

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:

**«Плазменный эмиттер на основе несамостоятельного тлеющего разряда  
низкого давления для генерации импульсных электронных пучков  
субмиллисекундной длительности»**

Направление подготовки:  
11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи

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

Аспирант



Егоров Артем Олегович

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

## Обоснование актуальности темы научного исследования

Создание на поверхности конструкционных и инструментальных материалов структур и слоёв с улучшенными свойствами методами пучково-плазменной инженерии является актуальным направлением современной науки. Финишная обработка поверхности материала или изделия позволяет увеличить твердость, коррозионную стойкость поверхностного слоя, улучшить внешний вид. Одним из перспективных способов, основанным на применении низкоэнергетических электронных пучков (до 25 - 35 кэВ), генерируемых при низком давлении ( $\sim 10^{-1}$  Па и ниже), является упрочнение поверхности за счёт сверхбыстрой закалки, полировки изделий на финальной стадии производства, восстановительного процесс благодаря снятию поверхностных напряжений, исключения микротрещин и кратеров и т.д. [1].

Одним из главных преимуществ использования низкоэнергетического электронного пучка является сниженные требования к радиационной защите, что значительно удешевляет процесс производства, снижает риски при эксплуатации и упрощает внедрение подобных систем в уже имеющееся оборудование [2]. В то же время для сохранения и увеличения плотности энергии обработки при низких ускоряющих напряжениях необходимо расширять диапазоны других параметров: длительность импульсов по времени воздействия, частота повторений и величина плотности электронного тока. Подобный широкий набор параметров с независимым управлением могут обеспечить только источники электронов на основе плазменного эмиттера [3].

Главным ограничением расширения диапазонов величины тока, длительности воздействия и площади сечения пучка является повышение частоты нарушения электрической прочности ускоряющего промежутка по ряду причин: газовыделение с коллектора и стенок, плазменно-пучковая неустойчивость, а самое главное – пространственно-временная нестационарность плазмы эмиттера, связанная с увеличением площади сечения пучка и типом разряда – дуговым [4].

Проблема генерации плазменных образований с низкой степенью пространственно-временной неоднородности может быть решена при использовании системы генерации пучково-плазменных образований (ППО), формируемых при низком давлении в больших,  $\geq 0,1 \text{ м}^3$ , вакуумных объёмах и представляющих собой плазменную среду, основные свойства которой определяются пучком энергетичных частиц, инжектируемых в электроразрядный промежуток [5], например, из вспомогательного дугового разряда с катодным пятном. Пучок электронов, эмитируемый из плазмы вспомогательного дугового разряда с током до 100 А, позволяет достигать в полуме катодного большого объёма основного тлеющего разряда низкого ( $\approx 0,1 \text{ Па}$ ) давления значения тока около 800 А при напряжении горения около 300 В [6].

Реализация плазменного эмиттера на основе несамостоятельного тлеющего разряда, в котором ток электронов замыкается на сетчатый анод тлеющего разряда, служащий одновременно эмиссионным электродом, позволит обеспечить генерацию интенсивного, несколько сотен ампер, электронного пучка с миллисекундной длительностью импульсов и сохранением высокой плотности энергии.

### **Цель научного исследования**

Разработка и создание плазменного эмиттера электронов на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и определение закономерностей и условий стабильной генерации в нём импульсных пучково-плазменных образований миллисекундной длительности при низких давлениях и токах до нескольких сотен ампер.

### **Основные задачи научного исследования**

1. Определение условий согласованной работы разных форм разрядов низкого давления для обеспечения стабильного зажигания и горения импульсного дугового разряда низкого давления с катодным пятном (первая разрядная ступень) и тлеющего разряда низкого давления с полым катодом.

2. Выявление закономерностей влияния условий генерации эмиссионных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного

тлеющего разряда низкого давления с полым катодом на однородность распределения концентрации электронов по объему полого катода.

3. Разработка, создание и исследование основных характеристик плазменного эмиттера.

## Глава 1. Литературный обзор

Как уже было описано ранее, облучение изделий (в первую очередь металлических) потоком заряженных низкоэнергетичных частиц позволяет улучшать их характеристики без изменения состава материала, из которого они сделаны. Подобное решение позволяет повысить качество изделий без значительного изменения технологического процесса или необходимости поиска более оптимальных составов исходного сырья [7-9]. В тоже время данный способ обработки способен не только увеличивать срок службы производимых изделий, но осуществлять восстановление уже отработавших изделий, исключая тем самым полную замену, что также положительно сказывается на общей эффективности потребления производимых изделий. Наличие большого количества статей по данной тематике лишь подтверждает актуальность исследования в данной сфере.

Особый интерес представляет именно электронный способ облучения изделий, поскольку позволяет решить широкий круг задач от поверхностной закалки до полировки с высокой степенью эффективности и без риска внедрения сторонних ионов в структуру обрабатываемой поверхности [1].

Ряд фундаментальных задач физического материаловедения требуют увеличение длительности импульсов воздействия в диапазоне 500 -1000 мкс с относительно высокой плотностью энергии (до  $\sim 200$  Дж/см<sup>2</sup>). Подобная совокупность параметров способствует достижения больших глубин модификации металлических материалов при исключении процессов абляции материала подложки [10].

Для решения подобных и других задач чаще всего рассматриваются следующие типы источников электронов: термокатодные, взрывоземиссионные и плазменные эмиттеры, отличающиеся диапазонами рабочих токов, стабильностью и ресурсом. Термокатодный тип эмиттеров основан на использовании в качестве источника электронов накаливаемого катода. Данный принцип хорошо изучен, но обладает рядом недостатков, которые ограничивают область их применения: низкий ресурс катода, высокая временная

инерционность, высокие затраты энергии нагрева катода, ограничение плотности тока при низких напряжения ускоряющего промежутка [11]. Взрывоэмиссионные источники электронов характеризуются высокой плотностью энергии и малыми длительностями импульсов (от наносекунд до десятков микросекунд). Сложность их применения заключается в малом диапазоне регулировки параметров пучка, сильной зависимости стабильной генерации от вакуумных условий и значительной неоднородности плотности тока, из преимуществ стоит выделить их высокую эффективность и малые габариты [11 - 13].

Наиболее перспективными в данной области применений являются источники электронов на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Они обеспечивают независимую регулировку всех основных параметров электронного пучка: энергия электронов, ток пучка, длительность импульса, частота следования импульсов [14].

Для генерации эмиссионной плазмы могут быть использованы несколько типов разрядов: дуговой и тлеющий (самостоятельный и несамостоятельный), каждый из которых хорошо изучен и представлен в литературе [15-19]. В плазменных эмиттерах с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы с использованием дуговых разрядов низкого давления в разных работах были получены электронные пучки с плотностью электронного тока от  $1,7 \text{ А/см}^2$  до  $10 \text{ А/см}^2$  [20-22] при токах электронного пучка до  $1 \text{ кА}$ , в том числе с использованием принципа сеточного управления током электронов [23,24], однако в этом случае решалась другая задача, а именно достижение минимальной длительности импульса.

Принципы генерации плазмы в таком самостоятельном тлеющем разряде описаны в ряде работ [25-28]. Расширить диапазон рабочих давлений и обеспечить независимую регулировку напряжения горения и тока тлеющего разряда позволяет внешняя инжекция электронов из плазмы вспомогательного разряда [29]. При этом ток инжектированных в плазму тлеющего разряда

электронов может значительно превышать ток электронов, получаемых за счет процессов вторичной ионно-электронной эмиссии. Благодаря этому достигаются значительные токи тлеющего разряда при сохранении той же площади полого катода и соотношения площадей анода и катода.

Подобные исследования говорят о перспективности применения несамостоятельного тлеющего разряда для генерации эмиссионной плазмы электронного пучка высокой плотности тока и энергии с возможностью расширения длительности импульса до 1 мс.

## Глава 2. Закономерности зажигания и горения вспомогательного и основного разрядов в системе на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом

В главе представлено описание экспериментального стенда на основе разрядной системы с объемом полого катода тлеющего разряда  $0,007 \text{ м}^3$ , на котором проводились исследования процессов зажигания и горения вспомогательного дугового разряда с катодным пятном и основного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Приведены результаты исследования основных характеристик тлеющего разряда и возможности достижения миллисекундной длительности разрядных импульсов.

### 2.1 Описание экспериментальной установки

Внешний вид вакуумного стенда и схема экспериментов представлены на рисунках 2.1 и 2.2.

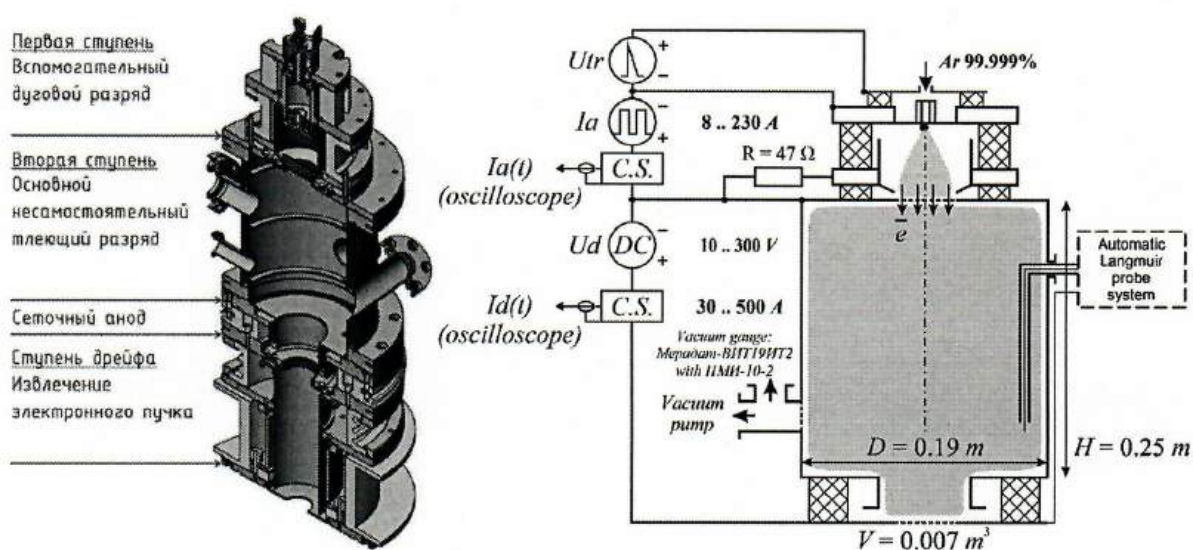


Рисунок 2.1 – вид модели стенда и схема проведения экспериментов на стенде объемом  $0,007 \text{ м}^3$

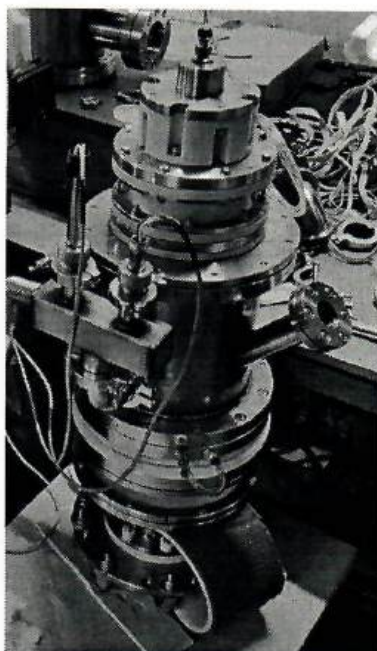


Рисунок 2.2 – внешний вид источника электронов в сборе

На основании первичных исследований несамостоятельного тлеющего разряда в большом объеме и ранних разработках источника электронов типа «СОЛО» была проектирована конструкция двухразрядной системы с полым катодом малого объема порядка  $0,007 \text{ м}^3$ .

Первая ступень представляет из себя ячейку, формирующую дуговой разряд между магниевым полым цилиндрическим катодом и сеточным анодом, который выступает в качестве эмиттера электронов для инициирования и поддержания несамостоятельного тлеющего разряда второй ступени. Анод представляет из себя кольцевой электрод, перекрытый сеткой из нержавеющей стали с размерами  $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$  (геометрическая прозрачность от 37 до 52%), диаметр эмиссионной поверхности сетчатого электрода составляет 50 мм. Вторая ступень (основная) представляет из себя полый катод цилиндрической формы с внутренним диаметром полости 186 мм, высотой 250 мм и объемом около  $0,007 \text{ м}^3$  с сетчатым анодом (эмиссионным электродом источника электронов) диаметром 50 мм, перекрытым сеткой из нержавеющей стали с размерами ячейки сетки  $0,4 \times 0,4 \text{ мм}$  (геометрическая прозрачность от 37 до 52%). Соотношение площади полого катода к площади анода составляло 100:1.

Откачка системы производилась турбомолекулярным насосом до предельного давления  $8 \cdot 10^{-3}$  Па, а рабочее давление варьировалось в диапазоне (0,05 – 0,5) Па при напуске рабочего газа аргона.

Питание тлеющего разряда осуществлялось от источника постоянного напряжения с параметрами: амплитуда напряжения  $U_d = (10 - 200)$  В, импульсный ток  $I_d = (20 - 250)$  А. Для генерации вспомогательного дугового разряда использовался импульсный источник тока с набором токоограничивающих резисторов (2, 4, 8, 16 и 32 Ом), формирующих ток  $I_a$  от 10 до 230 А, частота следования импульсов  $f =$  до 1 Гц, длительность импульсов  $t$  составляла до 1 мс. Вспомогательный импульсный источник питания высокого напряжения (поджиг) инициировал дуговой разряд.

Подача газа осуществлялась через ввод газа напрямую в источник дугового разряда, поток газа регулировался при помощи регулятора расхода газа РРГ-10.

## **2.2 Исследование влияния условий генерации плазмы в полости полого катода малого объема**

На рисунке 2.3 представлены сфазированные осциллограммы тока вспомогательного дугового разряда  $I_a$ , тока  $I_d$  и напряжения  $U_d$  несамостоятельного тлеющего разряда для разных режимов горения разрядов. Видно, что тлеющий разряд инициируется и стабильно горит при инициировании и горении вспомогательного дугового разряда. Провал напряжения в самом начале связан с искусственным ограничением скорости нарастания тока тлеющего разряда за счет использования дополнительного дросселя величиной около 10 мкГн в выходной цепи источника питания тлеющего разряда. Это необходимо для исключения перехода тлеющего разряда к дуговому. Видно, что ток тлеющего разряда имеет инерционный характер нарастания, который вызван не только наличием дросселя в выходной цепи источника питания тлеющего разряда, но также и инерционным характером процессов развития разряда и ионизации в разрядном промежутке. Характерные времена выхода в квазистационарный режим составляют на представленных

осциллограммах 3.2 около 100 мкс при значениях напряжения горения тлеющего разряда 105 В и 115 В.

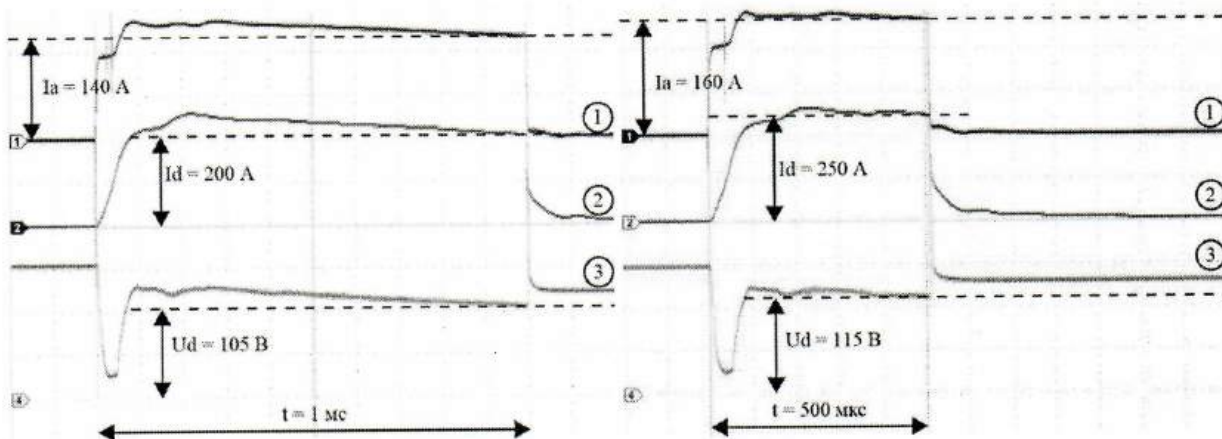


Рисунок 2.3 – Осциллограммы тока дугового разряда  $I_a$  (1), тока  $I_d$  (2) и напряжения  $U_d$  (3) несамостоятельного тлеющего разряда при давлении 0,2 Па, частоте импульсов 1 Гц

Для проведения исследований давление внутри источника устанавливалось равным 0,2 Па и не изменялось в процессе измерений параметров разряда. Длительность импульсов была фиксированной и составляла 750 мкс, измерения проводились в конце импульса (на осциллограммах – последнее пересечение пунктирной линии и линии сигнала), частота следования составляла 1 Гц.

По схожим осциллограммам и принципу измерения сигналов были проведены серии экспериментов для получения основных характеристик разрядов. На рисунке 2.4 представлены основные зависимости разрядных характеристик.

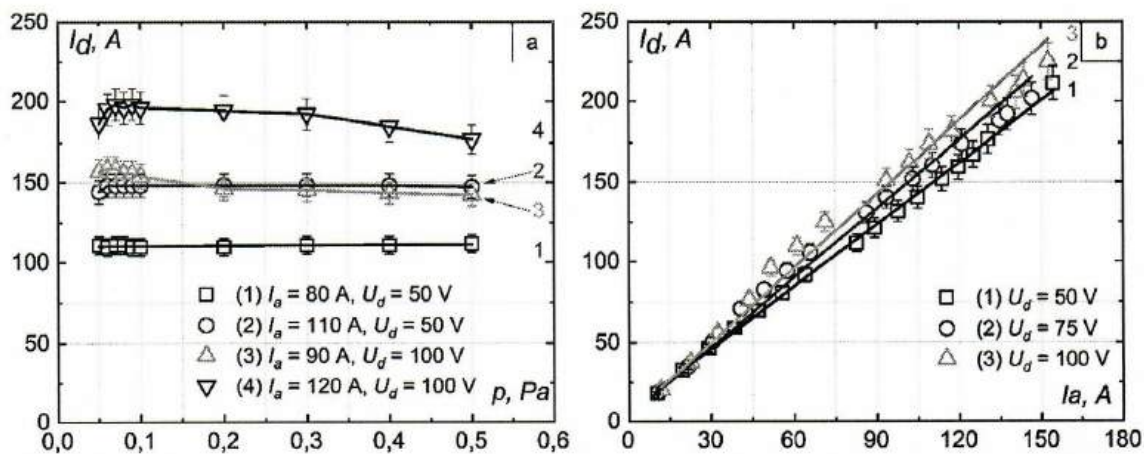


Рисунок 2.4 – а – зависимости тока тлеющего разряда от рабочего давления (Ar); б – зависимости тока тлеющего разряда от тока вспомогательного дугового разряда при  $p(\text{Ar}) = 0,2 \text{ Па}$ , частота 1 Гц, длительность импульса 750 мкс

Видно, что ток несамостоятельного тлеющего разряда слабо зависит от изменения давления в пределах от 0,05 до 0,5 Па.

**Глава 3. Закономерности влияния условий генерации эмиссионных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом на однородность распределения концентрации электронов по объему полого катода**

В главе представлены результаты исследований влияния условий генерации пучково-плазменных образований в полой катоде основного тлеющего разряда на степень неоднородности распределений концентрации заряженных частиц в них и абсолютных значений параметров плазмы.

На рисунке 3.1 представлен внешний вид, поясняющий расположение зонд в полости полого катода, и схема экспериментов.

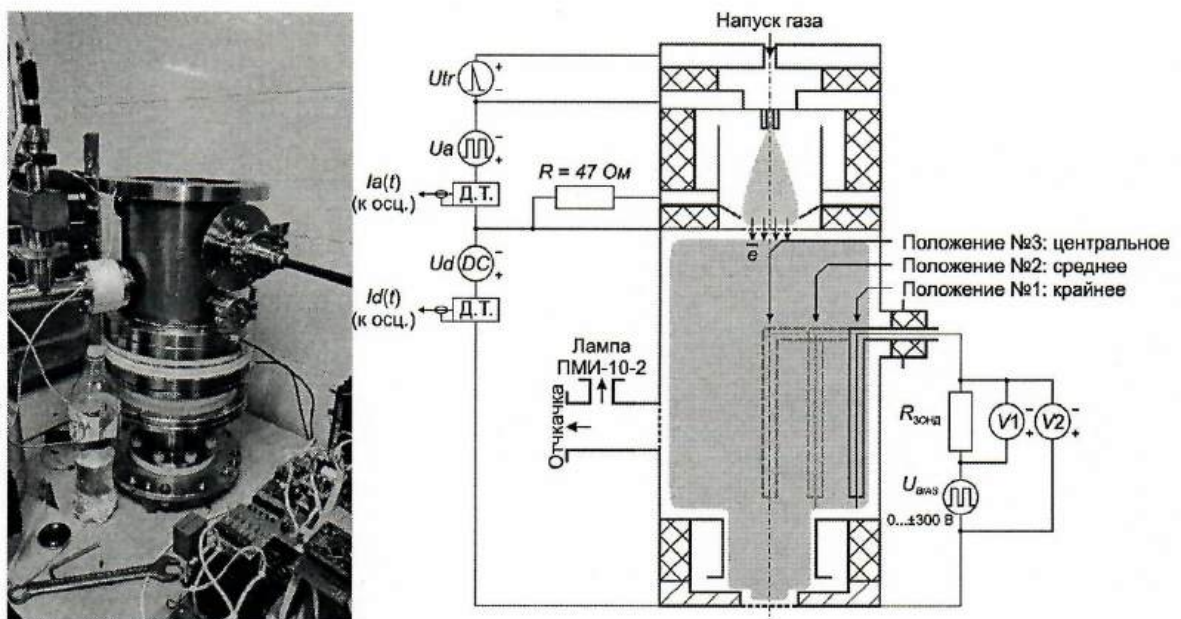


Рисунок 3.1 – расположение зонда и схема эксперимента

Поскольку система осесимметричная измерение концентрации заряженных частиц производилось в плоскости оси симметрии в 3 точках между центральной осью и поверхностью полого катода: в центре (на оси симметрии, положение №3), вблизи стенки полого катода (положение №1, радиус 75 мм) и в среднем положении между этими точками (положение №2, радиус 22 мм), согласно условному обозначению на рисунке 3.1. Суммарная площадь

поверхности открытой части зонда составила  $14,3 \text{ мм}^2$  (длина зонда – 5,5 мм, диаметр – 0,8 мм, материал – вольфрам). В каждой точке расположения зонда измерения проводились для указанных выше 4 режимов горения разрядов.

Для определения вольт-амперной характеристики на зонд подавалось импульсное потенциальное смещение через резистор  $R_{\text{зонд}} = 53,1 \text{ Ом}$ . Диапазон максимально возможного напряжения смещения в рамках текущих исследований составлял от -300 В до 300 В. Импульс смещения имел длительность 50 мкс в конце импульса формирования плазмы (импульс смещения начинался на 950й микросекунде от момента начала формирования плазмы в полой катодной трубке и заканчивался одновременно с прекращением подачи тока вспомогательного дугового разряда). При помощи осциллографа измерялись ток зонда (на резисторе  $R_{\text{зонд}}$ ) одним каналом ( $V1$  на рисунке 4.5) и напряжение зонда вторым каналом ( $V2$  на рисунке 4.5) относительно анода тлеющего разряда. Для получения одной пары значений напряжение-ток набиралась статистика от 16 до 32 импульсов формирования плазмы, после чего проводилось дополнительное усреднение за время длительности импульса потенциального смещения.

По полученным вольт-амперным характеристикам зонда были рассчитаны величина концентрации и температура электронов. Данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Концентрация и температура электронов

|   | Край<br>(положение<br>№1,<br>$r = 75 \text{ мм}$ ) | Середина<br>(положение<br>№2,<br>$r = 22 \text{ мм}$ ) | Центр<br>(положение<br>№3,<br>$r = 0 \text{ мм}$ ) | Параметры<br>источников<br>питания |
|---|--|--|--|------------------------------------|
| $T_e, \text{ эВ}$                           | 9,06   | 11,43  | 8,01   | 60 А, 50 В                         |
| $\ln(I_{e0})$                               | 0,0905   | 1,105  | 5,118  |                                    |
| Концентрация<br>электронов, $\text{м}^{-3}$ | $8,58\text{E}+15$                                  | $2,66\text{E}+16$                                      | $1,23\text{E}+18$                                  |                                    |
| $T_e, \text{ эВ}$                           | 7,92   | 14,47  | 8,27   | 120 А, 50 В                        |
| $\ln(I_{e0})$                               | 0,5455   | 1,5179   | 5,6355   |                                    |
| Концентрация<br>электронов, $\text{м}^{-3}$ | $1,26448\text{E}+16$                               | $4,5195\text{E}+16$                                    | $2,10\text{E}+18$                                  |                                    |

|   | Край<br>(положение<br>№1,<br>$r = 75$ мм) | Середина<br>(положение<br>№2,<br>$r = 22$ мм) | Центр<br>(положение<br>№3,<br>$r = 0$ мм) | Параметры<br>источников<br>питания |
|---|---|---|---|------------------------------------|
| $T_e$ , эВ                                  | 7,74                                      | 12,29   | 8,87                                      | 60 А, 100 В                        |
| $\ln(I_{e0})$                               | 0,4637                                    | 1,1335  | 4,6597                                    |                                    |
| Концентрация<br>электронов, $\text{м}^{-3}$ | 1,18E+16                                  | 2,84E+16                                      | 1,20E+18                                  |                                    |
| $T_e$ , эВ                                  | 8,55                                      | 11,44   | 9,41                                      | 120 А, 100 В                       |
| $\ln(I_{e0})$                               | 1,9005                                    | 2,109   | 6,1107                                    |                                    |
| Концентрация<br>электронов, $\text{м}^{-3}$ | 5,09E+16                                  | 7,26E+16                                      | 3,60E+18                                  |                                    |

По данным из таблицы 3.1 построены зависимости значения концентрации электронов от положения зонда, представленные на рисунке 3.2.

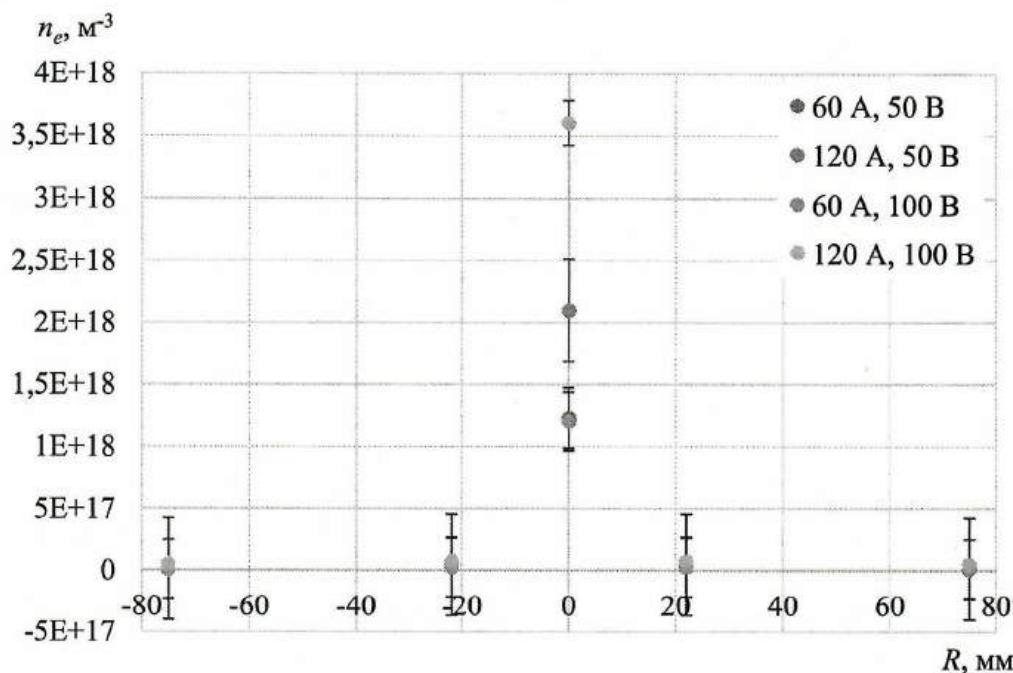


Рисунок 3.2 – Распределение концентрации электронов в полем катоде

В режимах при токе дугового разряда 60 А для двух значений напряжения тлеющего разряда 50 и 100 В концентрация плазмы близки друг другу. Разница составляет около 10%. Можно предположить, что при данном значении тока вспомогательного дугового разряда эффективность процесса генерации плазмы в полем катоде тлеющего разряда относительно низкая из-за малой

эффективности утилизации энергии первичных электронов до их ухода на сеточный анод тлеющего разряда. При токе вспомогательного дугового разряда 120 А на значение концентрации плазмы начинает сказываться влияние не только значения тока инжектированных электронов, но и, вероятно, процессы, приводящие к хаотизации потока инжектированных электронов. При увеличении тока дугового разряда концентрация увеличивается в 1,71 раза для напряжения тлеющего разряда 50 В и в 3 раза для напряжения 100 В, что говорит о повышении эффективности утилизации энергии первичных электронов в полости полого катода в процессах межчастичного взаимодействия.

Для оценки влияния условий генерации эмиссионного пучково-плазменного образования, к которым относятся ток вспомогательного дугового разряда и напряжение горения тлеющего разряда, на неравномерность распределения концентрации заряженных частиц был рассчитан коэффициент неоднородности распределения концентрации электронов для каждого из режимов. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчетов параметров плазмы

|              | Среднее значение концентрации плазмы | Максимальное значение концентрации плазмы | Коэффициент неоднородности                              | Средняя температура электронов |
|--------------|--------------------------------------|---|---|--------------------------------|
|              | $n_{\text{ср}}, \text{М}^{-3}$       | $n_{\text{макс}}, \text{М}^{-3}$          | $(n_{\text{макс}} - n_{\text{ср}}) / n_{\text{ср}}, \%$ | $T_{e \text{ ср}}, \text{эВ}$  |
| 60 А, 50 В   | 2,60E+17                             | 1,23E+18                                  | 373   | 9,5                            |
| 120 А, 50 В  | 4,43E+17                             | 2,10E+18                                  | 374   | 10,2                           |
| 60 А, 100 В  | 2,57E+17                             | 1,20E+18                                  | 369   | 9,6                            |
| 120 А, 100 В | 7,69E+17                             | 3,60E+18                                  | 368   | 9,8                            |

Относительно высокое значение температуры электронов свидетельствует об относительно малой длине пути инжектируемых электронов до ухода на сеточный анод тлеющего разряда. Требуется принять меры по увеличению длины пути электронов для увеличения эффективности утилизации энергии электронов на процессы генерации плазмы.

Таким образом, в результате исследований, что в системе генерации эмиссионного пучково-плазменного образования, формируемого в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом объемом  $7 \times 10^{-3} \text{ м}^3$  при инжекции электронов из плазмы дугового разряда низкого давления с катодным пятном при рабочем давлении  $\approx 3 \text{ Па}$  в аргоне увеличение тока вспомогательного дугового разряда с 60 до 120 А и одновременное увеличение напряжения горения тлеющего разряда с 50 до 100 В приводит к повышению концентрации заряженных частиц как на оси полого катода с  $1,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  до  $3,6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , так и кратному повышению концентрации заряженных частиц вблизи стенок полого катода.

## **Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования**

1. Плазменный эмиттер источника электронов, включающий первую ступень на основе вспомогательного дугового разряда с катодным пятном и вторую ступень на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом объемом  $0,007 \text{ м}^3$  при соотношении площадей полого катода и анода тлеющего разряда 100:1 обеспечивает стабильную генерацию эмиссионных пучково-плазменных образований в импульсно-периодическом режиме при длительности разрядных импульсов ( $50 \text{ мкс} \div 1 \text{ мс}$ ), частоте их следования 1 Гц в диапазоне рабочих давлений (Ar) ( $0,05 \div 0,5$ ) Па, с током 250 А и максимальной импульсной мощности в разряде до 30 кВт. Усиление тока первой ступени составляет ( $1 \div 2$ ) и зависит от токов первой и второй ступеней, рабочего давления и напряжения горения тлеющего разряда.

2. В плазменном эмиттере на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом объемом  $7 \times 10^{-3} \text{ м}^3$  при инжекции электронов из плазмы дугового разряда низкого давления с катодным пятном увеличение тока вспомогательного дугового разряда с 60 до 120 А и одновременное увеличение напряжения горения тлеющего разряда с 50 до 100 В приводит к повышению концентрации заряженных частиц как на оси полого катода с  $1,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  до  $3,6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , так и кратному повышению концентрации заряженных частиц вблизи стенок полого катода.

### **Обоснование достоверности полученных результатов**

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, воспроизводимостью результатов, большим объемом экспериментальных данных, полученных с помощью современных методов исследований плазменных образований, систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и методик обработки данных.

### **Обоснование новизны и научной ценности результатов исследования и научных положений**

Впервые для создания плазменного эмиттера импульсно-периодического интенсивного, до нескольких сотен ампер, электронного пучка субмиллисекундной длительности предложено использование несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом, реализовано техническое решение и исследованы основные закономерности генерации пучково-плазменных образований в созданной системе.

#### **Сведения об опубликовании результатов исследования в рецензируемых научных журналах**

1. В.В. Яковлев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, Е.В. Островерхов, А.О. Егоров, М.В. Савчук. 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).

2. С.С. Ковальский, В.В. Денисов, Е.В. Островерхов, А.О. Егоров, В.В. Яковлев. Физические особенности формирования плазмы в протяженном полом аноде импульсного несамостоятельного дугового разряда // Изв. вузов. Физика. 2022. № 1. с. 137-142.

3. Н.Н. Коваль, В.В. Денисов, В.В. Яковлев, А.О. Егоров. Исследование условий стабильного зажигания несамостоятельного тлеющего разряда при низком давлении в атмосфере воздуха // Потoki энергии и радиационные эффекты (EFRE-2022). 2022. с. 1077-1081.

#### **Патенты:**

1. Денисов В.В., Коваль Н.Н., Ратахин Н.А., Шмаков А.Н., Балаш И.И., Тересов А.Д., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Островерхов Е.В., Ковальский С.С., Назаров А.С., Савчук М.В., Егоров А.О., Яковлев В.В. Способ реализации устройства для определения с использованием синхротронного излучения влияния быстрых температурных переходов на фазовое состояние поверхности материала. Патент на изобретение RU 2848168 С1, 16.10.2025. Заявка № 2024138859 от 23.12.2024.

2. Денисов В.В., Коваль Н.Н., Ратахин Н.А., Шмаков А.Н., Тересов А.Д., Островерхов Е.В., Кавальский С.С., Игнатов Д.Ю., Денисова Ю.А., Леонов А.А., Савчук М.В., Егоров А.О., Яковлев В.В., Сыртанов М.С., Винокуров З.С., Мищенко Д.Д., Селютин А.Г. Способ реализации устройства для проведения в режиме реального времени синхротронных исследований процессов синтеза покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным напылением. Патент на изобретение RU 2833300 С1, 16.01.2025. Заявка № 2024100416 от 25.12.2023.

**Сведения о представлении результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях**

1. Генерация эмиссионного пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде // VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника», 31 июля – 6 августа 2023, Республика Бурятия, Россия (устный доклад Егоров А.О.);

2. Характеристики несамостоятельного тлеющего разряда в системе полого катода для формирования электронного пучка // V научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям (Обь-2024), 10 – 14 июля 2024, Новосибирск, Россия (устный доклад Егоров А.О.);

3. Characteristics of a pulsed non-self-sustaining glow discharge in a hollow cathode as an emitter for an electron beam // 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024), September 16 – 21, 2023, Tomsk, Russia (устный доклад Егоров А.О.);

4. Patterns of generation of emission beam-plasma formation in a hollow cathode of a non-self-sustained glow discharge // The 16th International Conference "Gas Discharge Plasma and Their Applications"(GDP-2025), Ufa, Russia, September 8–12, 2025 (устный доклад Егоров А.О.);

5. Patterns of emission plasma generation produced by non-self-sustained glow discharge in hollow cathodes of different volumes at low pressure // The 11th International Conference "Plasma physics and plasma technology"(PPPT-XI), Minsk, Belarus, September 15–19, 2025 (устный доклад Егоров А.О.).

**Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов  
научного исследования**

- Сборка и введение в эксплуатацию электропучковой установки (ЭПУ – 1) ЛППИП ИСЭ СО РАН.
- Проектирование и изготовление двухразрядной системы.
- Проектирование и изготовление систем электропитания.
- 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. Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, D.V. Zaguliaev, S.V. Konovalov, Yu.A. Rubannikova, and A.P. Semin, Prospects for the Application of Surface Treatment of Alloys by electron Beams in State-of-the-Art Technologies, Progress in Physics of Metals, 21, No. 3: 345–362 (2020).
2. Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль. Высокоинтенсивные электронные пучки: получение и применение в области материаловедения. 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом»: с. 47-48, 2011.
3. Ю.Е. Крейндель Плазменные источники электронов. - Москва: Атомиздат, 1977. - 144 с.
4. М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль и др. Пространственно-временная динамика дуги низкого давления и генерируемого пучка в источнике электронов с сеточным плазменным эмиттером. Теплофизика высоких температур, 2022, том 60, № 4, с. 488–495.
5. V. V. Denisov, Y. N. Akhmadeev, N. N. Koval et al. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas. – 2019. – Vol. 26. – P. 123510
6. В.В. Яковлев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, С.С. Ковальский, Е.В. Островерхов, А.О. Егоров, М.В. Савчук. Генерация плазмы с повышенной степенью ионизации в импульсном сильноточном тлеющем разряде низкого давления с полым катодом. Известия высших учебных заведений. Физика. 2020.
7. В.В. Березовская, Р.А. Саврай, О.В. Маслова, В.В. Овчинников, Н.В. Гущина. Влияние облучения ионами Ag<sup>+</sup> на процесс замедленного разрушения мартенситно-стареющей стали. Физика металлов и металловедение, 2020, Т. 121, № 3, стр. 330-336.
8. А.И. Иванова, Д.О. Вахрушева, О.С. Корнева и др. Исследование высокоинтенсивной имплантации ионов титана в кремний в условиях энергетического воздействия пучка на поверхность. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2024, № 10, с. 74 – 79.

9. Елисеева, Е. П. Электронно-лучевая модификация поверхности алюминоматричного композиционного материала / Е. П. Елисеева, А. П. Слива, Е. В. Терентьев // Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС : сборник статей VI Международной научно-технической конференции "Минские научные чтения - 2023", Минск, 6-8 декабря 2023 г. : в 3 т. - Минск : БГТУ, 2023. - Т. 2. - с. 125 - 131.
10. Ozur G.E. et al. // Instruments and Experimental Techniques. – 2005. – V. 48. – Is.6 – P.753-760.
11. J. R. Bayless et al. // IEEE J. Quantum Electron. – QE-10(2). – 1974.– V. 213. – p.213-218.
12. Engelko, V.I., Mueller G. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41. – Is. 10. – P. 2769-2773.
13. Engelko, V.I. et al. // Vacuum. – 2001. – V. 62. – Is. 2-3. – P. 211-216.
14. N. N. Koval, S. V. Grigoryev, V. N. Devyatkov, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009. – V.37. – № 10. – p.1890–1896.
15. J. R. Bayless // RSI. – 1975. – V.46. – №9. 1158-1160
16. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
17. Метель А.С. // ПТЭ. –1987. –№1. – С.120.
18. П.М. Щанин, Н.Н. Коваль, В.С. Толкачёв, В.И. Гушенец // Изв. вузов. Физика. -2000. – №5. – с. 92-96.
19. Е.М. Oks, P.M. Schanin // Phys. Plasmas. – 1999. – V.6. – №5. – p.1649 – 1654.
20. S. W. A. Gielkens et al. // RSI. – 1996. – V.67. – p. 2449 -2452.
21. V.I. Gushenets, N.N. Koval', P.M. Shchanin // Sil'notochnaya elektronika: Materialy VI Vsesoyuznogo simp. — Tomsk, Institut sil'notochnoy elektroniki SO RAN. 1986. - chast' 2. - S. 112
22. Gushenets V.I., Koval' N.N., Shchanin P.M. // Pis'ma v Zhurn. tekhn. fiziki. - 1990. - T. 16, vyp. 8. -S. 12-16.

23. V.I. Gushenets, P.M. Shchanin // *Izv. vuzov. Fizika.* -2001. – №9. – s. 57 - 62.
24. Goebel D.M. et al. // *RSI.* – 1993. – V.64. – №8. – p. 2312 – 2319.
25. А.С. Метель, А.И. Настюха // *ЖТФ*, Т. XIX. №12. 1976. С.1884-1889.
26. А.С. Метель // *ЖТФ.* – Т. 54. – №2. – 1984. – С.241-247.
27. А. С. Метель, С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, В. В. Панин // *Физика плазмы.* – 2009. – Т. 35. – № 12. – С.1140 – 1149.
28. Лопатин И.В., Ковальский С.С., Ахмадеев Ю.Х., Щанин П.М., Коваль Н.Н. // *Физика плазмы.* – 2012. – т. 38. – № 7. – С. 639-643.
29. А.В. Визирь, Е.М. Окс, Щанин П.М., Г.Ю.Юшков // *ЖТФ.* 1997. Т.67. №6. С.27-31.
30. Ковальский, С.С. Автоматизированная система зондовых измерений параметров плазмы разрядов низкого давления / С.С. Ковальский, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, И.В. Лопатин // *Изв. вуз. Физика.* – 2014. – Т.57. – №11-3. – с. 78 – 81.