

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 на тему:

**«Генерация плазмы в системе на основе сильноточного
несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом с инъекцией
электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера»**

Направление подготовки:
11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

Профиль подготовки (специальность):
05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

Аспирант



Островерхов Евгений Владимирович

Научный руководитель:
Денисов Владимир Викторович,
к.т.н., зав. лабораторией
ИСЭ СО РАН

Томск – 2021

Обоснование актуальности темы научного исследования

Одним из приоритетов научно-технологического развития России объявлен переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, а также новым материалам и способам конструирования. Упрощенно сформулированная производственная задача на сегодняшний день звучит следующим образом: материал после воздействия должен иметь комплекс физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик для обеспечения заданного срока службы изделия

Несмотря на постоянно возрастающий интерес к этой области исследований, получены лишь отдельные результаты, не позволяющие однозначно связать параметры генерируемых пучково-плазменных образований, условия их воздействия на поверхность и свойства поверхности после такого воздействия и создать базу данных для решения целого круга актуальных производственных задач. Пучково-плазменное образование представляет собой плазменную среду, основные свойства (состав, однородность) и параметры (концентрация плазмы, температура электронов, потенциал плазмы и др.) которой определяются пучком частиц (электронов, ионов, фотонов, быстрых нейтральных частиц и т.д.), инжектируемых в электро-разрядную систему, обеспечивающую зажигание и горение разряда в определенном диапазоне рабочих параметров по давлению, току, напряжению горения. Особенностью пучково-плазменных образований, генерируемых в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом является возможность генерации плазмы в широком диапазоне значений концентрации ($10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и независимая регулировка всех рабочих параметров (давление, напряжение горения и др.), что важно для решения целого ряда научных и технических задач.

Методы пучково-плазменной обработки поверхности позволяют проводить химико-термическую обработку поверхности и напыление функциональных слоев в газо-металлической плазме, формируемой в разрядах низкого ($\approx 1 \text{ Па}$) давления. Осуществляется контроль таких основных рабочих

параметров, как энергия ионов, воздействующих на обрабатываемую подложку, плотность ионного тока из плазмы, синтезируемой электронным пучком, температура подложки, состав газовой смеси. Несмотря на перспективность использования такой плазмы, существует ряд проблем, препятствующих внедрению в производственные циклы цифрового интеллектуального автоматизированного оборудования на этой основе. Особенно это касается систем, в которых требуется создавать плазму в больших ($> 0,1 \text{ м}^3$) вакуумных объемах. Это связано со сложностями при обеспечении требуемой степени неоднородности плазмы. Перспективным с точки зрения формирования плазмы с низкой степенью неоднородности и независимой регулировкой всех рабочих параметров является самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом (с внешней инъекцией электронов в плазму тлеющего разряда и формирования пучково-плазменных образований). Многообещающим является техническое решение с расположением цилиндрического протяженного сеточного плазменного эмиттера электронов в центре полого катода тлеющего разряда. В этом случае электроны извлекаются в направлении боковых стенок полого катода. Инжектируемые из плазменного эмиттера электроны осциллируют в полом катоде, создавая плазму с контролируемыми параметрами, и могут ускоряться до необходимой энергии, обеспечивая целенаправленное электронно-пучковое воздействие на поверхность материала.

Цель научного исследования

Создание генератора объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе самостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инъекцией электронов из протяженного цилиндрического полого анода и установление влияния условий горения основного и вспомогательного разрядов на однородность плазмы, генерируемой в тлеющем разряде.

Основные задачи научного исследования

1. Разработка разрядной системы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом с инжекцией электронов из протяженного цилиндрического полого анода, создание экспериментального стенда для исследования режимов горения оригинальной формы несамостоятельного тлеющего разряда
2. Разработка цилиндрического сетчатого эмиттера электронов в системе генерации несамостоятельного тлеющего разряда.
3. Исследование влияния условий горения вспомогательного дугового разряда на продольную однородность распределения плазмы в цилиндрическом сетчатом эмиттере электронов.
4. Исследование влияния условий горения основного тлеющего разряда на продольную однородность распределения плазмы в тлеющем разряде.

Глава 1. Литературный обзор

Тлеющий разряд низкого давления (до 1 – 2 Па) нашел свое применение в ионно-плазменной обработке металлов и сплавов. Он обладает рядом преимуществ по сравнению тлеющим разрядом высокого давления, а именно: малая вероятность столкновительных процессов для ионов в катодном падении потенциала; низкое содержание нейтралов в прикатодном слое тлеющего разряда; угол падения ионов на катод близок к нормали; возможность проведения комбинированных процессов обработки металлов и сплавов, азотирования и напыления пленок на поверхность изделия.

Для зажигания тлеющего разряда низкого давления (≈ 1 Па) необходимо выполнения условия самоподдержания разряда, то есть требуется обеспечить большую длину свободного пробега электронов, ускоренных в прикатодном падении потенциала, то есть увеличить длину пути электронов таким образом, чтобы до их ухода на анод они успели термализоваться [1]. Такое условие выполняется в полном катоде, в котором полученные в результате вторичной ионно-электронной эмиссии со стенок катода, электроны ускоряются в

прикатодном падении потенциала и осциллируют в полости, эффективно ионизируя газ. В работе [2] авторы в самостоятельном тлеющем разряде с полым катодом объемом 0,2 м³ при давлении 1 Па снизили напряжение горения тлеющего разряда до 190 В. Еще большее снижение напряжения горения при таком давлении возможно путем инъекции дополнительных электронов из плазмы вспомогательного разряда [3]. Дополнительная инъекция электронов позволяет снизить напряжение горения разряда до нескольких десятков вольт [4]. При этом для достижения высоких значений токов основного разряда требуется инжектировать относительно высокие (более 10 А) значения тока электронов. Это создает локальные максимумы в распределении концентрации плазмы, как правило, вблизи эмиссионной сетки источника электронов [5]. Скорость химико-термической обработки изделий значительно зависит от плотности ионного тока на деталь и должна иметь значения около 4 мА/см² [6]. Для получения таких значений плотности ионного тока при значительной площади обрабатываемой детали требуется генерация тока в разряде величиной до нескольких сотен ампер, а соответственно и высоких значений инжектируемого тока. В [7] показано, что при инъекции из вспомогательного разряда электронного тока до 50А радиальное распределение концентрации плазмы имеет неоднородность на уровне $\pm 15\%$, однако оно измерялось радиальным зондом в плоскости перпендикулярной к оси источника электронов.

В результате проведенных работ был создан экспериментальный стенд с вакуумной камерой диаметром 0,6 м и высотой 1,2 м и было проведено исследование влияния на однородность азимутальных распределений плотности ионного тока различных условий горения. В работе [8] предлагался вариант создания пучковой плазмы при инъекции и ускорении электронов из полого катода.

Идея состоит в том, чтобы использовать в больших вакуумных объемах протяженный сеточный плазменный эмиттер электронов, расположенный в центре полого катода тлеющего разряда. При использовании протяженного

плазменного эмиттера, являющегося полым анодом вспомогательного дугового разряда будет возникать еще одна проблема – неоднородность плотности электронного тока по эмиссионной поверхности. Решить задачу снижения неоднородности плотности электронного тока по поверхности плазменного эмиттера можно при оптимизации конструкции электродной системы вспомогательного дугового разряда, варьируя рабочие параметры, а также используя двухступенчатый дуговой разряд, вторая ступень которого представляет собой полый катод, позволяет добиваться диффузного горения разряда, а значит более равномерного горения разряда в полном аноде.

Глава 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 1 создан на основе цилиндрической вакуумной камеры высотой 1200 мм, диаметром 600 мм и объёмом около 0,34 м³. В качестве источника вспомогательной плазмы, из которой извлекались электроны, инжектируемые в тлеющий разряд, использовался расположенный на нижнем основании камеры плазменный источник с холодным полым катодом, анодом для которого служил протяженный, длиной около 1000 мм полый сеточный анод (сеточный плазменный эмиттер электронов).

Размер ячейки сетки полого анода составлял (0,4×0,4) мм с геометрической прозрачностью около 45 %. Вакуумный объем откачивается до давления около $5 \cdot 10^{-3}$ Па турбомолекулярным насосом. При напуске рабочего азотосодержащего газа давление устанавливается на уровне (0,1 – 1,2) Па. Затем зажигался дуговой разряд между полым цилиндрическим катодом и полым сетчатым анодом, который находился под потенциалом полого катода тлеющего разряда. Часть потока электронов, эмитируемых из плазмы дугового разряда, попадала сквозь ячейки сетки в прикатодное падение потенциала тлеющего разряда, ускорялась в нем и осциллировала в полном катоде, генерируя плазму.

Тлеющий разряд зажигался между полым катодом и плоским анодом. Соотношение площадей анода и катода составляло $S_a:S_c = 1:50$. Для исследования распределения плазмы вдоль продольной оси внутри цилиндрического сеточного анода дугового разряда использовался цилиндрический зонд Ленгмюра. Для исследования распределения плотности ионного тока внутри полого катода основного несамостоятельного тлеющего разряда вдоль его продольной оси использовался плоский зонд с охранном кольцом. Электропитание тлеющего разряда осуществлялось от источника напряжения с параметрами: амплитуда напряжения (30 – 300) В, импульсный ток (1 – 550) А при среднем токе до 120 А, максимальная средняя мощность 30 кВт, частота следования импульсов (1 – 1000) Гц, коэффициент заполнения импульсов (1 – 100) %. На выходе источника питания тлеющего разряда была установлена конденсаторная батарея С емкостью 7,2 мФ. Источник питания позволяет предотвращать появление микродуг на поверхности катода. Для измерения тока тлеющего разряда и тока дугового разряда использовались датчики Холла.

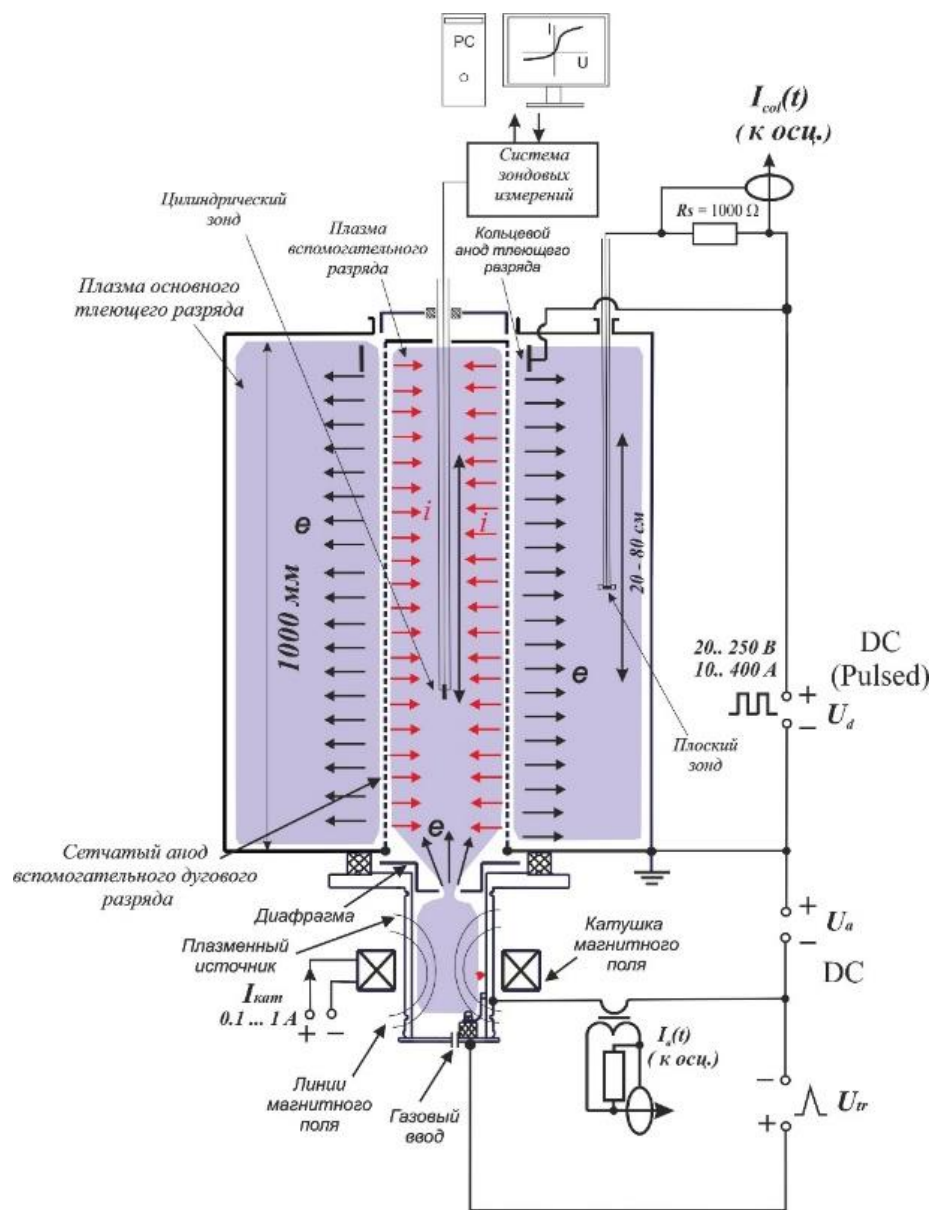


Рисунок 1. Схема экспериментального стенда для генерации пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде

Глава 3. Протяженный цилиндрический сеточный эмиттер электронов

Экспериментальный стенд (рисунок 2) предназначен для исследования процессов генерации протяженных пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде для инженерии поверхности материалов и изделий



Рисунок 2. Вакуумная камера экспериментального стенда и одиночный цилиндрический зонд

В ходе исследований использовались два протяженных сеточных анода дугового разряда длиной около 1000 мм и диаметрами 115 мм и 200 мм, боковые стенки которых были перекрыты мелкоструктурной сеткой с размерами ячейки сетки (0,4×0,4) мм. Рабочими параметрами горения вспомогательного дугового разряда, влияние которых оценивалось на продольную степень неоднородности дуговой плазмы вспомогательного разряда, являлись ток дугового разряда, давление, род газа (N_2 или Ar). На рисунке 3 приведена фотография свечения аргоновой плазмы при напряжении горения тлеющего разряда 150 В при токе вспомогательного дугового разряда 50 А в атмосфере азота. Во всех экспериментах тлеющий разряд горел в квазистационарном режиме, а ток катушки магнитного поля источника вспомогательной плазмы равнялся 0,15 А, что соответствовало величине магнитного поля на оси катушки около 4,5 мТл.

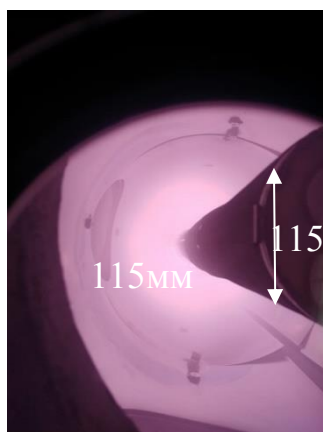


Рисунок 3. Свечение плазмы тлеющего разряда с протяженным сеточным плазменным эмиттером электронов диаметром 115 мм.

При исследовании влияния рабочего давления на степень продольной неоднородности плотности ионного тока на одиночный зонд из плазмы вспомогательного разряда в полном сеточном аноде были получены зависимости, представленные на рисунках 4 и 5. При отсутствии основного тлеющего разряда и соответственно потока ионов из плазмы основного тлеющего разряда внутрь полого анода через ячейки сетки распределение плотности ионного тока имеет неоднородный характер и максимальное значение плотности ионного тока наблюдается на входе полого анода.

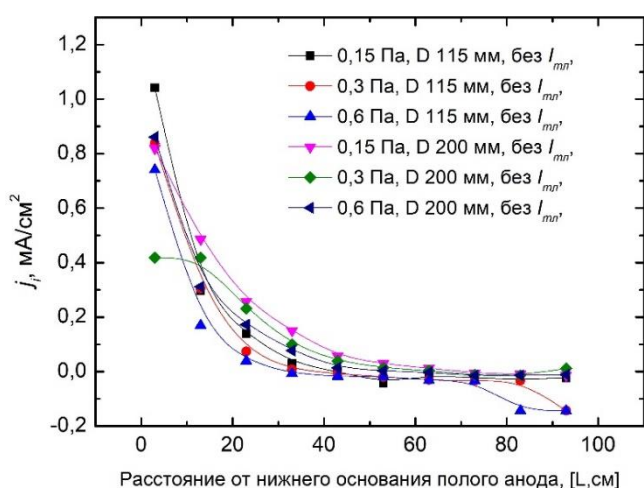


Рисунок 4. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере азота (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) без тлеющего разряда

Плотность ионного тока спадает почти до нуля на длине 50 см. Увеличение диаметра полого анода с 115 мм до 200 мм лишь незначительно снижает неоднородность плазмы по длине полого анода. Для обоих диаметров полого анода снижение рабочего давления приводит к улучшению

однородности. При зажигании тлеющего разряда с напряжением горения 150 В (рисунок 5) плазма формируется на всем протяжении полого анода, а плотность ионного тока из плазмы значительно, в 2 – 3 раза, возрастает по сравнению со случаем без тока тлеющего разряда. Минимальная неоднородность продольного распределения плотности ионного тока при токе дугового разряда 50 А достигается при диаметре 200 мм, давлении 0,15 Па и составляет около $\pm 40\%$. Для диаметра полого анода 115 мм, часть измеряемых точек, на длинах $L = 3, 23, 53$ см лежат на распределении значительно ниже соседних точек. Это связано с тем, что эти точки соответствуют положению цилиндрического зонда в областях геометрической тени по отношению к потоку ионов из плазмы тлеющего разряда, формируемой стальными кольцами (ширина около 3 см) для увеличения жесткости сеточной структуры протяженного эмиттера. То есть дополнительный поток ионов значительным образом не только улучшает продольную равномерность плазмы в полном аноде дугового разряда, но и увеличивает значения плотности ионного потока на зонд. Увеличение диаметра полого анода до 200 мм снижает влияние фактора геометрической тени и на распределениях отсутствуют минимумы плотности ионного тока.

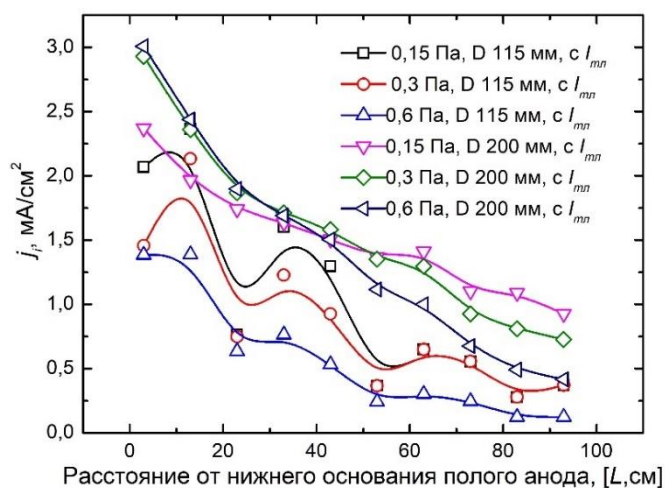


Рисунок 5. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере азота (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом

Исследования распределений плотности ионного тока в атмосфере аргона, представленные на рисунке 6, показывают ту же закономерность: при

снижении рабочего давления степень неоднородности снижается, составляя при рабочем давлении 0,15 около $\pm 25\%$.

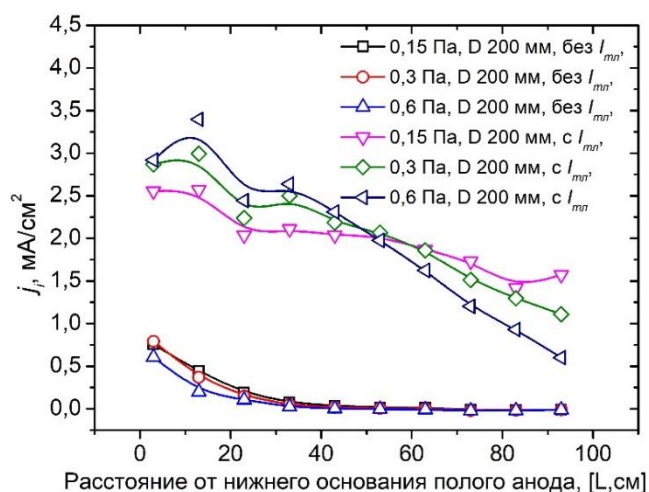


Рисунок 6. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере Ar (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом

Увеличение напряжения горения тлеющего разряда с 150 В до 200 В в азоте приводит при идентичном значении тока вспомогательного дугового разряда 50 А к пропорциональному увеличению тока тлеющего разряда и соответственно к увеличению ионного тока в эмиттер электронов через ячейки сетки. Это приводит лишь к увеличению плотности ионного тока на зонд, что и демонстрируют полученные зависимости (рисунок 7).

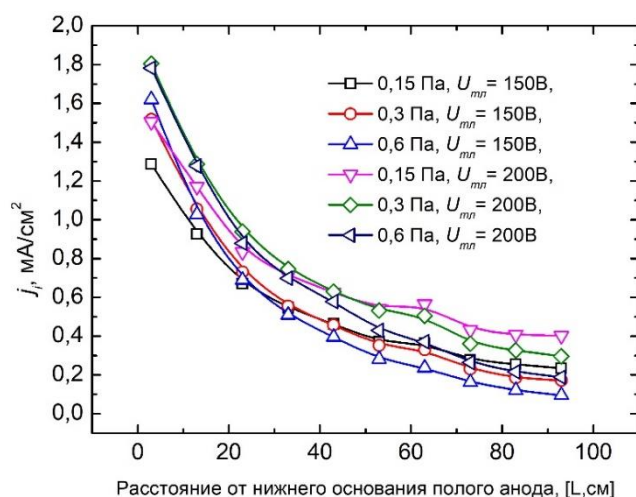


Рисунок 7. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда в атмосфере N_2 (0 см – плоскость нижнего основания полого катода) с тлеющим разрядом

При использовании смеси газов продольное распределение плотности ионного тока на зонд из-за различного сечения ионизации входящих в смесь

газов может изменяться. На рисунке 8 представлены для сравнения распределения, полученные для чистого азота, чистого аргона и смеси газов (аргон + азот). Наименьшая неоднородность наблюдается при напуске чистого аргона, а наибольшая характерна для смеси газов.

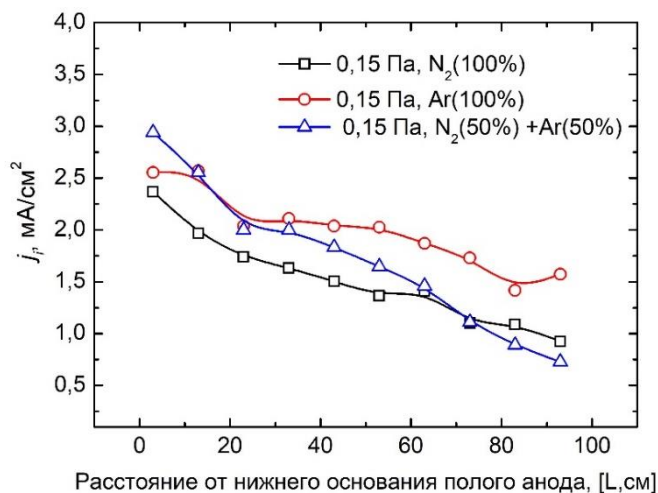


Рисунок 8. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда при токе дугового разряда 50 А, напряжении горения тлеющего разряда 150 В, диаметре полого анода дугового разряда 200 мм (0 см – плоскость нижнего основания полого катода)

Необходимо отметить, что повышение тока дугового разряда с 50 А до 100 А при напуске аргона либо азота приводит к увеличению неоднородности.

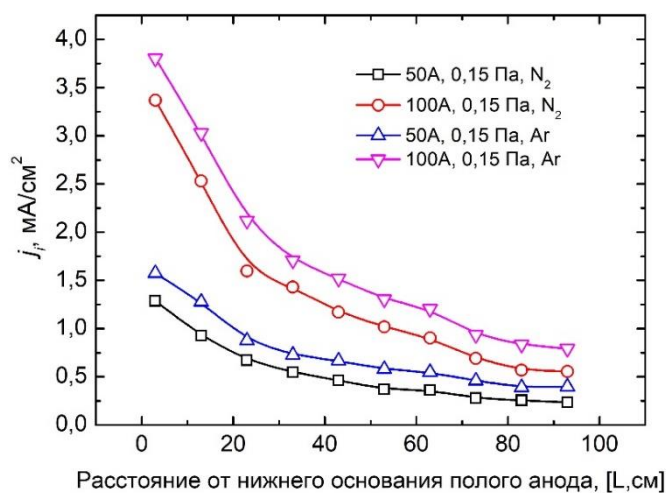


Рисунок 9. Распределения плотности ионного тока на зонд вдоль полого сеточного анода дугового разряда при напряжении горения тлеющего разряда 150 В, диаметре полого анода дугового разряда 200 мм (0 см – плоскость нижнего основания полого катода)

В основном это снижение вызвано увеличением концентрации плазмы в области малых расстояний L за счет замыкания тока дугового разряда на участки сеточного полого анода, лежащие вблизи выходной апертуры

источника дуговой плазмы. Неоднородность возрастает также в средней части полого анода.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно заключить, что система генерации протяженных пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде, в котором в качестве источника вспомогательной плазмы, из которой инжектируются электроны в тлеющий разряд, используется источник на основе дугового разряда с протяженным, длиной около 1 м, полым сеточным анодом (плазменным эмиттером электронов) позволяет получить относительно однородную плазму. Продольная степень неоднородности плотности ионного тока на зонд на длине 1 м в полном аноде при давлении 0,15 Па в атмосфере аргона составляет $\pm 25\%$, а в чистом азоте $\pm 40\%$. Показано, что увеличение диаметра цилиндрического протяженного, длиной 1 м, полого сеточного анода дугового разряда примерно в 2 раза, до 200 мм, располагающегося на оси полого катода тлеющего разряда, способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока. Снижение рабочего давления с 0,6 Па до 0,15 Па позволяет значительно, на 30 – 40 %, снизить продольную неоднородность концентрации плазмы в полном аноде. К снижению степени неоднородности приводит также увеличение напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом благодаря увеличению ионного тока, инжектируемого внутрь полого сеточного анода. Увеличение тока дугового разряда с 50 А до 100 А приводит к ухудшению степени неоднородности плотности ионного тока на зонд в полном сеточном аноде.

Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры полого протяженного сеточного анода, а также системы электропитания и управления пучково-плазменной системы в целом.

При баллистической фокусировке ионов, инжектируемых из плазмы основного тлеющего разряда, к оси цилиндрического сетчатого анода вспомогательного дугового разряда плотность тока возрастает обратно пропорционально расстоянию до оси симметрии и неоднородное

распределение концентрации плазмы определяет разные условия транспортировки инжектируемых с боковой границы ионов. В области, ограниченной сечениями $z = 0 - 50$ см (см. рисунок 5). В области II ($z = 50 - 100$ см) недостаточное количество плазменных электронов обуславливает увеличение положительного потенциала U , торможение ионов и их отражение при $W = eU$ (формирование виртуального анода).

В области I при параметрах эксперимента в результате столкновений с атомами газа ионы превращаются в быстрые нейтральные молекулы. При энергии ионов 150 – 200 эВ сечение перезарядки для молекул азота и аргона, согласно литературным данным, соответственно, $\sigma_c = 30 \times 10^{-16}$ см² и 35×10^{-16} см². При давлении (0,15 – 0,6) Па плотность молекул газа $n_g = (0,4 - 1,6) \times 10^{14}$ см⁻³, длина $\lambda_c = 1/n_g \sigma_c$ перезарядки ионов азота равна (8,3 – 2) см и аргона (7 – 1,7) см. Исходя из этого, можно оценить изменение концентрации плазмы за счет перезарядки ионов за время импульса тока разряда τ : $\Delta n_I = n_b \tau v / D$, где v – скорость иона, величина Δn_I сравнима с концентрацией плазмы в начале сетчатого анода дугового разряда вблизи источника дуги. Поэтому плазма в области I образуется в результате нейтрализации положительного объемного заряда медленных ионов, образующихся при перезарядке, нейтрализация которых происходит электронами, эмитируемыми с сетчатого анода и его боковых торцов и электронами тока из вспомогательного разряда. В области II при формировании виртуального анода ионизация газа плазменными и вторичными (за счет ионно-электронной эмиссии) электронами, ускоренными в потенциальном поле ионного пучка, является одним из основных процессов формирования пучково-плазменного образования. Время формирования ионно-пучковой плазмы и ее концентрация зависят от давления газа, плотности тока ионов и их энергии. При снижении рабочего давления уменьшается скорость ионизации газа и увеличивается длина перезарядки ионов. Это приводит к уменьшению концентрации плазмы и степени

неоднородности. В эксперименте при рабочем давлении 0,15 Па (Ar) она составляет около $\pm 25\%$. Увеличение энергии ионов (напряжения горения тлеющего разряда) приводит к пропорциональному увеличению тока тлеющего разряда и соответственно к увеличению ионного тока внутри полого сеточного анода. Это приводит к увеличению плотности плазмы, что имеет место в экспериментальных измерениях. В эксперименте с повышением тока дугового разряда с 50 А до 100 А неоднородность плазмы внутри полого сеточного анода дугового разряда увеличивается. Это объясняется увеличением концентрации плазмы вблизи выходной апертуры источника дуговой плазмы (область I). В эксперименте при увеличении диаметра цилиндрического анода с 115 мм до 200 мм увеличивается концентрация плазмы. Это связано с улучшением условий перезарядки ионов при увеличении отношения D/λ_c , а также с увеличением плотности положительного заряда в области виртуального анода. Продольная неоднородность пучково-плазменного образования определяется внешним источником дуговой плазмы и зависит от параметров внешнего ионного потока (ток ионов, их род и энергия) и полого анода (давление рабочего газа, геометрия). Полученные результаты позволяют оптимизировать размеры полого протяженного сеточного анода и управление пучково-плазменной системой в целом.

Исследования влияния величины аксиального магнитного поля в вспомогательном дуговом разряде и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы на степень неоднородности дуговой плазмы вспомогательного разряда в протяженном полом сетчатом аноде проводилось на экспериментальном стенде, представленном на рисунке 1. Поскольку основной особенностью системы генерации пучково-плазменных образований с протяженным сетчатым цилиндрическим эмиттером электронов является поток ионов из плазмы основного тлеющего разряда внутрь эмиттера, то все эксперименты проводились с основным тлеющим разрядом,

функционирующем при напряжении горения 150 В. Исследование влияния величины аксиального магнитного поля и размера выходной апертуры, образуемой диаметром отверстия в диафрагме на степень неоднородности дуговой плазмы проводилось при токе дугового разряда 50 А при следующих значениях тока катушки магнитного поля 0,2, 0,4, 0,6 А и диаметрах выходной апертуры источника дуговой плазмы – $d_1 = 44$ мм и $d_2 = 24$ мм. При токе катушки магнитного поля на оси дугового источника в середине катушки обеспечивается величина магнитного поля около 3 мТл. Измерения проводились в стационарном режиме горения дугового разряда и импульсном режиме горения тлеющего разряда для снижения тепловой нагрузки на зонды. Для этого вакуумная камера откачивалась до предельного давления 5×10^{-3} Па, а затем осуществлялся напуск рабочего газа – аргона до давления около 0,3 Па. После инициирования стационарного дугового разряда с током 50 А, зажигался импульсный тлеющий разряд с длительностью импульсов $t_i = 3,4$ мс при частоте следования импульсов $f = 40$ Гц. Измерения параметров плазмы основного и вспомогательного разряда проводилось на третьей миллисекунде разрядного импульса тлеющего разряда.

На рисунке 10а и 10б представлены распределения плотности ионного тока j_{col} на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода для разных диаметров отверстия в диафрагме источника дуговой плазмы. Использование отверстия в диафрагме диаметром 44 мм позволяет значительно, в ≈ 2 раза, снизить неоднородность концентрации плазмы в полом катоде на высоте (20 – 80) см от нижней стенки полого катода по сравнению с отверстием диаметром 24 мм. График распределения концентрации плазмы в полом сетчатом аноде дугового разряда имеет близкий к распределению плотности ионного тока в плазме тлеющего разряда характер для обоих диаметров отверстий в диафрагме при абсолютном значении концентрации плазмы $(0,25 - 1) \times 10^{11}$ см⁻³. Сравнивая распределения концентрации плазмы в полом сетчатом аноде для двух диаметров отверстия необходимо отметить, что больший диаметр выходной апертуры позволяет повысить концентрацию

плазмы в середине ($r = 60$ см) полого анода и получить максимум концентрации при среднем токе катушке магнитного поля 0,4 А, а при меньшем диаметре отверстия наблюдается более сильное контрагирование дугового разряда и максимум располагается ближе к выходной апертуре источника дуговой плазмы для $r = 38$ см. Как видно из рисунков при большем диаметре апертуры (рисунок 10в) наблюдается влияние величины магнитного поля на распределения концентрации плазмы. Изменение тока магнитной катушки приводит к изменению величины концентрации плазмы для некоторых точек распределения на 10 – 15 % (рисунок 10в). Монотонный спад распределения температуры электронов (рисунок 10д и 10е) от выходной апертуры дугового источника к противоположному основанию полого анода и абсолютные значения температуры электронов по высоте полого анода, составляющие (1,2 – 2,5) эВ, свидетельствуют о том, что для данных условий эксперимента в атмосфере аргона по всей длине полого анода распространяется плазма дугового разряда. Приведенные распределения свидетельствуют о наличии оптимальных значений как величины магнитного поля, так и диаметра выходной апертуры дугового источника, позволяющих обеспечивать наименьшую неоднородность распределения концентрации плазмы и по длине полого анода дугового разряда, и по длине полого катода тлеющего разряда.

Исследования распределения плотности ионного тока j_{col} на плоский зонд в плазме тлеющего разряда и распределений концентрации плазмы и температуры электронов вдоль оси полого анода в атмосфере азота (рисунок 11), показали, что в близких экспериментальных условиях плазма от дугового источника не достигает противоположного основания полого сетчатого анода. Об этом свидетельствуют графики распределения величины концентрации плазмы, которая уменьшается до величины около $2 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ (рисунок 11 в), обеспечиваемая, вероятно, потоком ионов из плазмы тлеющего разряда, а также наличие минимума в температуре электронов (рисунок 11 д,е) и резкий её рост с величины ≈ 1 эВ ($r \approx 60$ см) до 4 эВ ($r \approx 100$ см). При том же

токе дугового разряда и напряжении горения тлеющего разряда ток тлеющего разряда в атмосфере азота составлял ≈ 100 А

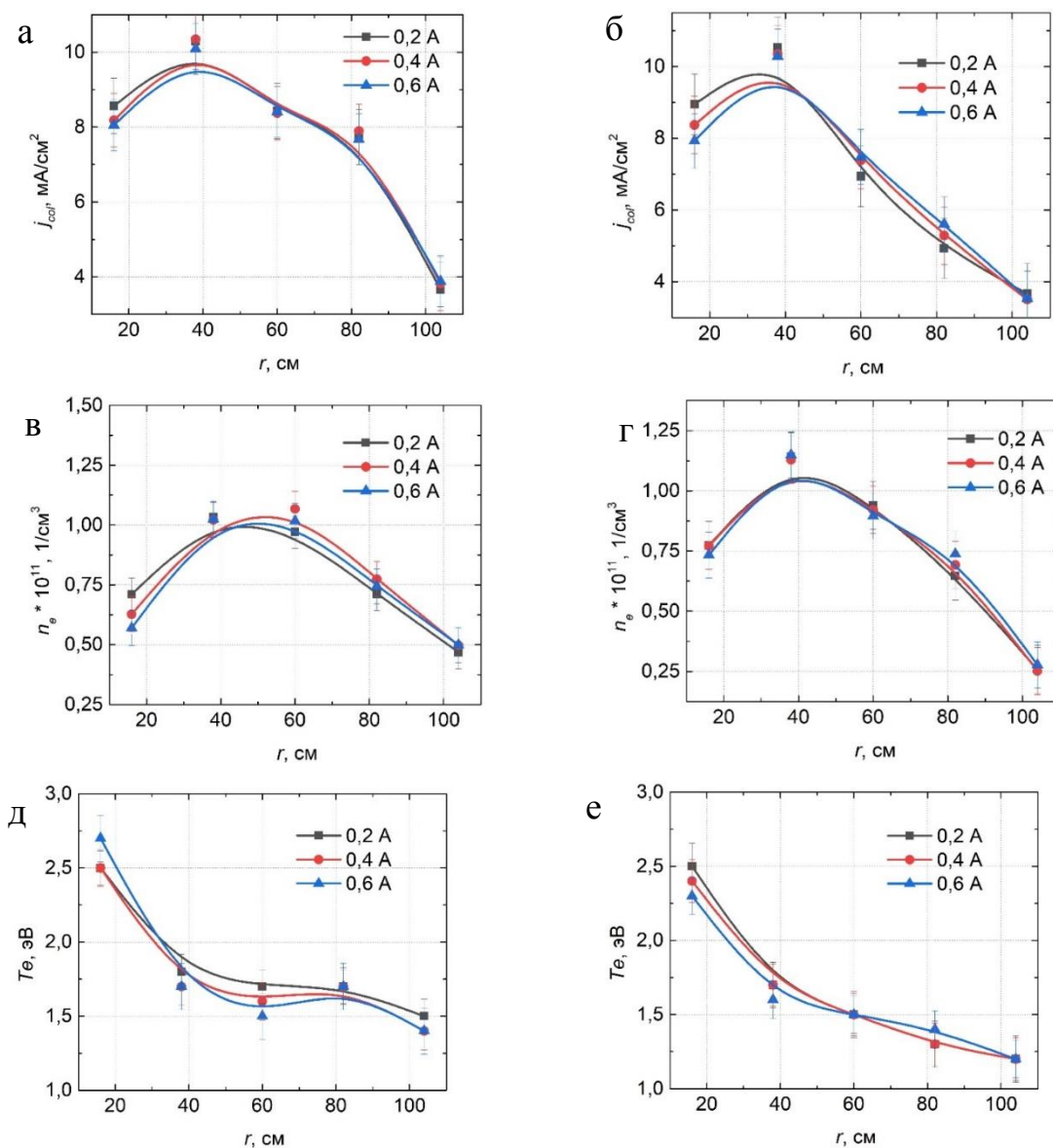


Рисунок 10. Распределения плотности ионного тока на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода (а, б), концентрации плазмы (в, г) и температуры электронов (д, е) внутри сеточного анода дугового разряда в атмосфере аргона для разных значений катушки магнитного поля при токе дугового разряда 50 А. Диаметр отверстия в диафрагме источника дуговой плазмы 44 мм (а, в, д) и 24 мм (б, г, д).

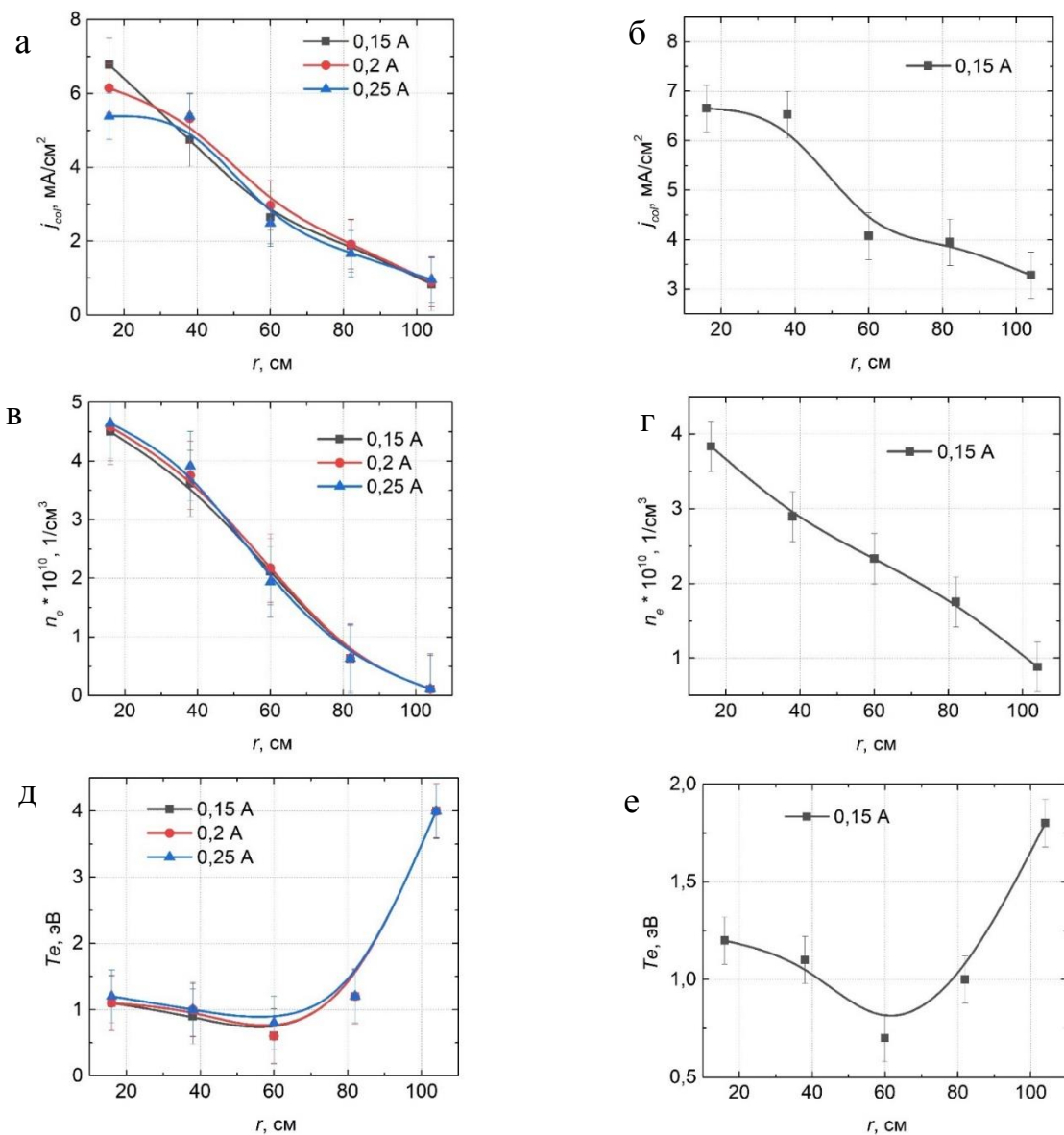


Рисунок 11. Распределения плотности ионного тока на плоский зонд в плазме тлеющего разряда вдоль оси полого катода (а, б), концентрации плазмы (в, г) и температуры электронов (д, е) внутри сеточного анода дугового разряда в атмосфере азота для разных значений катушки магнитного поля при токе дугового разряда 50 А. Диаметр отверстия в диафрагме источника дуговой плазмы 44 мм (а, в, д) при давлении $p = 1$ Па и 24 мм (б, г, д) при давлении $p = 0,3$ Па.

и был ниже в ≈ 3 раза, чем в атмосфере аргона, что и объясняет более низкие значения плотности ионного тока в тлеющем разряде, плотности ионного тока в протяженном полом аноде и концентрации дуговой плазмы. Необходимо отметить, что при работе в атмосфере азота с апертурой $d_1 = 44$ мм рабочее давление устанавливалось равным 1 Па, чтобы обеспечить стабильное горение дугового разряда при увеличении величины магнитного поля. Однако при

малой ($d_2 = 24$ мм) апертуре добиться стабильного горения разряда в атмосфере азота удалось при давлении не выше $p = 0,3$ Па. Поэтому при меньшей апертуре степень неоднородности распределения плотности ионного тока в плазме тлеющего разряда и степень неоднородности концентрации плазмы в полом аноде дугового разряда ниже в несколько раз.

Приведенные результаты говорят о том, что для исследуемой системы генерации плазмы в протяженном полом сетчатом аноде дугового разряда при одновременном горении тлеющего разряда, обеспечивающего инжекцию внутрь полого анода потока ионов, имеются оптимальные значения величины внешнего аксиального магнитного поля в источнике дуговой плазмы и диаметра выходной апертуры в нем, обеспечивающие минимальную неоднородность концентрации плазмы в протяженном (≈ 1 м) полом сетчатом аноде дугового разряда. Общей тенденцией является улучшение однородности распределения концентрации плазмы в полом протяженном сетчатом аноде при слабом контрагировании разряда. Для каждого рода газа величина магнитного поля и диаметр выходной апертуры дугового источника оптимизируются отдельно.

Таким образом, были проведены исследования влияния величины магнитного поля во вспомогательном дуговом разряде и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы на степень неоднородности дуговой плазмы вспомогательного разряда в протяженном полом сетчатом аноде. Выявлено, что характер распределения плазмы в основном пучково-плазменном образовании, формируемом в несамостоятельном тлеющем разряде, повторяет характер распределения концентрации плазмы в полом протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда. Показано, что для обеспечения минимальной неоднородности концентрации плазмы в полом аноде дугового разряда для каждого рода газа требуется подбор оптимальных значений величины аксиального магнитного поля и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы. Минимальное значение

неоднородности концентрации плазмы на длине полого анода длиной 1 м и диаметром 200 мм в атмосфере аргона составило не более $\pm 25\%$.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

Увеличение диаметра анода вспомогательного дугового разряда (протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера электронов), а так же увеличение напряжения горения несамостоятельного тлеющего разряда и снижение рабочего давления приводят к улучшению однородности распределения плазмы внутри протяжённого полого сетчатого цилиндрического анода дугового разряда, что вызвано соответственно улучшением условий удержания электронов в полом аноде дугового разряда, увеличением роли инжектируемых ионов в процессах генерации плазмы в полом аноде, улучшением продольной однородности плотности потока ионов в плазменный эмиттер.

Увеличение диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы и уменьшение величины аксиального магнитного поля магнитной катушки источника дуговой плазмы приводят к улучшению однородности распределения плазмы внутри полого сетчатого цилиндрического анода дугового разряда, что объясняется снижением степени контрагирования дугового разряда.

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов в ходе экспериментальных исследований протяженного цилиндрического сетчатого анода дугового разряда, через который производилась инжекция электронов в основной несамостоятельный тлеющий разряд, подтверждается высокой воспроизводимостью результатов измерений. Были использованы общепринятые и надёжные методы и средства измерения характеристик разрядной системы.

Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений

Разработаны, созданы и запущены в эксплуатацию экспериментальный стенд для исследования режимов горения оригинальной формы несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом объемом около 0,3 м³ протяженной формы (отношение диаметра к длине – 1:2).

Показано, что система генерации протяженных пучково-плазменных образований в несамостоятельном тлеющем разряде, в котором в качестве источника вспомогательной плазмы, из которой инжектируются электроны в тлеющий разряд, используется источник на основе дугового разряда с протяженным, длиной около 1 м, полым сеточным анодом (плазменным эмиттером электронов) позволяет получить относительно однородную плазму. Наименьшая достигнутая продольная степень неоднородности плотности ионного тока на цилиндрический зонд на длине 1 м в полном аноде в атмосфере аргона составляет $\pm 25\%$, а в атмосфере азота $\pm 40\%$.

Показано, что увеличение диаметра цилиндрического протяженного, длиной 1 м, полого сеточного анода дугового разряда способствует снижению неоднородности продольного распределения плотности ионного тока. Снижение рабочего давления, а также увеличение напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом приводит к уменьшению продольной неоднородности концентрации плазмы в полном аноде. Увеличение тока дугового разряда увеличивает степень неоднородности плотности ионного тока на зонд в полном сеточном аноде.

Выявлено, что характер распределения плазмы в основном пучково-плазменном образовании, формируемом в несамостоятельном тлеющем разряде, повторяет характер распределения концентрации плазмы в полном протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда. Показано, что для обеспечения минимальной неоднородности концентрации плазмы в полном аноде дугового разряда для каждого рода газа требуется подбор

оптимальных значений величины аксиального магнитного поля и диаметра выходной апертуры источника дуговой плазмы.

Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах

1. V.V. Denisov, Yu.N. Akhmadeev, N.N. Koval, S.S. Kovalsky, I.V. Lopatin, E.V. Ostroverkhov, N.N. Pedin, V.V. Yakovlev, and P.M. Schanin. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas 26, 123510 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5126485>

2. Ковальский С.С., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Островерхов Е.В. Протяженный цилиндрический плазменный эмиттер на основе дугового разряда низкого давления для генерации радиально расходящегося электронного пучка// Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63. № 10 (754). С. 87-94. (DOI: 10.17223/00213411/63/10/87).

3. Яковлев В.В., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Ковальский С.С., Островерхов Е.В., Егоров А.О., Савчук М.В. Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом // Изв. вузов. Физика. 2020. № 10. С. 109–116. (DOI: 10.17223/00213411/63/10/109).

Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях

1. Сильноточный несамостоятельный тлеющий разряд с инжекцией электронов из двух источников электронов // XII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», 10-12 ноября 2020, КФУ г. Казань, Россия (устный доклад Островерхов Е.В.)

2. Способ оценки распределения концентрации плазмы в объёме полого катода сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда // I Всероссийская конференция с международным участием «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (GDP NANO 2020), 02-05 декабря 2020, КФУ г. Казань, Россия (устный доклад Островерхов Е.В.)

3. E.V.Ostroverkhov, V.V. Denisov. Non-self-sustained glow discharge at currents up to several hundred amperes with electron injection from two electron sources // The 7th International Congress «Energy Fluxes and Radiation Effects» (EFRE 2020), Tomsk, Russia, September 14–26, 2020 (устный доклад Островерхов Е.В.)

4. Denisova Yu., Leonov A., Denisov V. and Ostroverkhov E. Influence of nitrogen content in the working gas mixture on the structure and properties of the nitrated surface of die steel // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, 2020, pp. 522-525, (устный доклад Denisova Yu.)

5. T. Koval, V. Denisov, N. Koval, S. Kovalsky, E. Ostroverkhov, V. Tarakanov. Generation of beam-plasma formation in a cylindrical extended hollow grid anode // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), 2020, Tomsk, Russia, pp. 666-670 (постер Т. Ковал).

Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования

- Проектирование сборки и введение в эксплуатацию экспериментально стенда.
- Проектирование и изготовление отдельных узлов электродной системы.
- Подготовка и проведение экспериментов.
- Обработка и интерпретация результатов проводилась совместно с коллегами лаборатории пучково-плазменной инженерии поверхности ИСЭ СО РАН.
- Подготовка публикаций по результатам научных исследований.
- Апробация результатов исследований на научных конференциях.

Список использованной литературы

1. А.С. Метель, А.И. Настюха О роли дополнительной ионизации газа осциллирующими электронами в области катодного падения потенциала тлеющего разряда с полым катодом// ЖТФ, Т. XIX. №12. 1976. С.1884-1889.

2. Лопатин И.В., Ковальский С.С., Ахмадеев Ю.Х., Щанин П.М., Коваль Н.Н. Самостоятельный тлеющий разряд низкого давления с полым катодом при токах в десятки ампер // Физика плазмы. - 2012. – т. 38. - № 7. – С. 639-643.

3. А.В. Визирь, Е.М. Окс, Щанин П.М., Г.Ю.Юшков // ЖТФ. 1997. Т.67. №6. С.27-31.

4. Шандриков М.В. Генераторы низкотемпературной плазмы на основе разряда низкого давления с инъекцией электронов из дугового контрагированного разряда : дис. канд. техн. наук.: 05.27.02 / Шандриков Максим Валентинович. – Томск, 2004. – 146 с.

5. Лопатин И.В., Ахмадеев Ю.Х., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Генератор плазмы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом большого объема // ПТЭ. – 2011. – № 1. – С. 151-156.

6. Гаврилов Н.В., Мамаев А.С., Чукин А.В. Азотирование нержавеющей стали в плазме импульсного электронного пучка // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, В. 9, с. 97 – 104.

7. Ю.Х. Ахмадеев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, И.В. Лопатин, П.М. Щанин, В.В. Яковлев Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади // Физика плазмы. 2017. Т. 43, №. 1. С. 7-14.

8. Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев // Письма в ЖТФ. – 2009. – т. 35. - в. 15.