эмиттера с секционированным полым анодом; б – фото секционированного плазменного эмиттера

Повторные коллекторные измерения

Для того, чтобы проверить теорию были проведены повторные коллекторные измерения, а также эксперименты с получением автографа пучка на поверхности цельнометаллического коллектора из нержавеющей стали при тех же параметрах системы. Результаты приведены на Рисунок .

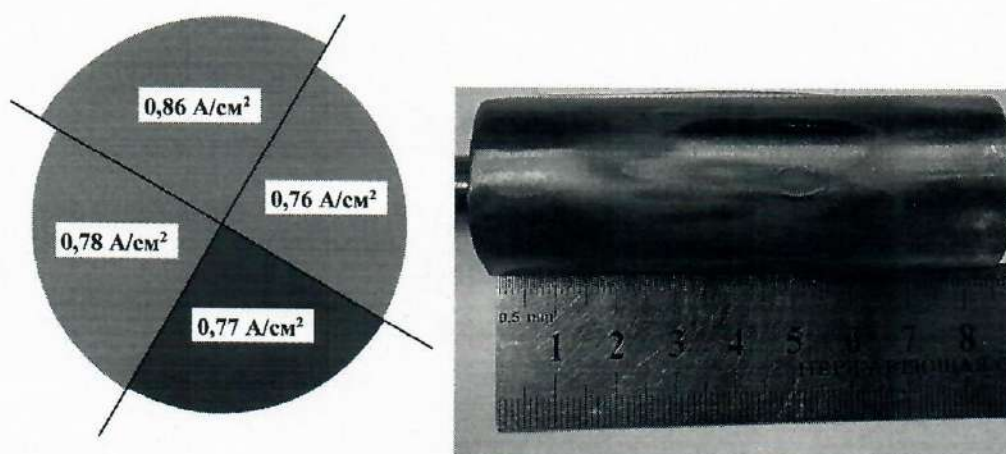


Рисунок 16 – а – результаты коллекторных измерений с секционированным полым анодом, б – фото коллектора после обработки с использованием секционированного полового анода

Повторно проведённые коллекторные измерения показали, что сеточный плазменный эмиттер с секционированным полым анодом и дополнительными стенками для ограничения области горения дугового разряда позволяет снизить неоднородность распределения плотности тока радиально сходящегося электронного пучка с 60% до 10%. Также стоит отметить, что результаты проведённых экспериментов свидетельствуют об уменьшении влияния дестабилизирующих процессов в системе на однородность радиально сходящегося электронного пучка.

Результаты твердометрии

После проведения экспериментов по обработке коллекторов из титана ВТ1-0 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 16мм был проведён цикл измерений микротвёрдости поверхностного модифицированного слоя. Исследования были проведены при помощи микротвердомера, а обработка образцов происходила в режимах с $I_b = 20$ А, $U_0 = 40$ кВ и $t_{и} = 300$ мкс. Измерение твёрдости модифицированного слоя исследуемых материалов осуществлялось по методу Виккерса на установке ПМТ-3, при нагрузке на индентор 20 грамм. Был проведён цикл из десяти измерений, в соответствии с ГОСТ 2999-75, ГОСТ 9450-76. Значение микротвердости определяли по формуле:

$$H=(1854*P)/(d^2),$$

где Р-нагрузка, d-диагональ отпечатка.

Таким образом были получены результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – результаты измерения твёрдости

Образец	Исходный	Модифицированный
Титан ВТ1-0, МПа	1803	4691
Сталь 12Х18Н10Т, МПа	1512	1469

Как видно из таблицы 1, микротвёрдость модифицированного слоя титана увеличилась в 2,6 раза в сравнении с исходным образцом. Причины упрочнения могут быть различными: закалка поверхностного слоя образца, а также фазовый переход, то есть образование двух фаз титана α -Ti и β -Ti, упрочняющие структуру

образца. Микротвёрдость модифицированного слоя стали осталась на прежнем уровне. Это может быть связано с тем, что в нержавеющей стали 12Х18Н10Т содержится небольшое количество углерода, а также отсутствуют фазовые переходы, поэтому при обработке радиально сходящимся электронным пучком происходил нагрев и плавление поверхностного слоя, которые привели к полировке поверхности образца, но без эффекта закалки.

Выводы

- Разработан и создан экспериментальный стенд источника электронов с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления, генерирующего радиально сходящийся электронный пучок.

- Разработана и создана система электропитания СПЭ на основе индуктивных накопителей энергии.

- Разработано и создано оригинальное диагностическое оборудование для исследования параметров эмиссионной плазмы дугового разряда.

- Разработано и создано оригинальное диагностическое оборудования для коллекторных измерений тока радиально сходящегося пучка.

- Осуществлён поиск режимов генерации субмиллисекундного радиально-сходящегося электронного пучка с плотностью энергии удовлетворяющей требованиям модификации поверхности металлических материалов и изделий.

- Продемонстрирована возможность использования созданного источника электронов с СПЭ с целью модификации поверхности различных цилиндрических изделий.

Публикации по теме работы

- 1а. M. S. Torba, S. Yu. Doroshkevich, M. S. Vorobiev, A. A. Grishkov, N. N. Koval, R. A. Kartavtsov, M. A. Mokeev and D. A. Shpanov // Multiarc Plasma Electron Emitter for Generating a Radially Convergent Beam // Instruments and Experimental Techniques – 2025, Vol. 68, No. 1, pp. 78–85. doi: 10.1134/S0020441225700253
- 2а. Метод оценки коэффициента извлечения электронов и коэффициента ионно-электронной эмиссии из сеточного плазменного катода / Р. А. Картавцов, М. А.

- Мокеев, М. С. Воробьев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51, № 4. – С. 15-18. – DOI 10.61011/PJTF.2025.04.59836.20104.
- 3а. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности / В. Н. Девятков, М. А. Мокеев, М. С. Воробьев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 19. – С. 23-26. – DOI 10.61011/PJTF.2024.19.58652.19995.
 - 4а. Динамика извлечения электронов из сеточного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления / Москвин П.В., Воробьев М.С., Гришков А.А., Торба М.С., Шин В.И., Коваль Н.Н., Дорошкевич С.Ю., Картавцов Р.А. Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 11. С. 43-46.
 - 5а. Отрицательная обратная связь по току в ускоряющем промежутке в источниках электронов с плазменным катодом / М. С. Воробьев, П. В. Москвин, В. И. Шин [и др.] // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92, № 6. – С. 883-888. – DOI 10.21883/JTF.2022.06.52519.14-22.
 - 6а. М.С. Торба, А.А. Гришков, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, Пространственная фокусировка радиально сходящегося электронного пучка в источнике на основе многодугового сеточного плазменного эмиттера, Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation. Tomsk: TPU Publishing House, 799–802, 2024; doi: 10.56761/EFRE2024.C1-P-023002
 - 7а. M.S. Torba, A.A. Grishkov, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, N.N. Koval, Space focusing of a radially converged electron beam in source based on a multi-arc grid plasma emitter, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 88 (Suppl 5), 2024.
 - 8а. Spatiotemporal Dynamics of a Low-Pressure Arc and a Generated Beam in an Electron Source with a Grid Plasma Emitter / M. S. Vorobyov, P. V. Moskvina, V. I. Shin [et al.] // High Temperature. – 2022. – Vol. 60, No. 4. – P. 438-445. – DOI 10.1134/s0018151x22040162.
 - 9а. Генерация радиально сходящегося электронного пучка в источнике электронов с сеточным плазменным катодом Торба М.С., Дорошкевич С.Ю., Картавцов Р.А., Воробьев М.С. Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2023. № 1-1. С. 263-266.
 - 10а. Electron source with a radially converging beam and a multiarc plasma cathode Torba M.S., Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S., Koval N.N., Ezhov V.V., Sulakshin S.A., Kartavtsov R.A. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. T. 87. № S2. С. S318-S323.
 - 11а. Пространственно-временная динамика дуги низкого давления и генерируемого пучка в источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером / М. С. Воробьев, П. В. Москвин, В. И. Шин [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 488-495. – DOI 10.31857/S0040364422040160.

Список цитируемой литературы

1. Ершов Б.Г., Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения / Б.Г. Ершов // Вестник Российской академии наук. – 2013. – Т.83. – №10. – С. 885–895.
2. Шиллер З., Электронно-лучевая технология: Пер. с нем./ З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер // Энергия. – 1980. – 528 с.
3. Черняев А. П., Варзарь С. М., Белоусов А. В. [и др.] / Перспективы развития радиационных технологий в России // Ядерная физика. – 2019. – Т. 82, № 5. – С. 425–439.
4. Иванов, Ю.Ф. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль // Гл.13 в книге «Структура и свойства перспективных металлических материалов». – С.345-382 / Под общ. ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ. – 2007. – 580 с.
5. Бурдовицин В.А., Климов А.С., Медовник А.В. [и др.] / Форвакуумные плазменные источники электронов // Томск: Изд-во Томского Университета. – 2014. – 288 с.
6. Озур, Г.Е. Источники низкоэнергетических сильнотоочных электронных пучков с плазменным анодом / Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский // Новосибирск. – 2018. – 176 с.
7. Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, Эмиссионная электроника / МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2009.
8. Kiziridi, P. P. A Source of Radially Converging Low-Energy High-Current Electron Beams / P. P. Kiziridi, G. E. Ozur // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 65, No. 6. – P. 918-923. – DOI 10.1134/s0020441222060124. – EDN YTCSKD.
9. Установка Геза-4М для электронно-пучковой модификации поверхности оболочек твэлов ру с ТЖМТ / В. И. Ангелько, Е. П. Павлов, К. И. Ткаченко, Н. П. Щеголихин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 1. – С. 67-74. – DOI 10.55176/2414-1038-2019-1-67-74. – EDN PXVRQV.
10. T. Teichmann et al., "Advances in electron beam technology for environmental and biotechnological applications at Fraunhofer FEP," J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2443, no. 1, p. 012017, 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2443/1/012017.