

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Москвин Павел Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНЫХ  
ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ  
КАТОДОМ НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Специальность 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Воробьев М.С.

Томск – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Методы и подходы увеличения основных параметров источников электронов с плазменным катодом.....	11
1.1. Развитие подходов преодоления физических ограничений для генерации интенсивных пучков электронов.....	11
1.2. Электрическая прочность ускоряющего промежутка плазменного источника электронов.....	15
1.3. Выводы .....	18
Глава 2. Методика эксперимента.....	19
2.1. Описание экспериментального стенда .....	19
2.2. Системы электропитания плазменного катода.....	22
2.3. Методика измерения профиля электронного пучка.....	24
2.3.1. Калориметрические измерения плотности энергии электронного пучка .....	24
2.3.2. Измерения радиального распределения плотности тока разряда вблизи анода плазменного эмиттера.....	25
2.4. Проведение зондовых измерений параметров плазмы дугового разряда.....	26
2.4.1. Плоский зонд .....	28
2.4.2. Накаленный зонд.....	29
2.4.3. Двойной зонд .....	32
2.5. Погрешность измерений .....	37
2.6. Выводы .....	38
Глава 3. Характеристики дугового разряда низкого давления и эмиссионной плазмы в плазменном катоде .....	40
3.1. Характеристики дугового разряда низкого давления .....	40
3.2. Динамика радиальной неоднородности катодной плазмы.....	43
3.3. Извлечение электронов из плазменного эмиттера .....	48
3.4. Оценка коэффициента извлечения электронов из сеточного плазменного эмиттера .....	50

3.5. Влияние потока ускоренных ионов из анодной плазмы на потенциал плазмы дугового разряда.....	55
3.6. Выводы .....	62
Глава 4. Способы повышения стабильности генерации интенсивного электронного пучка .....	63
4.1. Изменение скорости роста тока разряда .....	63
4.2. Удлинение и поворот канала транспортировки пучка.....	65
4.3. Формирование дополнительного плазменного анода.....	80
4.4. Влияние дополнительной анодной плазмы на генерацию пучка электронов .....	90
4.5. Новые возможности использования источников электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления .....	95
4.6. Выводы .....	100
Заключение .....	102
Список используемой литературы .....	105
Приложения .....	114

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

Источники интенсивных электронных пучков используют для исследований воздействия концентрированных потоков энергии на неорганические материалы, в частности для постоянного [1–3] или импульсного [4–7] нагрева и плавления поверхности сталей и сплавов с целью улучшения её свойств. Пучки электронов имеют сравнительно невысокий коэффициент отражения даже от полированной металлической поверхности, составляющий от единиц до десятков процентов и зависящий, прежде всего, от атомного номера бомбардируемого металла [8]. При этом, импульсные источники электронов обеспечивают высокие скорости нагрева поверхности металлических и металлокерамических изделий  $\sim 10^8$  К/с [9, 10], что выгодно отличает их от стационарных пучков с точки зрения эффектов модификации этой поверхности.

Отдельное место занимают плазменные источники электронов (ПИЭЛ) [11–15], с помощью которых было неоднократно продемонстрировано, что электронно-пучковое воздействие на металлические и металлокерамические материалы позволяет улучшить трибологические, прочностные и эксплуатационные свойства изделий: уменьшить шероховатость поверхности, снизить коэффициент сухого трения и скорость износа, увеличить микротвердость поверхности, коррозионную стойкость, усталостную долговечность [5, 16]. Контролируемое изменение свойств поверхности изделия без необходимости модификации его объема и создание таким образом новых материалов является энерго- и ресурсосберегающим подходом, что соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития РФ в части перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, новым материалам и способам конструирования. При этом воздействие интенсивным пучком электронов может применяться как самостоятельная технология улучшения материалов, так и в совокупности с другими технологиями [5 с. 255-300, 17]. Кратное улучшение свойств в ходе многостадийной технологической обработки обеспечивает растущий интерес к данной тематике с перспективой внедрения в производство получаемых научных результатов.

Промышленное применение любого оборудования, в том числе источника электронов накладывает особые требования на воспроизводимость результата и стабильность работы. Импульсные источники электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной/слоевой стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом с открытой границей плазмы не являются исключением. Однако, отличаясь уникальным диапазоном параметров генерируемого электронного пучка и уникальными технологическими возможностями, такие источники демонстрируют удовлетворительную повторяемость параметров пучка только в установившихся режимах работы [18], которые, как правило,

реализуются после предварительной тренировки ускоряющего промежутка. Длительность тренировки тем больше, чем ближе параметры пучка к предельным значениям, ограниченным электрическим пробоем ускоряющего промежутка. Обработка поверхности изделий значительной площади электронным пучком подразумевает перемещение области воздействия и перерывы в работе источника электронов для позиционирования, выполнения иных технологических операций, что тоже провоцирует возникновение пробоев. В свою очередь, непредсказуемое появление и развитие пробоя в любой момент импульса генерации пучка может приводить к неконтролируемому изменению свойств обрабатываемой поверхности, что ограничивает внедрение импульсных плазменных источников электронов для модификации поверхности материалов и изделий на производстве. Так, повышение стабильности генерации электронного пучка и увеличение электрической прочности ускоряющего промежутка, заключающиеся в снижении количества/вероятности его электрических пробоев, является необходимым условием развития электронно-пучковых методов обработки материалов.

В настоящей работе под стабильностью генерации пучков электронов будем понимать долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов.

**Цель работы** состояла в поиске методов повышения стабильности генерации широкоапертурного (десятки-сотни см<sup>2</sup>) электронного пучка в импульсных источниках с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления со стабилизированной катодной и открытой анодной поверхностью плазмы для уменьшения доли импульсов с неконтролируемыми параметрами от общего числа импульсов и расширения предельных параметров источника электронов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать метод ослабления негативного влияния динамики радиального распределения плотности тока плазменного катода на стабильность работы источника электронов;
2. Разработать метод ослабления влияния коллекторной плазмы на стабильность работы источника электронов;
3. Разработать способ создания плазменного анода до начала генерации электронного пучка для повышения его стабильности на начальной стадии формирования.

**Научная новизна:**

1. Выявлено существенное различие в распределении плотности анодного тока в осесимметричной разрядной ячейке плазменного эмиттера электронов на основе дугового

разряда низкого давления на начальном этапе формирования разряда и в установившемся режиме его горения.

2. Предложен и реализован способ оценки коэффициента извлечения электронов из плазменного катода при наличии тока ионов в ускоряющем промежутке, основанный на анализе срезов импульсов тока разряда и тока ускоряющего промежутка. Метод не требует определения эффективного коэффициента вторичной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода.

3. Предложено решение, обеспечивающее увеличение доли импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов плазменного источника на основе дугового разряда низкого давления, заключающееся в отклонении электронного пучка (на 90 градусов) от оси источника электронов и увеличении длины трубы дрейфа пучка.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложенные и применённые в диссертационной работе способы повышения стабильности генерации интенсивного электронного пучка по отдельности и в сочетании применимы для любого импульсного источника электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы с оговоренными ограничениями эффективности способа, зависящими от условий генерации пучка.

2. Для источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы создан генератор плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях для формирования вспомогательного плазменного анода, расширяющий диапазон рабочих давлений источника и кратно увеличивающий долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для модификации поверхности изделий с целью улучшения ее функциональных и/или эксплуатационных характеристик, недостижимых или сложно реализуемых с использованием альтернативных способов модификации поверхности.

4. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные могут быть использованы для теоретических расчётов процессов генерации и транспортировки пучков электронов.

#### **Методология и методы исследования**

Основным методом исследования в настоящей работе являлся физический эксперимент, в ходе которого осуществлялось:

1. Измерение параметров катодной и анодной плазмы источника электронов зондовыми методами с использованием плоского, накалённого и двойного зондов;

2. Осциллографирование токов основных цепей источника электронов и напряжений на электродах источника электронов, определение доли импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка, от общего числа импульсов и времени возникновения пробоя от начала импульса в зависимости от условий генерации и транспортировки пучка;

3. Измерение распределения плотности энергии пучка электронов калориметрическим методом;

4. Регистрация радиального распределения тока на анод разрядной ячейки плазменного катода и его динамики.

Оценка частоты возникновения пробоев ускоряющего промежутка источника электронов проводилась путем статистического анализа осциллограмм токов основных электрических цепей, в ходе которого производился расчёт доверительных интервалов по методу Уилсона.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. В импульсном источнике электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда и плазменным анодом увеличение фронта тока разряда до времени установления стационарного распределения плотности его тока обеспечивает кратное снижение частоты возникновения пробоев ускоряющего промежутка электронного источника. Например, при воздействии импульсным электронным пучком амплитудой 200 А, длительностью импульса 100 мкс при ускоряющем напряжении 17 кВ и давлении рабочего газа – аргона 40 мПа на поверхность стали 12Х18Н10Т увеличение фронта тока разряда с 1,5 мкс до 30 мкс обеспечивает снижение доли импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка, с 25% до 8%.

2. Увеличение расстояния от высоковольтного эмиссионного электрода до мишени либо использование системы поворота электронного пучка в источнике с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы позволяютратно повысить амплитуду тока пучка электронов и его энергию в стабильном режиме работы, а также увеличить долю импульсов, сгенерированных без возникновения электрических пробоев ускоряющего промежутка источника электронов.

3. Предварительная генерация плазмы в пространстве дрейфа источника электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с концентрацией на порядок меньшей концентрации плазмы, генерируемой самим электронным пучком,кратно снижает долю импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов. В частности, генерация плазмы с концентрацией  $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  за 1 мс до генерации интенсивного электронного пучка при воздействии на молибденовую мишень с током в ускоряющем

промежутке амплитудой 400 А, длительностью импульса 15 мкс, ускоряющем напряжении 14 кВ и давлении аргона 65 мПа снижает частоту возникновения пробоев с примерно 20% до 2%.

### **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, а также применением современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (EFRE-2014, EFRE-2016, EFRE-2018, EFRE-2020, EFRE-2022) (г. Томск, Россия, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022), Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (г. Улан-Удэ, Россия, 2015), Всероссийской научной школе для молодежи «Проблемы и приложения электроразрядной обработки в индустрии наносистем и наноматериалов» (г. Петрозаводск, Россия, 2009), Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020) (г. Казань, Россия, 2020), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, Россия, 2019), Научно-техническом Семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Объ-2024» (г. Новосибирск, Россия, 2024), Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (г. Томск, Россия, 2015, 2019; г. Екатеринбург, Россия, 2021).

### **Публикации**

Результаты исследований автора, относящиеся к теме диссертации, изложены в 12 работах, из которых: 4 – статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, индексируемых в Web of Science и Scopus [48, 88, 92, 93] (из них 1 статья в журнале, входящем в 1-й квартиль [93]); 4 публикации – в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций [69, 71, 84, 94]; 2 статьи – в иных научных журналах [91, 95]; 2 патента [72, 90].

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в модернизации экспериментальной установки для проведения экспериментов, выборе их методик, проведении исследований, анализе и обобщении их результатов. Постановка цели и задач осуществлялась научным руководителем д.т.н. М.С. Воробьевым с регулярными консультациями проф., д.т.н. Н.Н. Коваля при участии автора

работы. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и совместно с научным руководителем даны рекомендации по дальнейшим направлениям исследований. Обсуждения задач исследований, методов их решения и результатов анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации совместных работах.

### **Внедрение результатов и предложения по их использованию**

Предполагается использовать полученные результаты для повышения стабильности генерации электронного пучка с воспроизводимыми параметрами, пригодными для его использования как в научных, так и технологических целях для решения прикладных задач по увеличению износостойкости пар трения, узлов машин и механизмов для предприятий нефтегазовой, авиакосмической, энергетической, атомной, медицинской отраслей и смежных областей, а также на инструментальных участках машиностроительных производств за счёт улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств поверхности, модифицированной электронным пучком.

Разработанные в результате выполнения работы технические решения защищены патентами РФ [72, 90]. Источники электронов с улучшенными в ходе выполнения работы характеристиками были использованы для обработки изделий из стали 20 с целью увеличения микротвёрдости поверхности и уменьшения параметра износа, а также для финишной полировки внешней и внутренней поверхности коронарных стентов, что подтверждено актом внедрения.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 117 страниц. В работе насчитывается 63 рисунка, 13 таблиц и 97 наименований в списке литературы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, степень её разработанности, обозначены цель и задачи работы, приведены защищаемые научные положения, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ имеющихся в настоящее время низкоэнергетических источников электронов с эмиттерами различных типов. Рассмотрены основные процессы, дестабилизирующие работу источников электронов.

Сделан вывод о перспективности источников электронов с плазменными катодами на основе дугового разряда низкого давления, обеспечивающих токи субкилоамперного уровня, широкоапертурных интенсивных электронных пучков субмиллисекундной длительности. Определены основные направления исследований и задачи, ориентированные на повышение

стабильности генерации и расширение диапазона параметров генерируемого интенсивного электронного пучка в таких системах.

**Во второй главе** представлено подробное описание источника электронов «СОЛО» с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и плазменным анодом с открытой границей. Описаны методики и техника эксперимента с представлением схем созданных систем измерения и электропитания плазменного катода. Рассмотрены особенности измерения параметров катодной и анодной плазмы зондовым методом, проведения калориметрии электронного пучка, измерения распределения его плотности энергии и распределения тока по сечению плазменного катода.

**В третьей главе** описаны особенности работы плазменного катода источника электронов: представлены вольт-амперные характеристики в разных условиях работы, приведены результаты измерения параметров плазмы при извлечении электронов и в его отсутствии, исследована динамика радиального распределения тока дугового разряда плазменного катода, а также исследовано влияние концентрации анодной пучковой плазмы и потока ускоренных ионов в область катодной разрядной ячейки на потенциал катодной плазмы в зависимости от условий генерации.

**Четвертая глава** посвящена способам повышения стабильности генерации пучка электронов, выражающейся в увеличении доли импульсов без пробоя ускоряющего промежутка от общего их числа и/или увеличении предельных параметров генерируемого пучка. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния на предельные параметры электронного пучка длины пространства дрейфа пучка электронов, поворота канала транспортировки. Представлено устройство для генерации дополнительной анодной плазмы в пространстве дрейфа пучка, обеспечивающее в настоящий момент минимальное рабочее давление функционирования источника электронов, а также рассмотрено влияние этой дополнительной плазмы на стабильность генерации интенсивного субмиллисекундного электронного пучка и электрическую прочность ускоряющего промежутка. Исследована закономерность появления пробоя ускоряющего промежутка от фронта импульса тока дугового разряда плазменного катода. В устойчивых режимах генерации электронного пучка продемонстрированы результаты применения источника электронов для алитирования поверхности стали.

**В заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований, обсуждаются перспективы использования плазменных источников электронов, выражены благодарности.

## ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

### *1.1. Развитие подходов преодоления физических ограничений для генерации интенсивных пучков электронов*

Мощные (от единиц кВт средней мощности) серийные источники электронов применяются в основном для сварки в вакууме [19, 20], в аддитивном производстве металлических изделий [21, 22], в т.ч. для электронно-лучевой наплавки [23, 24] и для испарения мишеней в технологических установках нанесения покрытий EB PVD – методом [25, 26]. Высокая мощность постоянного пучка электронов требует особого подхода к конструированию источников электронов [14], прежде всего обусловленного изменением газовых и температурных условий для генерации электронного пучка. Традиционно применяют термокатодные источники, например [27], и источники с плазменным анодом на основе высоковольтного тлеющего разряда [14, 28]. Однако по мере совершенствования источников электронов расширяется и область применения мощных пучков. Например, внедряется электронно-пучковая полировка поверхности [29]. Во многих случаях электронно-пучковая обработка не требует нагрева всего объема обрабатываемого материала, а увеличить мощность воздействия можно переходом в импульсно-периодический режим работы с большим импульсным, но относительно невысоким средним током и, соответственно, высокой импульсной (сотни киловатт и более) и низкой средней мощностью пучка. Благодаря усилиям научных групп под руководством Н.Н. Ковалёва, Г.Е. Озура, В.И. Энгелько, Е.М. Окса и др. к настоящему моменту создано множество источников электронов различных типов, существенно отличающихся по параметрам, а путём перехода от металлических и оксидных катодов к плазменным катодам стала доступна обработка даже в форвакуумной области давлений [30].

Полировка поверхности широкими импульсными электронными пучками стала одним из основных направлений использования источников электронов, в частности источников электронов с плазменными катодами [4, 31]. Извлечение электронов из плазменного катода в таких источниках не требует преодоления существенной работы выхода [32, 33], как в металлическом, оксидном и любом даже самом эффективном термокатоде, а количество электронов определяется величиной тока разряда, амплитуда которого, если говорить об источниках электронов с плазменными катодами на основе дугового разряда, за последние 30 лет была увеличена на порядок и достигает сотен ампер. При этом ток эмиссии может быть почти равен току разряда плазменного катода [34] и при достаточном извлекающем потенциале ограничен лишь скоростью наработки частиц, а в случае формирования плазменного анода даже превышать ток разряда за счёт ионно-электронной эмиссии [35, 18].

Плазменный анод в случае открытой границы плазмы позволяет сформировать в источнике электронов ускоряющий зазор, ширина которого устанавливается самосогласованно с ускоряющим потенциалом. Тем самым, при достаточной концентрации анодной плазмы максимальный ток пучка электронов в таком источнике не будет напрямую зависеть от ускоряющего напряжения, что выгодно отличает источники электронов с плазменным анодом от вакуумных, где плотность тока ограничена законом Чайлда-Ленгмюра [36].

Транспортировка пучка электронов в вакууме ограничена пространственным зарядом. При наложении продольного магнитного поля, препятствующего кулоновскому расталкиванию, предельный ток однородного цилиндрического пучка будет ограничен неустойчивостью Бурсиана [37, 38], т.е. образованием виртуального катода. Преодолеть этот порог позволила транспортировка в плазме, благодаря которой происходит частичная или полная компенсация пространственного заряда пучка. Теоретический предельный ток в этом случае определяется порогом неустойчивости Пирса, который на практике имеет меньшее значение, чем предсказывает теория [39]. Избыточная концентрация плазмы по отношению к концентрации электронов пучка позволяет на порядки увеличить пороговый ток [40]. Тем не менее, возможно образование виртуального катода, если ток пучка превышает хаотический ток электронов анодной плазмы. Для случая, когда ведущее продольное магнитное поле многократно меньше собственного магнитного поля электронного пучка наблюдается сжатие пучка, и максимальный ток ограничен током Альфвена. Таким образом, увеличить параметры пучка электронов позволяет изменение условий его транспортировки, и источники электронов с плазменным катодом и анодом, где транспортировка пучка осуществляется во внешнем продольном магнитном поле, представляются наиболее перспективными для получения больших токов электронов на коллекторе.

Близкие к теоретическим пределам параметры пучка демонстрируют источники электронов на основе взрывной эмиссии [7]. Рекордные плотности мощности позволяют уникальным образом вводить энергию в поверхностный слой материала, полировать тугоплавкие металлы и материалы с высоким коэффициентом теплопроводности при плотностях энергии пучка, составляющих (10–15) Дж/см<sup>2</sup>.

В ряде случаев требуется, чтобы скорость нагрева и остывания поверхности не превышала определённый порог. Например, это актуально для предотвращения трещинообразования на керамических материалах, твёрдых сплавах [41]. Источники электронов на основе тлеющего разряда [42] хорошо подходят для решения задач импульсной обработки с длительностями воздействия от десятков микросекунд. Ток пучка электронов в таких источниках ограничен током разряда, который может достигать сотен ампер, но требуется принятие особых мер, препятствующих самопроизвольному переходу разряда в дуговую форму [42], в том числе за счёт

увеличения объёма разрядной камеры плазменного катода, повышения давления плазмообразующего газа или использования несамостоятельных форм горения разряда [43 – 45].

Особенности дугового разряда позволяют создавать компактные разрядные ячейки для генерации плазмы в плазменном катоде импульсного источника электронов. Напряжение горения дугового разряда существенно меньше, чем тлеющего, что снижает требования к выходной мощности системы электропитания, упрощает конструкцию и уменьшает массогабариты разрядной ячейки, которая в подавляющем большинстве случаев допускает пассивное охлаждение. Переходные процессы в дуговом разряде протекают относительно быстро (единицы-десятки микросекунд), что позволяет формировать последовательность импульсов тока эмиссии с частотой десятки килогерц, не прибегая к управляющим сеткам, а просто включая-выключая ток разряда [46, 47]. Экспериментально продемонстрировано, что плазменный катод на основе дугового разряда позволяет плавно и в широких пределах регулировать ток эмиссии внутри импульса субмиллисекундной длительности [48, 49].

Задавать форму и положение эмитирующей границы в плазменном эмиттере электронов можно, подбирая концентрацию эмиссионной плазмы, ускоряющее напряжение и размер эмиссионных отверстий [50, 51], однако такой подход ограничивает диапазон рабочих параметров источника электронов. Предельным случаем такого подхода можно считать использование для задания положения эмиссионной границы металлической сетки с размером ячейки, меньше или равной двойной ширине прианодного слоя разряда эмиттера [15]. В этом случае, реализуется слоевая (или для обозначения конструктивных особенностей – сеточная) стабилизация границы эмиссионной плазмы, при которой эмиссия электронов из плазмы приводит к росту прианодного падения потенциала, а концентрация плазмы и температура электронов остаются практически неизменными [52, 53].

Однако максимальная плотность тока эмиссии электронов прямо пропорциональна концентрации катодной плазмы, ведь плотность тока эмиссии, если электроны в плазме термализованы, не превышает хаотическую плотность тока электронов:

$$j_x = en_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}}, \quad (1.1)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов катодной плазмы,  $T_e$  – температура электронов (в Кельвинах),  $k$ ,  $e$  и  $m$  – постоянная Больцмана, заряд и масса электрона, соответственно. Целенаправленное увеличение тока пучка при прочих равных условиях должно неизбежно сопровождаться уменьшением ширины присеточного слоя, которая определяется законом Чайлда-Ленгмюра:

$$j_{ChL} = \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2e \varepsilon_0 \varphi_{пл}^{3/2}}{M_i l_i^2}}, \quad (1.2)$$

где  $M_i$  – масса иона плазмообразующего газа,  $\varphi_{\text{пл}}$  – потенциал плазмы относительно сетки,  $l_i$  – ширина присеточного слоя.

Чтобы оценить ионный ток на сетку воспользуемся выражением для плотности ионного тока насыщения для плоского коллектора в виде

$$j_i = 0,4en_i \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}}, \quad (1.3)$$

где  $n_i$  – концентрация ионов катодной плазмы. Оценить ширину присеточного слоя в случае отрицательного анодного падения можно приравняв плотность ионного тока на секту и  $j_{\text{чЛ}}$  [15].

Легко видеть, что  $l_e \sim \varphi_{\text{пл}}^{3/4} / \sqrt{n_e}$ . Пусть  $n_i \approx n_e = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 7 \text{ эВ}$ ,  $\varphi_{\text{пл}} = -45 \text{ В}$ , тогда  $2l_e \approx 0,12 \text{ мм}$ .

Если концентрацию плазмы увеличить до  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , то для стабилизации эмиссионной границы придётся выбрать сетку с ячейкой менее 100 мкм. Тонкий прутки такой сетки легче повредить при дугообразовании. Кроме этого, в ходе длительной эксплуатации сетка может утончаться за счёт ионного травления. Таким образом, существует некоторый минимальный размер ячейки эмиссионной сетки, меньше которого использовать её технически нецелесообразно из-за недостаточного срока службы. В этом случае, возможен экстенсивный подход – увеличить диаметр эмиссионного окна, что позволит при сохранении максимальной плотности тока эмиссии получить больший ток пучка. Однако в ряде случаев увеличить размер эмиссионного окна возможно лишь глубоко переработав конструкцию источника электронов. Другая возможная ситуация – простое увеличение диаметра эмиссионной сетки не приведёт к существенному росту тока эмиссии из-за неоднородности распределения концентрации плазмы за пределами изначального эмиссионного отверстия.

Использование сеточной стабилизации границы катодной плазмы в совокупности с открытой анодной плазменной границей даёт возможность изменять ток пучка и энергию ускоренных электронов более чем на порядок величины со сравнительно слабой зависимостью основных параметров пучка друг от друга (энергия электронов, ток пучка, длительность и частота следования импульсов). Это выгодно отличает источники с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом, которые позволяют создавать оборудование с широкими непрерывными диапазонами рабочих параметров, особенно востребованное для решения поисковых задач. В работах [54, 55] продемонстрировано увеличение максимальной энергии пучка в источнике электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда после перехода от многоапертурной электродной системы (условия вакуумного диода) к сеточному электроду с формированием плазменного анода (условия плазмонаполненного диода).

На практике плазмонаполненные источники электронов редко приближаются к вышеобозначенным теоретическим пределам. Предельные параметры, как правило,

ограничивает дугообразование на электродах источника и электрическая прочность ускоряющего промежутка. В таком случае, важную роль играет состояние поверхности электродов, а пути её улучшения – кондиционирование или ионная очистка.

Интересные результаты получены в работе [56], где отмечалось уменьшение вероятности электрического пробоя ускоряющего зазора при инжекции пучка в плазмонеполненный канал транспортировки с концентрацией плазмы, превышающей концентрацию электронов пучка.

Так, можно заключить, что переход от вакуумных к плазменным источникам электронов позволил кратно увеличить максимальный ток пучка и перейти к импульсно-периодическому режиму работы. Эмиссионная способность плазменного катода физически ограничена током разряда катода и границами сеточной стабилизации – повышение плотности тока эмиссии требует использования более мелкой сетки. Увеличить плотность тока пучка при необходимости можно экстенсивно за счёт увеличения площади эмиссии и последующей фокусировки. Транспортировка сгенерированного пучка электронов до коллектора, диагностического оборудования или области воздействия на обрабатываемый материал, осуществляемая в плазме и ведущем магнитном поле, позволяет сдвигать порог неустойчивости пучка, что даёт возможность использовать широкий (сечением единицы и десятки квадратных сантиметров) пучок электронов с высокой (десятки  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) плотностью тока.

### *1.2. Электрическая прочность ускоряющего промежутка плазменного источника электронов*

В источнике электронов с плазменным катодом и плазменным анодом под увеличением электрической прочности ускоряющего промежутка здесь и далее будем понимать совокупность мер, приводящих к уменьшению вероятности его электрического пробоя без изменения геометрии и материалов электродной системы при неизменных параметрах пучка или приводящих к расширению предельных, ограниченных пробоем, параметров: мощности, энергии, тока пучка. Электрическую прочность ускоряющего промежутка определяют общие для вакуумных и плазменных приборов факторы, связанные с состоянием поверхности: шероховатостью и микровыступами, адсорбированным газом, наличием загрязнений в виде неметаллических плёнок или включений. Кроме этого, имеются специфические факторы, ограничивающие электрическую прочность ускоряющего зазора, связанные с потоком ионов на отрицательные высоковольтные электроды, движением границ катодной и анодной плазмы и другими процессами, связанными с этими факторами. С целью повышения электрической прочности проводят кондиционирование электродов в тлеющем разряде в гелии или азоте при давлении (0,4–4) кПа, плотности тока  $\approx 2,5 \text{ A}/\text{m}^2$ ; постоянным током в форвакууме (10–100 мПа) при напряжении  $\sim 20 \text{ кВ}$ ; предпробойными токами или высоковольтными пробоями [57].

Наиболее часто в электровакуумных приборах и плазменных источниках электронов применяется именно последний способ. Тренировка пробойными токами приводит к балансу между удалением имеющихся центров возникновения пробоя и созданием новых. Режимы оптимизируют путём подбора энергии, вкладываемой в единичный импульс тока пробоя, длительности и частоты следования импульсов.

В плазмонаполненных приборах в процессе тренировки на состояние высоковольтных электродов существенное влияние оказывает плазма и потоки частиц из неё, вызывающие десорбцию газов, ионное травление оксидных плёнок и диссоциацию окислов. Уменьшения загрязнения высоковольтных электродов добиваются оптимизацией конструкции разрядной системы. Дуговой разряд для генерации плазмы подразумевает эрозию катода. Материал катода подбирается так, чтобы на нём стабильно зажигалась и функционировала дуга. Обычно это магниевые или алюминиевые сплавы. Испарённый материал катода, конденсируясь на электродах источника электронов, увеличивает вероятность возникновения электрических пробоев. Существует ряд конструктивных мер, уменьшающих осаждение продуктов эрозии на электроды. Во-первых, избегают прямой видимости катода со стороны высоковольтного электрода. Это достигается, например, расположением оси генератора плазмы вдоль плоскости отбора электронов. Метод хорошо себя зарекомендовал в ускорителях электронов без ведущего магнитного поля. Генераторы плазмы, например, разрядные ячейки на основе пробоя по поверхности диэлектрика, располагают за пределами проекции эмиссионного окна перпендикулярно его плоскости. Осесимметричные конструкции источников электронов, которые могут работать в ведущем магнитном поле, дополняют диафрагмами, перекрывающими поток эрозионной плазмы.

Снижения загрязнений высоковольтного электрода плазменного источника электронов также можно добиться, если использовать дуговой контрагированный разряд. Такие источники в меньшей степени зависимы от локализации катодного пятна и в меньшей степени подвержены контракции разряда до отдельных плазменных каналов, чем источники на основе открытой дуги. Как развитие такого подхода, существуют конструктивные решения, сочетающие контрагирование разряда и частичную рекуперацию испарённого материала. Такое возможно, если испарённый материал вновь оседает на катод, как это происходит в контрагированном разряде с полым катодом и полым анодом, но здесь катод выполняют трубчатым, и приняты меры для стабилизации движения катодного пятна на внутренней поверхности этой трубки, в результате остальные электроды меньше (медленнее) загрязняются, и сам катод играет роль контрагирующего канала.

Кондиционирование высоковольтных электродов плазменных источников электронов производят постепенно, увеличивая параметры пучка, например, повышая ток разряда,

ускоряющее напряжение, ток в ускоряющем промежутке или др. При этом, не требуется контроля пробивного напряжения или снятия токовых характеристик для определения коэффициента усиления напряженности электрического поля: критерием окончания кондиционирования, как правило, является отсутствие электрических пробоев в заявленных режимах работы источника электронов или иного плазмонаполненного прибора. Стоит, однако, отметить, что кондиционирование высоковольтного промежутка источника электронов при энергии в импульсе пробоя много больше 1 Дж может, как улучшить состояние поверхности, так и привести к деструкции поверхности электрода.

Ширину ускоряющего зазора плазмонаполненного диода можно оценить, опираясь на измеренную величину ионного тока с границы анодной плазмы либо рассчитать, исходя из параметров этой плазмы, воспользовавшись выражением (1.3) и законом Чайлда-Ленгмюра в его исходной форме [58, 59].

Так, для источника электронов с энергией 25 кэВ, при давлении газа в области ускоряющего зазора 0,1 Па, даже если будут созданы условия для полной ионизации рабочего газа, напряженность электрического поля составит  $\sim 10^7$  В/м. Такая электрическая прочность достижима методами кондиционирования и не является принципиальным ограничением для плазменных источников электронов, работающих в импульсном режиме.

В работе [60] рассмотрены ещё два варианта пробоя характерных для плазменных источников: зажигание тлеющего разряда в ускоряющем зазоре и переключение разряда, формирующего плазменный катод, с анода разрядной ячейки на ускоряющий электрод. Второй случай для открытой границы катодной плазмы можно рассматривать как нарушение условий существования ее устойчивой границы, а в случае слоевой (в случае использования мелкоструктурных сеток называемую «сеточной») стабилизации – как нарушение условий стабилизации тока пучка, которые были рассмотрены в работе [61]. Обычно увеличение параметров генерируемого электронного пучка: как энергии, так и плотности тока, сопровождаются уменьшением размера ячейки эмиссионной сетки, однако такой подход не может являться универсальным и имеет ограничения из-за высокой тепловой нагрузки на эмиссионную сетку, обусловленной бомбардировкой ускоренными ионами, в результате чего сетка может выйти из строя. Кроме этого, диапазон рабочих параметров ПИЭЛ выбирают, опираясь на известные теоретические и практические работы, но ряд параметров пучка подвержен динамическому изменению в процессе работы или при возникновении неблагоприятных факторов (например, изменение давления и рода газа в течение импульса генерации пучка как результат десорбции или плавления мишени). Поэтому создание ПИЭЛ с высокой электрической прочностью ускоряющего промежутка – многофакторная, нетривиальная задача.

### *1.3. Выводы*

Генерирование интенсивного пучка электронов для прикладных и исследовательских целей сопряжено с решением ряда физических и технических задач. Научные задачи, связанные с исследованием влияния концентрированных потоков энергии, в том числе для улучшения свойств материалов, могут с успехом решаться плазменными источниками электронов благодаря достигнутой на сегодня плотности мощности пучка и широкому диапазону её изменения. Однако научные задачи не ограничены одним этим приложением, а область применения пучков электронов расширяется по мере совершенствования электронно-пучкового оборудования и расширения параметров. Технологические применения источников электронов накладывают особые требования на стабильность работы, которая, как правило, уменьшается по мере приближения к предельным параметрам. Кроме того, увеличение производительности может потребовать увеличения мощности пучка для сохранения той же плотности мощности на большей площади обработки. Продуманная конструкция плазменного катода источника электронов, препятствующая загрязнению высоковольтных электродов продуктами эрозии катода, оптимальная организация рабочего давления во всех областях источника электронов, слоевая стабилизация границы эмиссионной плазмы, транспортировка пучка в плазме в магнитном поле позволили на порядки увеличить максимальный ток ПИЭЛ за несколько последних десятилетий.

Несмотря на известные меры, направленные на улучшение условий генерации и транспортировки, максимальные параметры генерируемого пучка электронов зачастую ограничиваются пробоем ускоряющего промежутка и не достигают теоретического предела. Поэтому существует очевидная необходимость в улучшении электрической прочности ускоряющего промежутка, которая будет выражаться в уменьшении вероятности его пробоя и увеличении предельных параметров, таких, как импульсная мощность или энергия, приносимая за импульс на коллектор. Для этого, в рамках выполнения работы требуется: 1) разработать метод ослабления негативного влияния динамики радиального распределения плотности тока плазменного катода на стабильность работы источника электронов; 2) разработать метод ослабления влияния коллекторной плазмы на стабильность работы источника электронов; 3) разработать способ создания плазменного анода до начала генерации электронного пучка для повышения его стабильности на начальной стадии формирования.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Описание экспериментального стенда

Эксперименты по генерации интенсивного субмиллисекундного электронного пучка проводились с использованием экспериментального стенда, выполненного на базе импульсного источника электронов «СОЛО» [62–67], который был разработан в ИСЭ СО РАН и который активно используется в экспериментах по модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов концентрированным потоком энергии в ИСЭ СО РАН, ИФМ СО РАН, Шеньчженьском университете (Китай), в бизнес-пространстве для улучшения эксплуатационных свойств металлических изделий (ITAC Ltd (Япония)). Источник имеет плазменный эмиттер на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, плазменный анод, граница которого открыта и подвижна, генерирует низкоэнергетический (до 25 кэВ) интенсивный (с током сотни ампер) субмиллисекундный электронный пучок длительностью от 20 до 250 мкс с диаметром на коллекторе (10–40) мм.

Схема электронного источника показана на рис. 2.1. Будем считать его стандартным или исходным. Между электродом 2, помещенным в поле постоянных магнитов 1, и цилиндрическим магниевым катодом 3 с внутренним диаметром 8 мм и длиной 50 мм под действием импульса напряжения величиной (12–15) кВ зажигается инициирующий (поджигающий) разряд. Ток инициирующего разряда имел амплитуду (6–10) А при длительности импульса 60 мкс. Основной дуговой разряд с регулируемой длительностью и током горит между катодом 3 и анодами 4 – 7. Анодная вставка 5 с внутренним диаметром 84 мм, длиной 86 мм, электрически соединённая с анодом 7 дугового разряда через токоограничительное сопротивление  $R_{HA}$ , необходима для облегчения условий зажигания дугового разряда и крепления дополнительного перераспределяющего электрода 4, имеющего с ней электрический контакт. Электрод 4 используется для выравнивания распределения плотности эмиссионного тока. В настоящей работе он имел форму диска диаметром 15 мм. Постоянное ускоряющее напряжение прикладывается между эмиссионным электродом 7, содержащем эмиссионную сетку 6 с ячейкой 0,18×0,18 мм или 0,3×0,3 мм диаметром 40 мм и извлекающим электродом 8, выполненным в виде диафрагмы диаметром 80 мм. Непосредственно за извлекающим электродом установлена труба дрейфа длиной 20 см внутренним диаметром 80 мм. Извлекающий электрод 8, труба дрейфа 9, и коллектор 11 находятся под потенциалом «земли». Отбор электронов из эмиссионной плазмы осуществляется через ячейки эмиссионной сетки 6 первоначально под действием электрического поля, создаваемого электродами 7 и 8, а после образования анодной (пучковой) плазмы, ускорение электронов происходит в двойном слое между границами катодной

(эмиссионной) и анодной (пучковой) плазмы. При этом, граница катодной плазмы стабилизируется сеткой, а анодная плазма, которая создается самим электронным пучком в пространстве его дрейфа, имеет подвижную (открытую) границу, которая устанавливается согласно закону «степени 3/2» для двойного слоя.

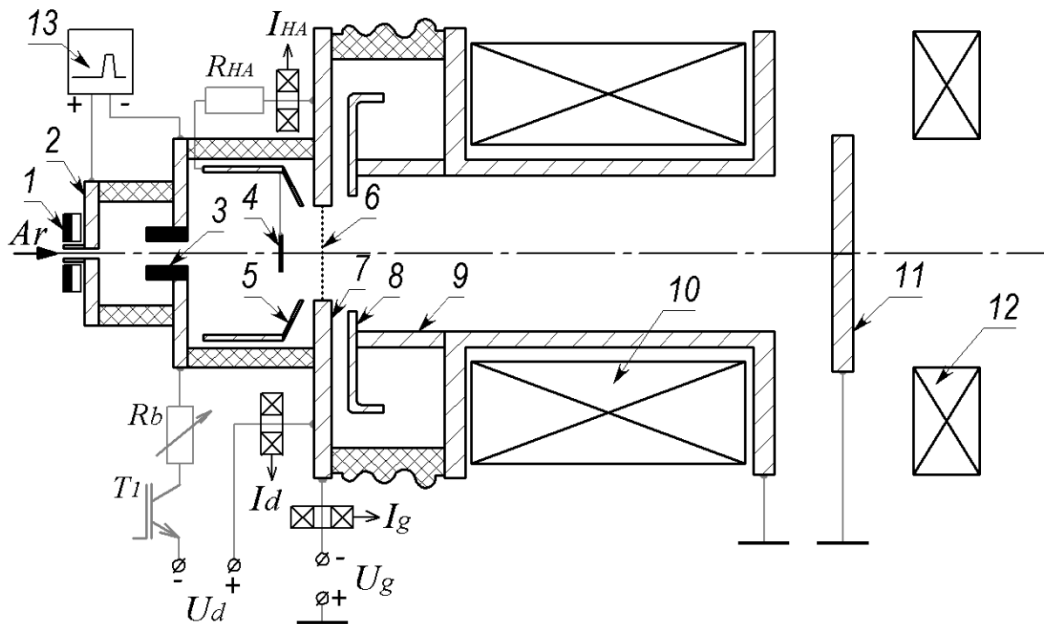


Рисунок 2.1 – Схема источника электронов [88]. 1 – постоянные магниты, 2 – анод вспомогательного разряда, 3 – трубчатый катод, 4 – перераспределяющий электрод, 5 – анодная вставка, 6 – эмиссионная сетка, 7 – ускоряющий электрод, 8 – извлекающий электрод, 9 – труба дрейфа, 10 – «верхняя» катушка магнитного поля, 11 – коллектор, 12 – «нижняя» катушка магнитного поля, 13 – источник питания вспомогательного разряда.

Ускоренные электроны транспортируются к коллектору на расстояние (300–800) мм в магнитном поле катушек 10 и 12 без существенных потерь в условиях компенсации объемного заряда пучка ионами анодной плазмы [68, 69]. Величина ведущего магнитного поля варьируется в диапазоне (30–100) мТл. Амплитуда и длительность импульса тока пучка задаются соответствующими параметрами основного дугового разряда. В качестве рабочего газа используется аргон. Изменение давления в экспериментах осуществлялось за счёт изменения скорости натекания газа в разрядную систему источника электронов через электрод 2 при постоянной скорости откачки. Давление газа в рабочей камере варьируется в диапазоне (6–80) мПа, при этом давление газа в основной разрядной ячейке плазменного катода в (7–10) раз выше. В качестве датчиков для измерения импульсных токов использовались пояса Роговского.

Источник электронов генерирует пучок с током (20–400) А, длительностью импульса (20–250) мкс, энергией электронов (5–25) кэВ.

Большинство исследований было выполнено на экспериментальном вакуумном стенде, представленном на рис. 2.2а. Назовём его «Стенд 1».

В состав экспериментального стенда входит источник электронов «СОЛО», вакуумная камера диаметром 75 см, длиной 75 см, вакуумная система, система напуска газа, система водяного охлаждения, блоки электропитания и автоматики.



(а)



(б)

Рисунок 2.2 – Фотографии экспериментальных стендов: а – стенд 1, б – стенд 2.

Откачка вакуумной камеры до остаточного давления  $\sim 10^{-4}$  Па производится насосами АВЗ-20Д производительностью 20 л/ч при давлении от атмосферного до 0,26 кПа и ТМН-500 производительностью (по осушенному воздуху) 500 л/с в диапазоне давлений  $(1,33 \times 10^{-3} - 6,65 \times 10^{-6})$  Па. Измерение давления в вакуумной камере осуществляется широкодиапазонными датчиками Granville-Phillips Micro-Ion Plus и Balzers TPS251A. Напуск рабочего газа в вакуумную камеру до необходимого давления производится регулятором расхода газа РРГ-10 через источник электронов. Подача газа от регулятора к источнику электронов происходит по полиэтиленовой трубке, заполненной кварцевым песком.

Вакуумная камера содержит водоохлаждаемый подвижный вакуумный ввод Вильсона для крепления мишени или калориметров, вакуумные электрические разъемы для подключения калориметров и другого диагностического оборудования, смотровые окна. Источник электронов устанавливается на вакуумную камеру горизонтально. В целях электробезопасности конденсаторная батарея, источник электронов и блоки питания под высоким ускоряющим потенциалом расположены за защитным ограждением. Управление вакуумной системой,

системой напуска газа, блоками электропитания осуществляется системой автоматизации на базе промышленного контроллера Advantech ADAM-3000 или вручную.

Работы по исследованию воздействия пучка электронов на поверхность материала выполнены на другой экспериментальной установке (Рисунок 2.2б). Назовём ее «Стенд 2». Основное отличие Стенда 1 от Стенда 2 в том, что последний оснащен двухкоординатным водоохлаждаемым столом-манипулятором. Автоматизированная установка «Стенд 2» имеет размеры вакуумной камеры  $600 \times 500 \times 400$  мм. Манипулятор позволяет осуществлять перемещение области воздействия пучка в горизонтальной плоскости в пределах квадрата  $200 \times 200$  мм.

Вакуумная камера откачивается посредством пластинчато-роторного насоса 2НВР-5ДМ со скоростью откачки 5,5 л/ч при давлении от атмосферного до 0,26 кПа и турбомолекулярного насоса ТМН-500. Для контроля за вакуумом в установке используются цифровые вакуумметры на основе термопарных вакуумных преобразователей ПМТ-2 (вакуумметр Инситек АТВ-2.1) и ионизационных ПМИ-51 (Инситек АИВ-51.1), включенные в состав системы управления. Для обеспечения напуска рабочего газа и регулировки его давления используется газовый натекатель РРГ-10.

Источник электронов «СОЛО» устанавливается вертикально на фланец в верхней части вакуумной камеры. Благодаря широкому диапазону рабочих параметров этот источник электронов является удобным инструментом для научных исследований. В составе комплекса УНУ «УНИКУУМ» Стенд 2 входит в перечень уникальных научных установок научно-технологической инфраструктуры Российской Федерации.

## *2.2. Системы электропитания плазменного катода*

В работе использовались два варианта построения схемы электропитания основного разряда плазменного эмиттера «СОЛО»: 1) разрядка емкостного накопителя через разделительный высоковольтный трансформатор [70]; 2) разрядка емкостного накопителя на разрядную ячейку через набор балластных сопротивлений с возможностью изменения сопротивления в течение импульса [71, 72].

В первом варианте питание поджигающего и основного разряда осуществляется от вторичных обмоток импульсных разделительных трансформаторов (Рисунок 2.3). Регулировка длительности основного разряда и, соответственно, длительности импульса электронного пучка производится с помощью транзисторного ключа ТК1. Максимальная длительность импульса ограничена характеристиками импульсного разделительного трансформатора. Блок электропитания позволяет изменять длительность импульса в диапазоне (20–200) мкс с дискретностью 1 мкс. Регулирование тока разряда осуществляется путем изменения напряжения

ёмкостного накопителя  $C1$  и величины балластного сопротивления  $PБ1$ , если ток переходит между диапазонами регулирования (20–250) А и (251–500) А.

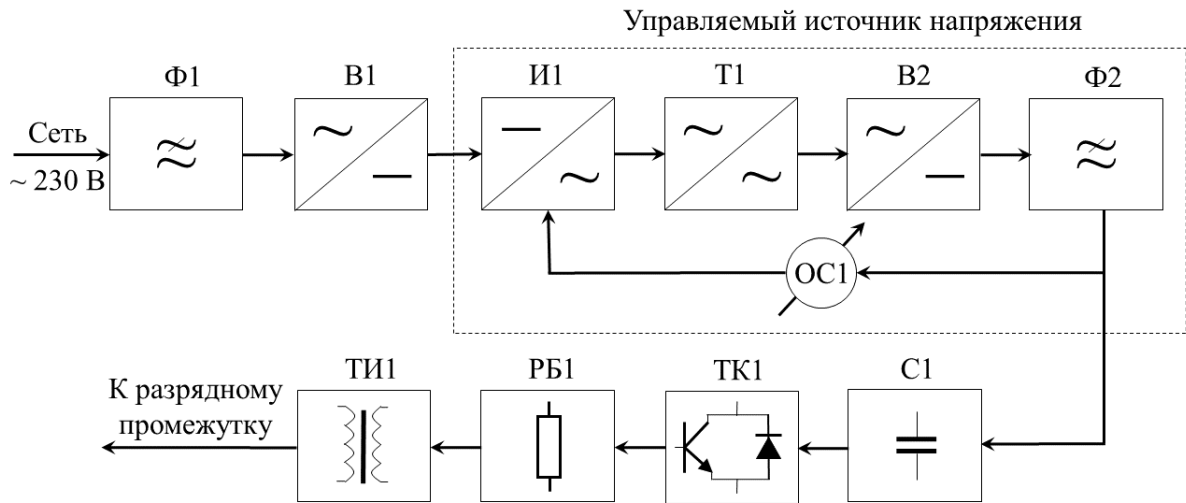


Рисунок 2.3 – Структурная схема электропитания с импульсным разделительным трансформатором.  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  – фильтры,  $B1$ ,  $B2$  – выпрямители,  $И1$  – инвертор,  $Т1$  – трансформатор,  $ОС1$  – обратная связь по напряжению,  $С1$  – блок конденсаторов,  $ТК1$  – транзисторный ключ,  $РБ1$  – балластное сопротивление,  $ТИ1$  – импульсный высоковольтный разделительный трансформатор.

Во втором варианте также используется емкостной накопитель  $C1$  (Рисунок 2.4) [71, 72], но коммутация накопителя происходит без разделительного трансформатора. Вместо этого произведено электрическое разделение всего блока питания на полное ускоряющее напряжение сетевым трансформатором  $ТР1$ . Зарядное напряжение накопителя постоянное. Регулирование происходит за счёт набора из четырех параллельных токоограничивающих сопротивлений  $РБN$ , каждое из которых задает определенную добавку к амплитуде тока разряда во время открытого состояния соответствующих транзисторов  $V_{TN}$ . В данном случае ток может принимать 16 значений в диапазоне от 0 до 225 А с дискретностью 15 А. Схема управления позволяет транзисторам  $ТКN$  изменять состояние в течение импульса с дискретностью 1 мкс и минимальным временем открытого/закрытого состояния 8 мкс. В подавляющем большинстве случаев для удобства задания значений ограничивались дискретностью 10 мкс, а общая длительность импульса составляла  $\leq 1$  мс. Таким образом, имеется возможность управляемо изменять ток разряда, а соответственно и ток пучка в течение импульса.

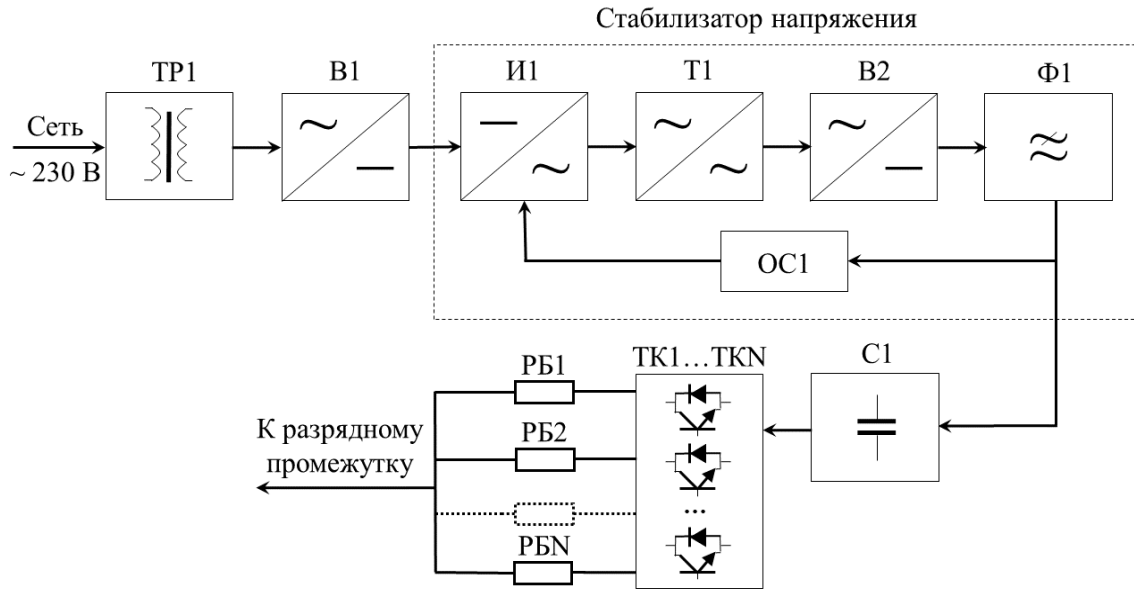


Рисунок 2.4 – Структурная схема электропитания с сетевым разделительным трансформатором.

TP1 – высоковольтный сетевой разделительный трансформатор, V1, V2 – выпрямители, И1 – инвертор, Ф1, Ф2 – фильтры, Т1 – трансформатор, ОС1 – обратная связь по напряжению, С1 – блок конденсаторов, ТК1..ТК $N$  – транзисторные ключи, РБ1..РБ $N$  – балластные сопротивления.

### 2.3. Методика измерения профиля электронного пучка

#### 2.3.1. Калориметрические измерения плотности энергии электронного пучка

Энергию пучка электронов измеряли калориметром (Рисунок 2.5), прототип которого был разработан Г.Е. Озуром с коллегами из ИСЭ СО РАН, но модернизированный для проведения представленных в работе экспериментов. В качестве поглотителя тепла в нем используется медный диск массой 290 гр с концентрическими канавками для уменьшения потерь, обусловленных испарением материала поглотителя. Поглотитель помещен в корпус, верхняя часть которого является диафрагмой диаметром 90 мм. Внутри корпуса поглотитель подвешен на тонкой проволоке из стали 12Х18Н10Т. Изменение температуры диска в результате электронно-пучкового воздействия измеряли термистором Epcos B57350K102J, который припаян с тыльной стороны поглотителя. Сигнал с термистора регистрировали специально разработанным контроллером.

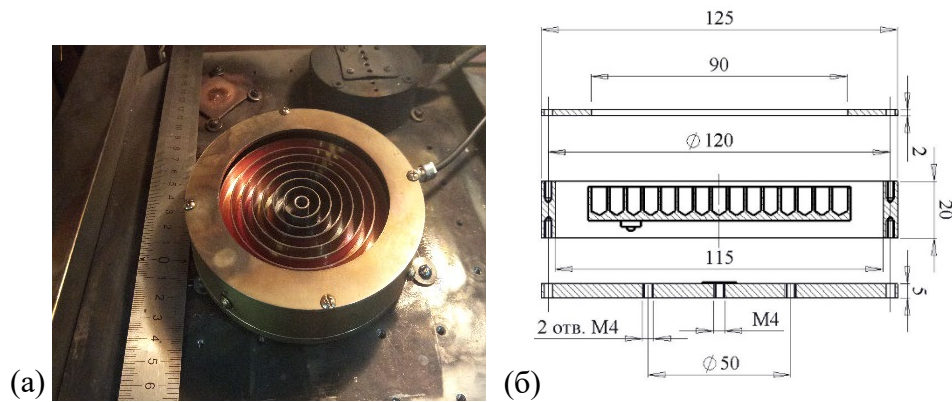


Рисунок 2.5 – Калориметр для измерения энергии пучка электронов.

Внешний вид (а) и схема (б).

Распределение плотности энергии в плоскости мишени измеряли калориметром, содержащим 9 цилиндрических медных поглотителей в виде цилиндров Фарадея (Рисунок 2.6).

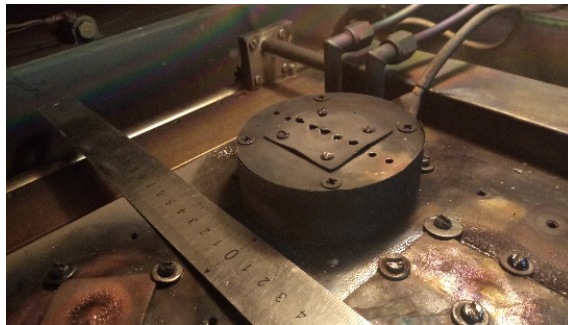


Рисунок 2.6 – Калориметр для измерения распределения плотности энергии пучка электронов.

Масса каждого цилиндра составляет примерно 3 г, расстояние между осями соседних датчиков – 7,5 мм или 8 мм. Площадь собирающей поверхности над поглотителем ограничена диафрагмой диаметром 3 мм. К каждому датчику с тыльной стороны припаян термистор. Сигналы с термисторов также регистрировали специализированным контроллером.

Измерения потерь пучка электронов за счёт попадания на стенки трубы дрейфа проводили путем помещения в канал транспортировки калориметра в виде полого медного цилиндра, близкого по размеру к трубе дрейфа, внутренним диаметром 76 мм и длиной 200 мм. Изменение температуры фиксировали термистором, расположенным на торце внешней поверхности цилиндра при помощи автоматизированной системы измерения.

### *2.3.2. Измерения радиального распределения плотности тока разряда вблизи анода плазменного эмиттера*

Измерения радиального распределения тока в разрядной ячейке плазменного эмиттера выполняли тремя цилиндрическими зондами, которые были вмонтированы в эмиссионный

электрод 5 (Рисунок 2.1 стр. 20). Зонды располагались в пространстве плазменного эмиттера на расстоянии 10 мм от эмиссионной сетки параллельно оси источника электронов: центральный – на оси источника, средний – на радиусе 15 мм, дальний – на радиусе 30 мм (Рисунок 2.7).

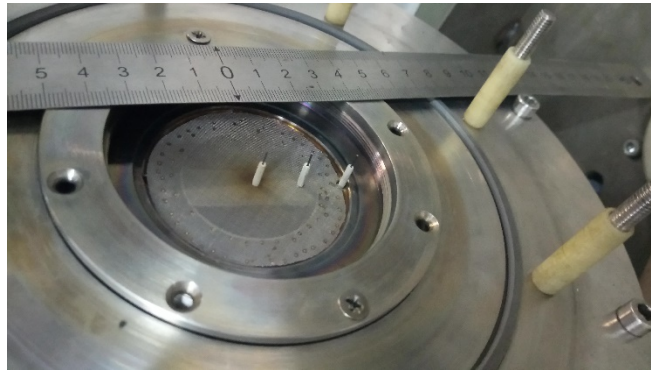


Рисунок 2.7 – Эмиссионный электрод с зондами

В экспериментах использовались вольфрамовые зонды диаметром 0,5 мм, длиной 5,5 мм. Исследования проводились в отсутствие ускоряющего напряжения, перераспределяющий электрод 4 (Рисунок 2.1) отсутствовал. Исследовали динамику тока на анод, для чего зонды соединялись с анодом через резистор сопротивлением 300 Ом без дополнительных источников питания. Ток на каждый из зондов определяли по падению напряжения на резисторе, которое регистрировали осциллографом Rigol DS1054Z. Синхронизация выполнялась по фронту тока разряда плазменного катода.

#### *2.4. Проведение зондовых измерений параметров плазмы дугового разряда*

Для исследования параметров катодной плазмы выполнена модернизация исходного источника электронов: увеличен объем анодной полости, добавлены смотровые окна и вакуумные токовводы, благодаря чему стала возможной установка зондов в разрядную ячейку.

Основная геометрия разрядной системы изображена на рис. 2.8, обозначим её как источник электронов с увеличенным анодом.

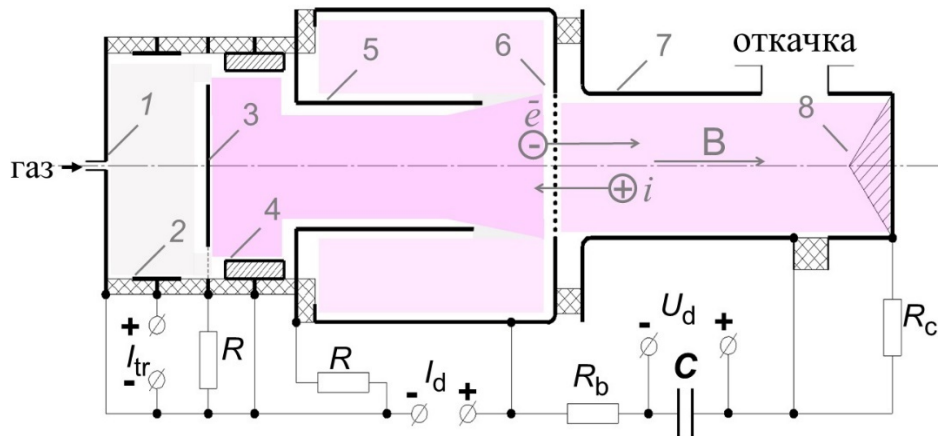


Рисунок 2.8 – Схема источника электронов с увеличенным анодом. 1 – катод поджигающего разряда, 2 – анод поджигающего разряда, 3 – диафрагма, 4 – силицированная катодная вставка, 5 – полый катод, 6 – эмиссионный электрод с выходным отверстием, перекрытым сеткой (анод основного разряда), 7 – труба дрейфа, 8 – коллектор.

По сравнению с системой на рис. 2.1 с 8 до 76 мм увеличен внутренний диаметр катода 4 (Рисунок 2.8), а длина уменьшена с 50 до 10 мм. Такой катод больше не создает перепад давления между поджигающей и основной разрядной ячейкой. Для этих целей введена диафрагма 3, и стабильное зажигание поджигающего разряда в прежнем диапазоне давления в рабочей камере (15–80) мПа обеспечивается модифицированной поджигающей разрядной ячейкой, по конструкции близкой к пеннинговской. Она имеет форму цилиндра с внутренним диаметром 120 мм, длиной 60 мм. Электропитание осуществляется от источника с импульсным разделительным трансформатором (Рисунок 2.3 на стр. 23). Поджигающий импульс прикладывается между анодом 2 и катодами 1, 3, 4, при этом катод 4 выполнен из алюминий-кремниевый сплава АК12 и поджигающий разряд переходит в дуговую форму с образованием катодных пятен на его поверхности. Этот кольцевой катод является одновременно катодом основной разрядной ячейки, имеющей внутренний диаметр 150 мм и длину 170 мм. За кольцевым катодом установлен полый цилиндрический катод 5 диаметром 60 мм и длиной 106 мм, электрически соединенный с основным катодом 4 через резистор 5 Ом. Эмиссионное отверстие имело диаметр 40 мм, как изначальная конструкция (Рисунок 2.1). Остальные элементы источника электронов: извлекающий электрод, труба дрейфа, катушки магнитного поля остались исходными.

### 2.4.1. Плоский зонд

Измерения параметров катодной плазмы выполняли плоским зондом с охранным кольцом (Рисунок 2.9).

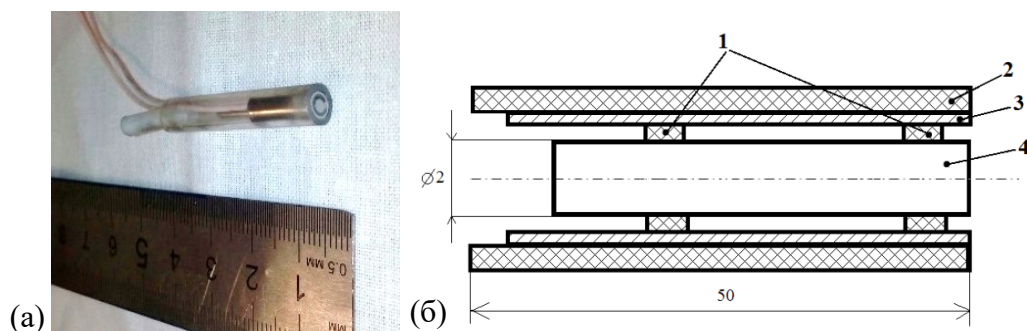


Рисунок 2.9 – Плоский зонд с охранным кольцом: внешний вид (а) и схема (б). 1 – кварцевые кольца; 2 – стеклянный кожух; 3 – охранный кольцо; 4 – собирающий зонд.

Плоский зонд имел диаметр собирающей поверхности 2 мм. Проводящие элементы выполнены из стали 12Х18Н10Т, изолирующие – из кварцевого стекла. Электрическое смещение подавалось проводниками марки МГТФ через вакуумный разъем в аноде. Устройство внутри катода закрепляли на оснастке из нержавеющей фольги через фторопластовую трубку.

Схема подключения зонда представлена на рис. 2.10.

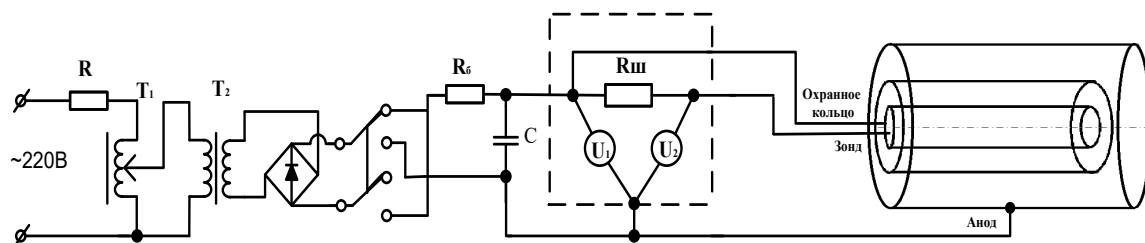


Рисунок 2.10 – Схема подключения плоского зонда с охранным кольцом.

Питание осуществляли от конденсатора  $C$  емкостью 500 мкФ, который заряжали регулируемым напряжением через токоограничивающий резистор  $R_6$ . Напряжение смещения зонда относительно анода  $U_2$  и падение напряжения на шунте  $R_{ш}$  как разницу  $U_1 - U_2$  регистрировали осциллографом Rigol DS1052 или Актаком АСК-3117 через высокоомные щупы. Управление осциллографами и сохранение результатов измерений было удаленным. Осциллограф соединяли с компьютером пульта оперативного управления электроустановкой посредством медиаконвертера USB-оптоволоконно-USB Opticis M2-110-10. Синхронизацию выполняли по фронту тока поджигающего разряда. Для этого на подводящий кабель анода поджигающего разряда надевали пояс Роговского, нагруженный на оптический передатчик

HFBR-1521Z, представляющий собой светодиод в корпусе для подключения пластикового оптоволоконного кабеля. При протекании тока в цепи поджигающего разряда в обмотке пояса Роговского наводится потенциал, подобранный так, чтобы запитать диод передатчика и, тем самым, сформировать оптический сигнал синхронизации. Этот сигнал вновь преобразуется в электрический посредством оптического приемника HFBR-2522Z и подается на вход осциллографа.

Шунт измерения тока, осциллограф со щупами, приемная часть системы синхронизации с блоком питания, приборная часть медиаконвертера с блоком питания располагались внутри клетки Фарадея. Последняя электрически соединялась с анодом разрядной ячейки. До вакуумного разъема сигналы были подведены экранированными радиочастотными кабелями. Вся измерительная система и блок смещения были развязаны относительно потенциала «земли» на полное ускоряющее напряжение сетевым разделительным трансформатором.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) зонда использовали для определения потенциала катодной плазмы, ионного и электронного тока насыщения в различных областях катода. Ток на зонд регистрировали в течение импульса длительностью 200 мкс. Анализу подвергали ВАХ, полученные на 150-ой микросекунде от начала импульса. Потенциал плазмы определяли по точке перегиба ВАХ методом линейной аппроксимации участков электронной ветви ВАХ зонда в полулогарифмическом масштабе.

#### *2.4.2. Накаленный зонд*

Измерения потенциала катодной плазмы выполняли также эмитирующим зондом [73, 74]. Он был изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 100 мкм в виде петли диаметром 4 мм. Концы петли помещались внутрь двухканальной корундовой трубки, где фиксировались отрезками вольфрамовой проволоки диаметром 0,6 мм. Конец трубки со стороны зонда на 25 мм прикрывался нержавеющей фольгой. Сборка помещалась в корпус из кварцевой трубки диаметром 8 мм, длиной 36 мм, внутри которого вольфрамовую проволоку соединяли с подводными проводниками марки МГТФ.

Изготовленный зонд устанавливался внутри разрядной камеры плазменного катода за 20 мм до эмиссионного электрода *б* (Рисунок 2.8) и на расстоянии 20 мм от внутренней поверхности цилиндрического анода (Рисунок 2.11).

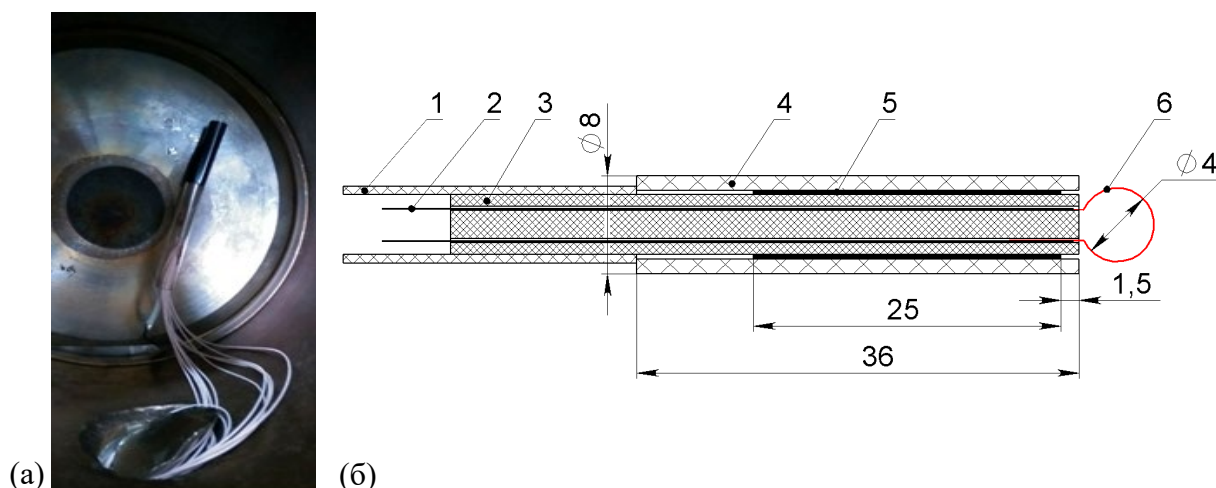


Рисунок 2.11 – Внешний вид эмиссионного зонда в разрядной ячейке (а) и его схема (б). 1 – фторопластовая трубка; 2 – вольфрамовая проволока  $d = 0,6$  мм, 3 – корундовая двухканальная трубка, 4 – кварцевая трубка, 5 – фольга, 6 – зонд.

Для питания цепи зонда создан блок накала (Рисунок 2.12), работающий по схеме однотактного прямоходового преобразования [75]. Он разделен на три модуля: ключевой, трансформаторный и контроллерный. Ключевой модуль питается сетевым напряжением через высоковольтный разделительный трансформатор, содержит фильтр помех, выпрямитель VD, конденсатор C1, IGBT-модуль VT1 с драйверами и демпфером, вспомогательные блоки питания +5 В, -15 В. Эта часть собрана внутри экранирующего корпуса, а проводники, подводящие питание к следующему – трансформаторному модулю экранированы медной оплеткой. Корпус и оплетка соединены с эмиссионным электродом источника электронов. Трансформаторный блок представляет собой трехобмоточный тороидальный трансформатор T1 и диоды VD2, VD3, напаянные на медный радиатор. Этот модуль также содержал экран, которым он крепился непосредственно к аноду основной разрядной ячейки источника электронов. Зонд подключался ко вторичной обмотке через вакуумный разъем в этом аноде. С целью обеспечения помехоустойчивости и гальванической развязки управление IGBT-модулем блока питания осуществлялось удаленно оптическим ШИМ-сигналом, формируемым контроллером. Он выполнял задачи синхронизации, плавно увеличивал ток накала зонда до заданного значения и отключал его питание на время измерения.

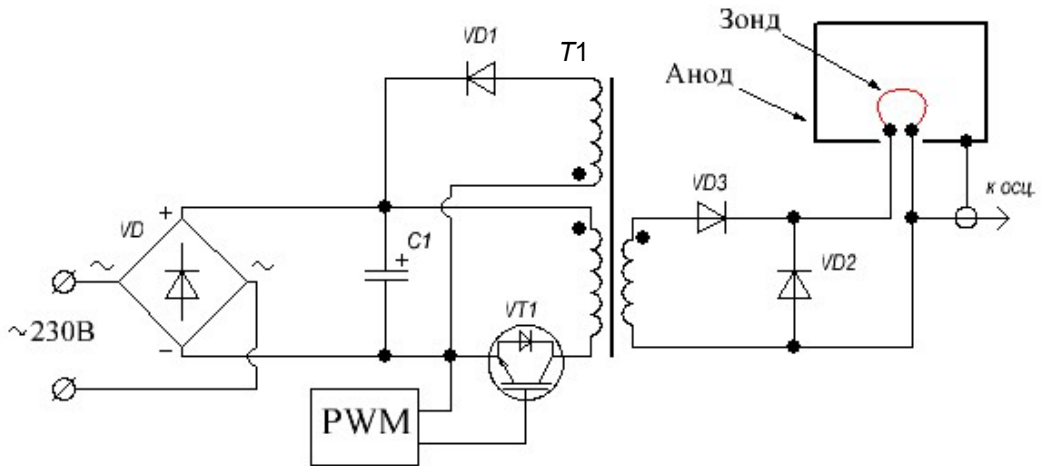


Рисунок 2.12 – Схема подключения эмитирующего зонда.

Ключевой модуль размещался внутри клетки Фарадея вместе с осциллографом, который регистрировал ток, напряжение горения основного разряда и напряжение на зонде относительно анода.

Циклограмма работы зонда приведена на рис. 2.13. До начала измерений установлено рабочее давление в вакуумной камере, регулятор расхода газа работает в установившемся режиме. Если того требуют условия эксперимента, подано высокое отрицательное смещение на эмиссионный электрод. В момент времени  $t_1$  включается питание катушек магнитного поля, за  $\leq 30$  мс в момент времени  $t_2$  ток в катушках достигает заданного значения, подается питание вспомогательного поджигающего разряда, питание катушек отключается. В цепь питания вспомогательного разряда установлен пояс Роговского, нагруженный на оптический передатчик HFBR-1521Z, посредством которого формируются сигналы синхронизации для контроллера зонда. Получив этот сигнал контроллер формирует ШИМ-сигнал на оптическом выходе, который начинает увеличиваться по линейному закону. В момент времени  $t_4$ , который наступает через 20 мкс после срабатывания поджигающего разряда, на 200 мкс подается питание основного разряда с регулируемой амплитудой тока, ток в цепях катушек магнитного поля за это время уменьшиться не успевают.

После 3-х импульсов тока разряда, следующих друг за другом с частотой 1 Гц, скважность сигнала управления накалом зонда достигает заданного значения. Контроллер ожидает сигнала синхронизации от тока поджигающего разряда, при поступлении которого в момент времени  $t_3$  питание зонда прекращается. Такой подход, во-первых, позволяет улучшить повторяемость результатов измерений, т.к. параметры первого или первых нескольких импульсов пучка могут отличаться от последующих, во-вторых, продлить срок службы зонда за счёт плавного нагрева нити накала. Отключение питания зонда требуется для уменьшения помех от импульсного блока питания во время измерений.

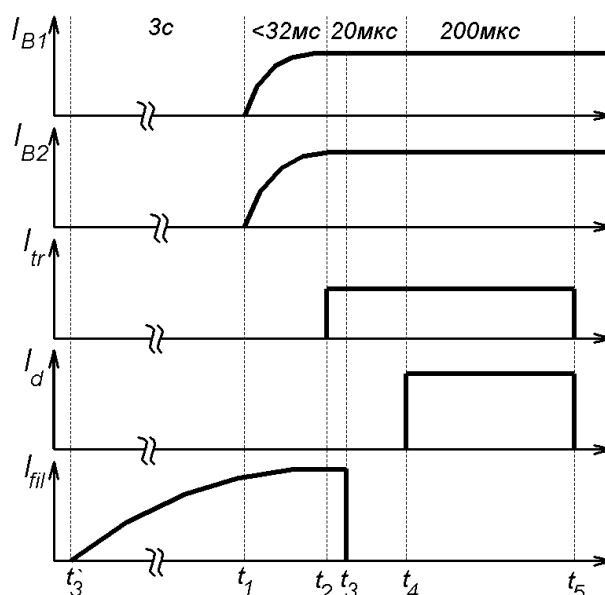


Рисунок 2.13 – Циклограмма работы источника электронов и эмиссионного зонда.

Измерения проводили в течение импульса тока разряда методом плавающего зонда [17]. Потенциал плавающего эмитирующего зонда приближается к потенциалу плазмы по мере увеличения тока эмиссии. В области насыщения, измеренный плавающий потенциал ниже потенциала плазмы на величину близкую к температуре плазменных электронов. Нить накала зонда меняли по мере перегорания. Для каждого вновь изготовленного зонда определяли величину тока накала, начиная с которой её дальнейшее увеличение не приводит к росту потенциала зонда в плазме катодного разряда при прочих постоянных параметрах.

Таким образом, в ходе выполнения работы создано устройство для измерения потенциала катодной плазмы импульсного источника электронов.

### 2.4.3. Двойной зонд

Для измерения концентрации анодной плазмы источника электронов использовался двойной зонд, прикрытый экраном от прямого попадания потока ускоренных электронов (Рисунок 2.14).

Зонд представлял собой два параллельных вольфрамовых стержня диаметром 0,8 мм и длиной 10 мм, помещенные в двухканальную трубку из керамики МКР-99 диаметром 4,6 мм. Трубку оборачивали фольгой из нержавеющей стали и помещали внутрь более толстой одноканальной. Обернутый край трубки выпускали на 7 мм. Зонд располагали между эмиссионным электродом и коллектором параллельно оси источника электронов на расстоянии 15 мм от неё и на расстоянии 14 см от коллектора.

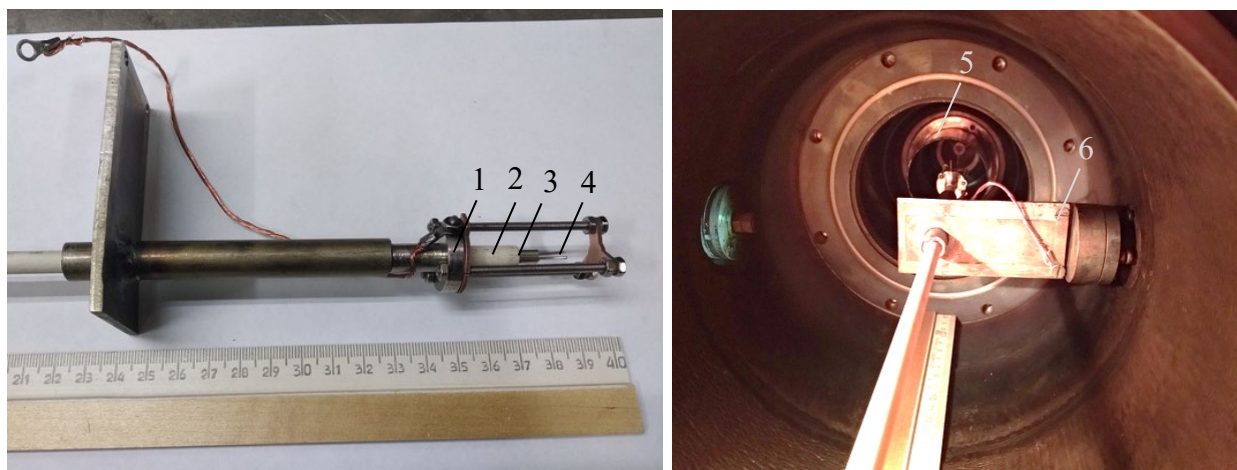


Рисунок 2.14 – Фотография двойного зонда. 1 – внешняя керамическая трубка, 2 – внутренний экран, 3 – зонды, 4 – экран, 5 – труба дрейфа, 6 – держатель.

Электрическое смещение на зонд подавали от блока питания, который представлял собой последовательно включенные регулируемый вручную источник постоянного напряжения  $\pm 300$  В и источник переменного напряжения 15 В, 28 В либо 50 В (Рисунок 2.15). Источник постоянного напряжения собран из разделительного трансформатора, лабораторного автотрансформатора, выпрямителя и RC-фильтра. Источник переменного напряжения представлял собой сетевой трансформатор. Частота переменного сетевого напряжения – 50 Гц, его фаза не синхронизована с работой других узлов оборудования. Величину тока на зонд определяли по падению напряжения на шунте  $R_{ш}$  из резисторов марки ТВО, сигналом синхронизации служил ток в ускоряющем промежутке  $I_g$ . Ток и напряжение зонда, ток в цепи ускоряющего промежутка и потенциал относительно заземлённого коллектора для двойного зонда регистрировали цифровым осциллографом Rigol DS1054Z, было выполнено электрическое разделение цепей электропитания осциллографа и остального экспериментального стенда, организована оптоволоконная линия связи осциллографа с компьютером для управления и передачи полученных данных. Максимальное напряжение на зонде относительно «земли» было ограничено электрической прочностью используемого вакуумного разъема и не могло превышать 3 кВ.

Осциллограф поддерживает протокол стандартных команд для программируемых инструментов – SCPI, комплект поставки содержал программное обеспечение, включающее драйверы устройства, библиотеки «VISA (Virtual Instrument Software Architecture) library» и «VISA-COM (Microsoft Component Object Model) 5.11 Type library». Используя средства Excel VBA (Visual Basic for Applications) и указанные библиотеки было создано программное обеспечение для передачи настроек осциллографу и автоматического сохранения

регистрируемых осциллограмм. Упрощенный алгоритм работы программы приведен на рис. 2.16.

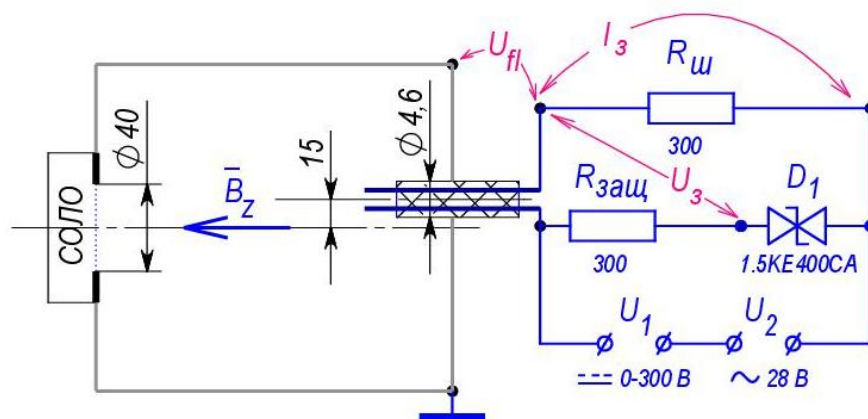


Рисунок 2.15 – Схема подключения двойного зонда.  $U_{п}$  – точки измерения потенциала зонда относительно «земли»,  $I_3$  – точки измерения тока зонда,  $U_3$  – точки измерения напряжения зонда.

Программа управления конфигурирует осциллограф, переводит его в режим единичных запусков и отслеживает изменение статуса. Срабатывание осциллографа приводит к изменению статуса на «STOP». После этого, если осциллограмма скопировалась в память осциллографа (число точек осциллограммы текущего канала, доступных для чтения равно 1200), происходит чтение данных и их сохранение в формате «.csv». С целью уменьшения времени чтения данных сохраняли лишь 1200 точек осциллограммы для каждого луча, при этом величина напряжения передавалась в виде одного байта, т.к. прибор имеет 8-битный АЦП. Остальные параметры, такие, как вертикальная и горизонтальная дискретность, смещения лучей запрашивались один раз при запуске измерения и не изменялись в течение цикла измерения.

Вольт-амперную характеристику зонда регистрировали следующим образом: диапазон напряжения разделяли на пересекающиеся отрезки по 15, 28 или 50 вольт в зависимости от используемого переменного напряжения смещения, при помощи осциллографа устанавливали напряжение постоянного смещения в середину отрезка, затем запускали программу автоматического сохранения осциллограмм, при этом задавали необходимое количество точек для текущего участка ВАХ, обычно от 200 до 450, синхронизация при этом устанавливалась по фронту тока в ускоряющей промежутке, и осциллограф переводился в режим единичных запусков.

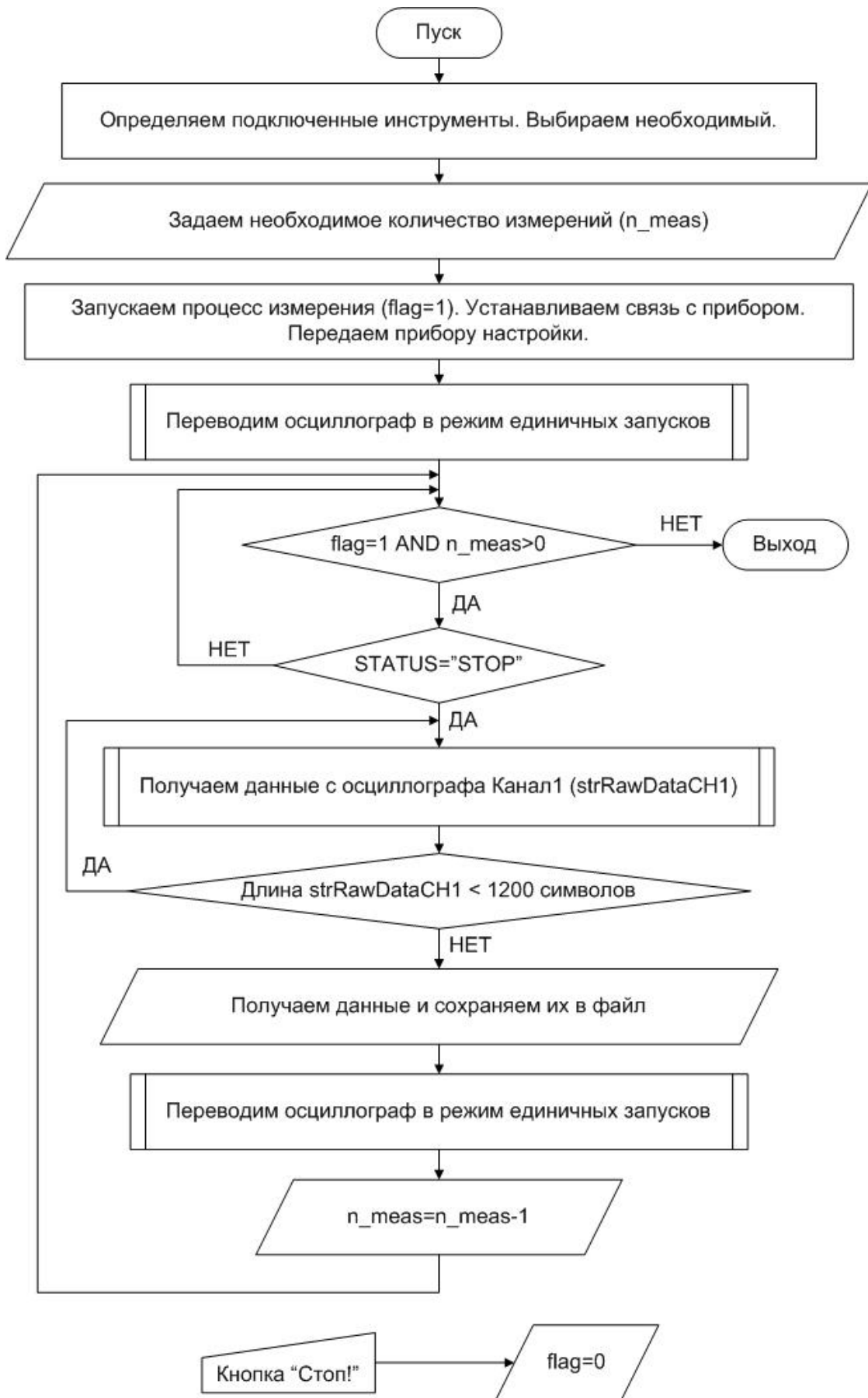


Рисунок 2.16 – Блок-схема программы автоматического сохранения данных.

Затем в исследуемом режиме включали источник электронов с частотой следования импульсов 0,3 Гц. Программа непрерывно опрашивает статус осциллографа, если он зафиксировал осциллограммы, они сохраняются на компьютер, а осциллограф вновь переводится в режим единичных запусков. Процесс сохранения одного измерения из 4-х осциллограмм занимал 1,3 с, при этом сохраняются только численные значения осциллограмм без изображения экрана. По завершении заданного количества измерений изменяли напряжение смещения и вновь запускали измерения. При необходимости сопротивление токового шунта и настройки осциллографа могли быть изменены.

Результатом измерений является массив данных, каждому импульсу соответствует 4 сохраненных осциллограммы, две из которых – ток и напряжение зонда. Специально созданная программа применяет цифровые фильтры к осциллограммам и извлекает данные, соответствующие исследуемому моменту времени. Предполагается, что параметры плазмы от импульса к импульсу существенно не изменяются.

Запись обычно выполняли при длительности импульса тока разряда 100 мкс с дискретностью 0,2 мкс, каждая зарегистрированная осциллограмма содержала 1200 точек. Анализ выполняли для момента времени за 20 мкс до окончания импульса тока разряда. Из массива данных для каждой из осциллограмм извлекалась точка, соответствующая этому времени и 49 следующих за ней. Затем определяли среднее арифметическое для этих 50 точек, что обычно соответствовало усреднению за 10 мкс. Тем самым получали ВАХ двойного зонда, и уже к ней для исключения выбросов применяли медианный фильтр, организованный следующим образом. Точки ВАХ сортируются по возрастанию напряжения смещения, находится медиана (серединное значение выборки) пяти последовательных значений тока. Точки, за пределами доверительного интервала исключаются из анализа. В случае измерения концентрации пучковой плазмы допустимым в настоящей работе принято отклонение  $10\%+2$  мА. Добавка в несколько миллиампер позволяет избежать ошибочного исключения точек вблизи нуля тока.

Температуру электронов  $T_{e\perp}$  определяли методом эквивалентного сопротивления [76 – 78] по наклону ВАХ в области нуля напряжения. Характерная ВАХ приведена на рис. 2.17.

Концентрацию плазмы определяли по току насыщения, линейно экстраполируя области  $HE$  и  $H'E'$  (Рисунок 2.17) до их пересечения с осью ординат. Ток в точках  $F$  и  $F'$  считали током насыщения.

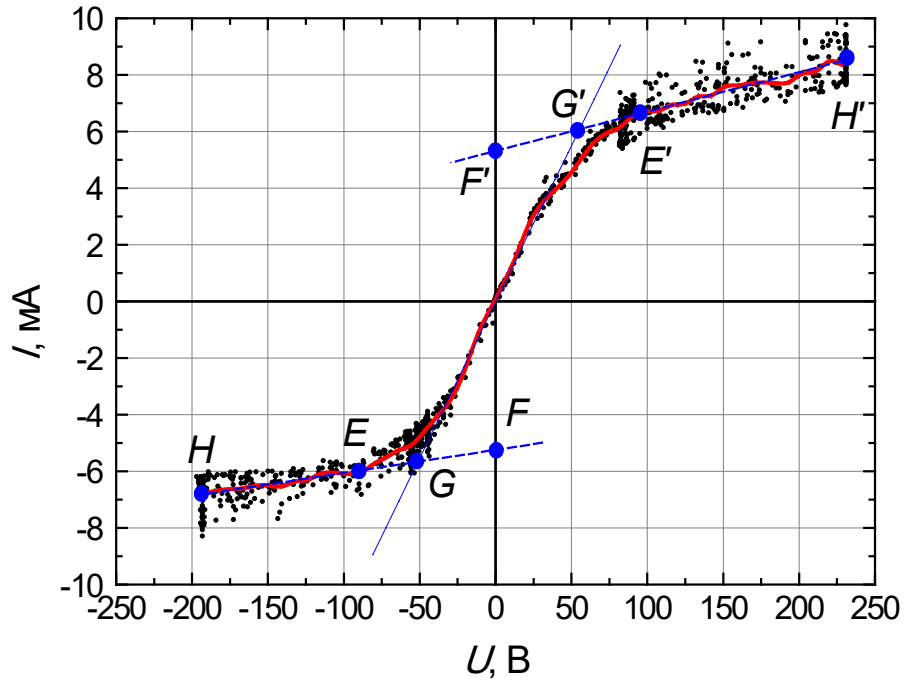


Рисунок 2.17 – Характерная ВАХ двойного зонда, расположенного в пространстве дрейфа пучка при токе разряда плазменного катода  $I_d = 12,5$  А, давлении газа 20 мПа и ускоряющем напряжении  $U_g = 5$  кВ.

Таким образом, в работе реализовано полуавтоматическое измерение параметров плазмы двойным зондом – участие оператора сводилось к выбору диапазонов напряжения смещения, настройке развёртки осциллографа под выбранный диапазон и применению программных скриптов обработки результатов измерения.

### 2.5. Погрешность измерений

Относительная погрешность измерений в настоящей работе рассчитана как среднеквадратичная погрешность среднего арифметического (2.1), умноженная на коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 0,9.

$$\sigma(\langle x \rangle) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (2.1)$$

где  $x_i$  – результат отдельного  $i$ -го измерения,  $n$  – число измерений.

Расчёт доверительных интервалов для доли импульсов, в которых возникал электрический пробой ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов выполнен по формуле Уилсона [79], в следующем виде:

$$\left( p + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{2n} \pm z_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n} + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{4n^2}} \right) / \left( 1 + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{n} \right), \quad (2.2)$$

где  $p$  – доля импульсов с интересующим признаком (пробоем) от общего числа импульсов,  $n$  – общее число импульсов, а коэффициент  $z_{1-\alpha/2}$  ( $z$ -оценка) взят для доверительного интервала 95% и равен 1,96 [80].

### 2.6. Выводы

При выполнении работы создана комплексная экспериментальная база для исследования генерации и транспортировки интенсивных субмиллисекундных электронных пучков. Основой экспериментального стенда послужит импульсный источник электронов «СОЛО», разработанный ранее в ИСЭ СО РАН, который успешно применяется для модификации поверхности материалов в научных учреждениях России и Китая. Источник обеспечивает генерацию низкоэнергетических (до 25 кэВ) электронных пучков с током до 400 А и длительностью импульса от 20 до 250 мкс, что позволяет проводить исследования в широком диапазоне параметров. Использование двух экспериментальных стендов – с горизонтальной и вертикальной компоновкой источника электронов – расширило возможности проведения как фундаментальных исследований физических процессов, так и прикладных работ по воздействию пучка на материалы.

Применены два варианта построения схемы электропитания основного разряда плазменного эмиттера, каждый из которых обладает специфическими преимуществами. Схема с импульсным разделительным трансформатором обеспечивает широкий диапазон регулирования тока разряда (20–500) А с дискретностью 1 А и длительности импульса (20–200) мкс с дискретностью 1 мкс. Альтернативная схема с сетевым разделительным трансформатором и набором коммутируемых балластных сопротивлений позволяет управляемо изменять ток пучка непосредственно в течение импульса  $\leq 1$  мс с дискретностью 10 мкс по времени и 15 А по амплитуде. Такая гибкость управления открывает возможности для формирования пучков с заданной временной структурой, что позволяет оптимизировать технологические процессы электронно-пучковой обработки материалов.

Используется развитый диагностический комплекс для исследования энергии, приносимой пучком на коллектор, распределения плотности энергии электронного пучка, измерения динамики распределения тока разряда плазменного катода и измерения параметров плазмы. Для исследования параметров катодной и анодной плазмы реализованы различные зондовые методики: плоский зонд с охранным кольцом, накаливаемый зонд и двойной зонд. В условиях магнитного поля потенциал катодной плазмы стало возможно измерять дублирующими методами – накаливаемым и плоским зондом, а концентрацию плазмы – исходя из ионной ветви ВАХ плоского зонда. Двойной зонд был сконструирован для размещения в анодной плазме.

При выполнении работы произведена модернизация конструкции источника электронов для обеспечения возможности проведения зондовых измерений непосредственно в разрядной ячейке плазменного катода. Модифицирована поджигающая разрядная ячейка для сохранения стабильного зажигания разряда в исходном диапазоне давлений при изменённой геометрии катода.

Также результатом работы является создание системы автоматизации зондовых измерений. Разработано программное обеспечение для удалённого управления цифровыми осциллографами и автоматического сохранения осциллограмм. Реализована полуавтоматическая процедура измерения вольт-амперных характеристик зондов с последующей цифровой обработкой данных, включающей применение медианных фильтров для исключения выбросов. Для накаливаемого зонда создан специализированный блок накала с оптической развязкой управления и синхронизацией с работой источника электронов, что обеспечивает измерение потенциала плазмы в условиях импульсных помех.

При компоновке экспериментального стенда особое внимание уделено вопросам электробезопасности и помехозащищённости измерений. Все элементы под высоким ускоряющим потенциалом (до 25 кВ) размещены за защитным ограждением. Чувствительное измерительное оборудование помещено в клетки Фарадея. Применение оптических систем синхронизации и связи позволило обеспечить корректную работу диагностического оборудования в условиях электромагнитных помех, характерных для импульсных электронных источников.

### ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ И ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМЕННОМ КАТОДЕ

Условия инициирования и существования дугового разряда рассмотрены в монографии [81], инициирование дугового разряда в результате перехода от тлеющего разряда представлено в работах [82]. Стационарный дуговой разряд низкого давления широко используется в напылительных установках, источниках плазмы для технологических процессов и, за исключением катодных процессов, хорошо изучен [83]. На основе дугового разряда существует ряд источников электронов с хорошо исследованными параметрами разряда. ВАХ разряда плазменного катода, распределение концентрации плазмы, влияние на ВАХ извлечения электронов для разных устройств несколько отличаются из-за отличий в площадях электродов, наличия или отсутствия контрагирования дуги, геометрии эмиссионных отверстий, разной величины внешнего магнитного поля, разных рабочих диапазонов давления. В настоящей главе представлены характеристики разряда, формирующего плазменный катод источника электронов «СОЛО» в диапазонах, представляющих интерес для дальнейших исследований. Рассмотрены факторы, влияющие на стабильность работы источника электронов.

#### 3.1. Характеристики дугового разряда низкого давления

Благодаря системе электропитания с возможностью регулирования тока разряда в течение импульса (Рисунок 2.4) стало возможным наблюдать зависимость некоторых параметров от тока непосредственно на экране осциллографа. Например, путем создания ступенчатой формы импульса дугового разряда (растущей и падающей) была получена ВАХ источника электронов «СОЛО» (Рисунок 2.1) в модулированном режиме (Рисунок 3.1).

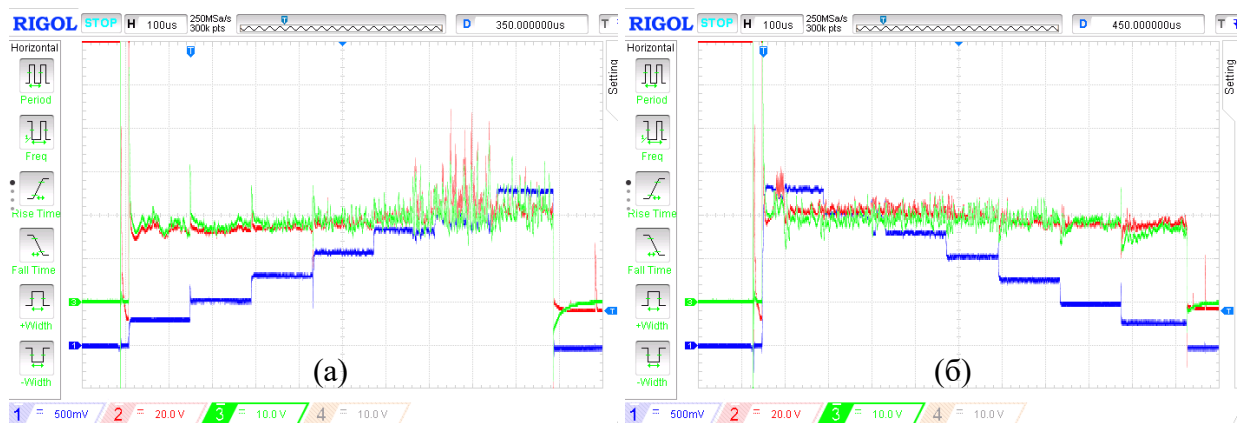


Рисунок 3.1 – Осциллограммы тока разряда  $I_d$ , 25 А/кл. (синий), напряжения горения разряда  $U_d$ , 20 В/кл. (красный), напряжения на резисторе в цепи полого анода  $U_{ha}$ , 10 В/кл (зелёный); при *a*) растущем  $I_d$ , (*б*) падающем  $I_d$ . Развёртка 100 мкс/кл.

Извлечение электронов в выбранном режиме при давлении аргона в вакуумной камере 12,5 мПа и ниже не оказывает заметного влияния на ВАХ дугового разряда (Рисунок 3.2), если используется эмиссионная сетка с ячейкой 0,18×0,18 мм.

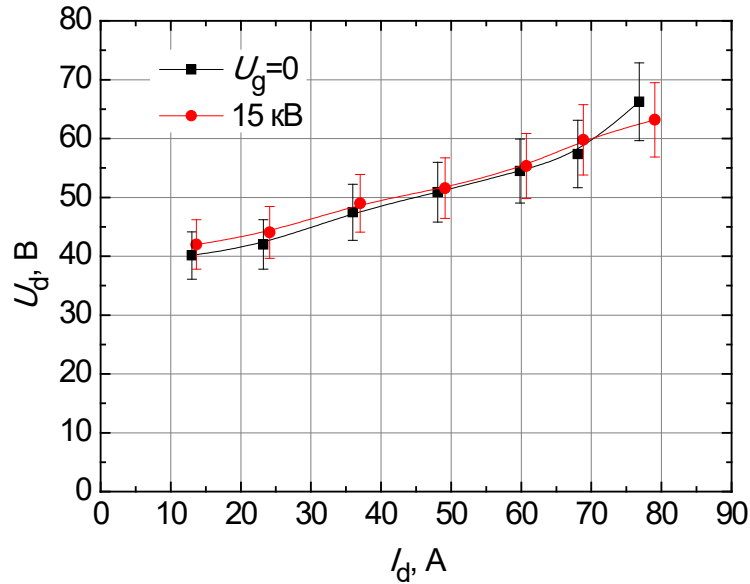


Рисунок 3.2 – ВАХ разряда при давлении 12,5 мПа с растущим  $I_d$  без ускоряющего напряжения и при ускоряющем напряжении  $U_g=15$  кВ.

Повышение тока дугового разряда с 15 до 85 А приводит к повышению напряжения горения на (20–26) В от (25–42) В до (51–63) В в зависимости от давления газа. При повышении давления с 12,5 до 40 мПа напряжение горения уменьшается на (11–16) В за счёт повышения концентрации плазмы и, соответственно, ее проводимости (Рисунок 3.3).

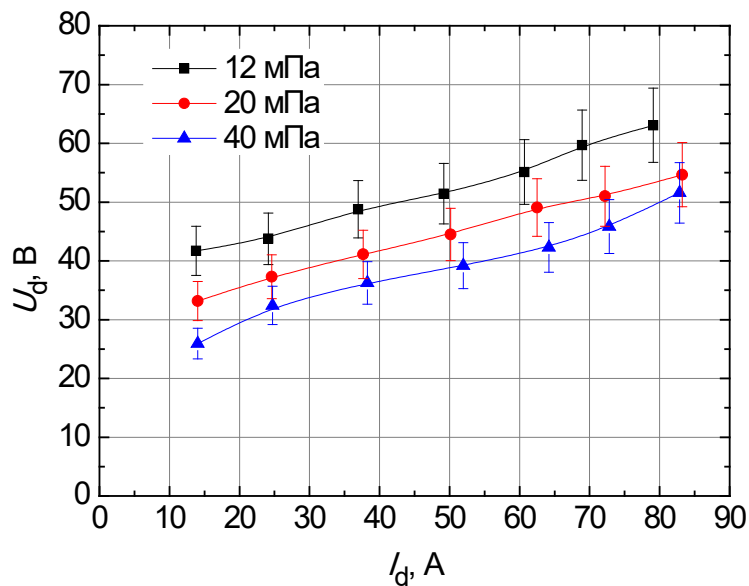


Рисунок 3.3 – ВАХ разряда с падающим  $I_d$  при ускоряющем напряжении 15 кВ для 3-х давлений рабочего газа: 12,5; 20 и 40 мПа.

Источник электронов с увеличенным анодом (Рисунок 2.8) имеет расширенный в большую сторону диапазон рабочих токов разряда, однако наблюдается нестационарность напряжения анод-катод  $U_d$  в течение импульса длительностью 250 мкс при токе выше 300 А. Она выражается в увеличении напряжения горения со временем (Рисунок 3.4).

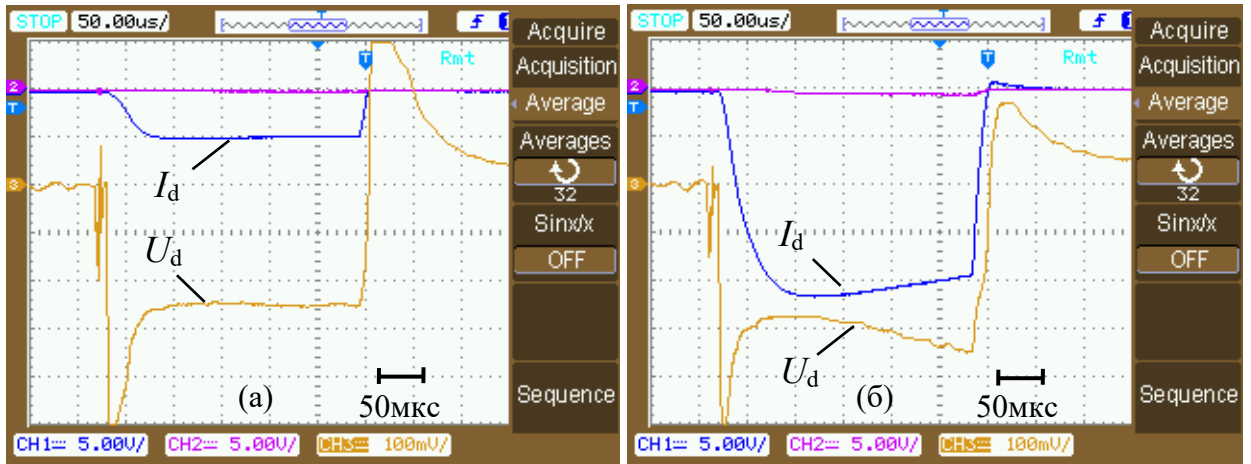


Рисунок 3.4 – Характерные осциллограммы тока разряда  $I_d$  (синий, 100 А/кл.) и напряжения горения  $U_d$  (коричневый, 20 В/кл.) при давлении 70 мПа.

На рис. 3.5 приведена ВАХ разряда для сотой микросекунды от начала импульса.

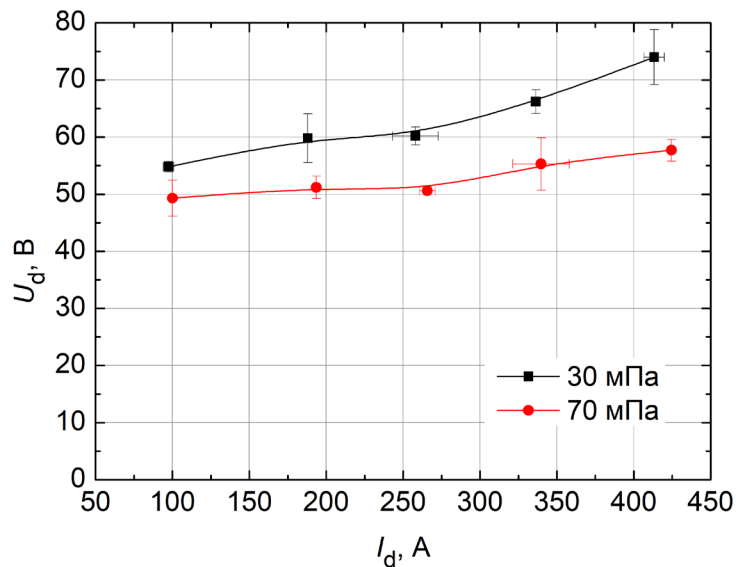


Рисунок 3.5 – ВАХ основного разряда источника электронов с увеличенным анодом при давлении 30 мПа и 70 мПа.

Такой характер изменения ВАХ дугового разряда от времени обусловлен изменениями условий его генерации в течение импульса тока разряда субмиллисекундной длительности, а, прежде всего, изменением газовых условий, что связано с электронным выносом газа из канала

контрагирования разряда [33], а также динамикой плазменных процессов, связанных с заполнением плазмой пространства плазменного эмиттера.

При давлении 30 мПа в диапазоне токов (100–450) А напряжение горения разряда лежит в диапазоне (55–75) В и имеет растущий характер. При увеличенном давлении (до 70 мПа) до тока 300 А напряжение горения остается постоянным на уровне 50 В, а затем увеличивается до 58 В.

### *3.2. Динамика радиальной неоднородности катодной плазмы*

В стандартном источнике электронов «СОЛО», из разрядной ячейки которого предварительно извлекли перераспределяющий электрод 4 (Рисунок 2.1 на стр. 20) исследовано радиальное распределение тока эмиссии и его динамика [84]. Для этого использовали три зонда, радиально закрепленные в эмиссионной сетке (Рисунок 2.7) на оси источника, на расстоянии 15 и 30 мм от нее.

В отсутствие перераспределяющего электрода 4 (Рисунок 2.1) измерения токов в цепях зондов, подключённых к аноду (Рисунок 3.6а), показывают, что на фронте тока разряда (первые несколько микросекунд) большая часть (близкая к 100%) тока разряда замыкается по оси системы. Если в этой области размещен перераспределяющий электрод, ток в его цепи  $I_{НА}$  содержит пик на фронте импульса, т.е. через цепь перераспределяющего электрода 4, который электрически соединен с анодной вставкой 3, на фронте импульса замыкается существенно больший ток, чем в последующие моменты времени. В отсутствие перераспределяющего электрода 4 ток  $I_{НА}$  нарастает до амплитудного значения за  $\approx 20$  мкс без пика на фронте (Рисунок 3.6б).

Из осциллограмм токов на зонды (Рисунок 3.7) видно, что рост величины ведущего магнитного поля приводит к увеличению плотности тока разряда в осевой области источника электронов. При отсутствии электрода 4 вне зависимости от величины ведущего магнитного поля в диапазоне (20÷100) мТл в первые несколько микросекунд разряд замыкается на центральный зонд, постепенно расширяясь в пространстве плазменного эмиттера, о чем свидетельствует нарастание тока в цепях периферийных зондов. Можно считать, что разряд достигает установившегося режима горения, когда стабилизируются величины токов на каждый из зондов, что происходит не раньше чем через  $\approx (40–60)$  мкс после зажигания разряда.

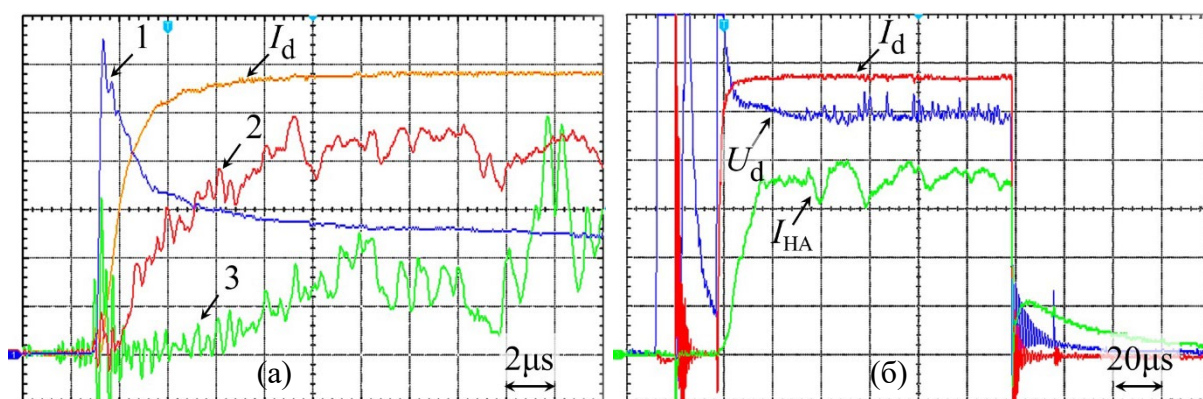


Рисунок 3.6 – Характерные осциллограммы в отсутствие (а) и при наличии (б) перераспределяющего электрода 4 (Рисунок 2.1).

а: 1 – зонд на оси разрядной ячейки, 33 мА/кл., 2 – зонд на расстоянии 15 мм от оси, 6,7 мА/кл., 3 – зонд на расстоянии 30 мм от оси, 1,7 мА/кл.,  $I_d$  – ток разряда, 10 А/кл.

б:  $U_d$  – напряжение горения разряда, 10 В/кл.,  $I_d$  – ток разряда, 10 А/кл.,  $I_{HA}$  – ток на полый анод, 400 мА/кл. Режим:  $p=80$  мПа,  $B_1=50$  мТл,  $B_2=100$  мТл.

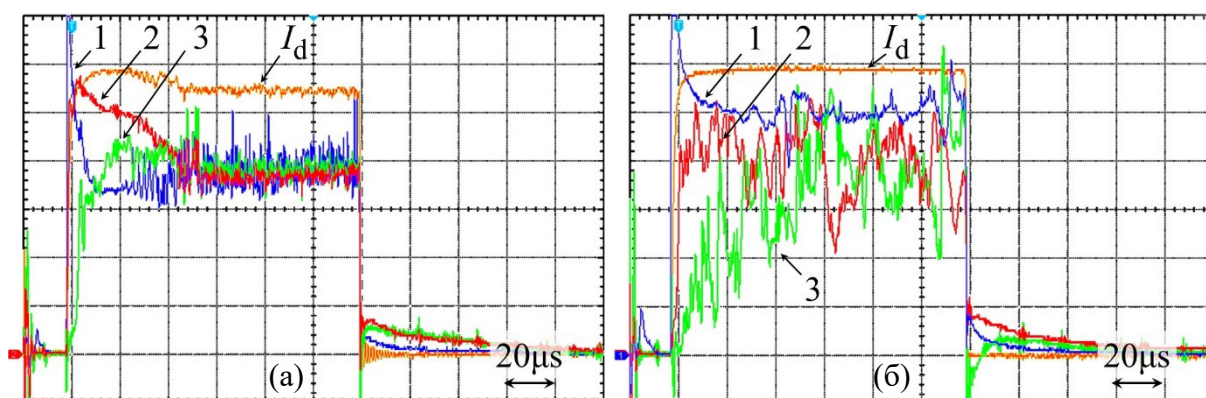


Рисунок 3.7 – Осциллограммы напряжения на резисторах ( $R_3=300$  Ом), установленных в цепи зондов.  $p=80$  мПа. Масштаб: 1 –  $I_{31}$  (16,5 мА/дел), 2 –  $I_{32}$  (6,6 мА/дел), 3 –  $I_{33}$  (а – 3,3 мА/дел, б – 1,65 мА/дел,  $I_d$  – ток разряда (10А/дел).

Поле соленоидов: а)  $B_1=20$  мТл, б)  $B_1=50$  мТл;  $B_2=50$  мТл.

По результатам измерений токов зондов были построены распределения этих токов в течение импульса (Рисунок 3.8). Видно, что в первый момент времени, соответствующий первым микросекундам генерации основного дугового разряда, ток на осевом зонде пятикратно выше тока соседнего зонда. Со временем радиальное распределение тока в области эмиссионной сетки имеет тенденцию к уширению, но даже в установившемся режиме, который в данном случае наступает примерно через 20 мкс, оно существенно неоднородное с величиной в центре вдвое большей, чем на радиусе 15 мм. Эти данные согласуются с результатами калориметрических измерений, полученными в работе [85], где с использованием секционированного калориметра

(Рисунок 2.6) проведены измерения распределения плотности энергии по сечению генерируемого пучка электронов для импульсов разной длительности.

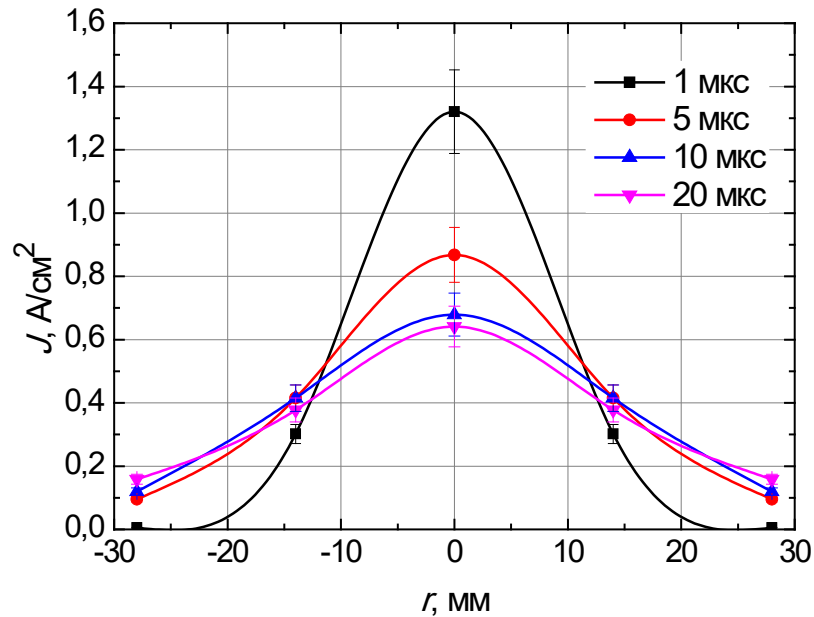


Рисунок 3.8 – Распределение плотности тока по зондам при  $B_1=20$  мТл для разных моментов времени в течение импульса тока разряда.

Авторы работы [85] наблюдали изменение диаметра пучка извлеченных из плазменного катода электронов при увеличении длительности импульса. Калориметр, расположенный на расстоянии 5 мм от эмиссионной сетки, регистрировал увеличение диаметра пучка по мере увеличения длительности импульса с 20 до 150 мкс (Рисунок 3.9), однако сам мог оказывать влияние на процессы генерации.

Увеличение ширины радиального профиля плотности тока вызывает соответствующую динамику профиля плотности энергии пучка электронов на коллекторе [86].

Таким образом, имеет место изменение распределения тока эмиссии как минимум в течение первых десятков микросекунд. Получено экспериментальное подтверждение предположения, что динамика радиального распределения энергии пучка вызвана пространственным перестроением разряда в плазменном эмиттере.

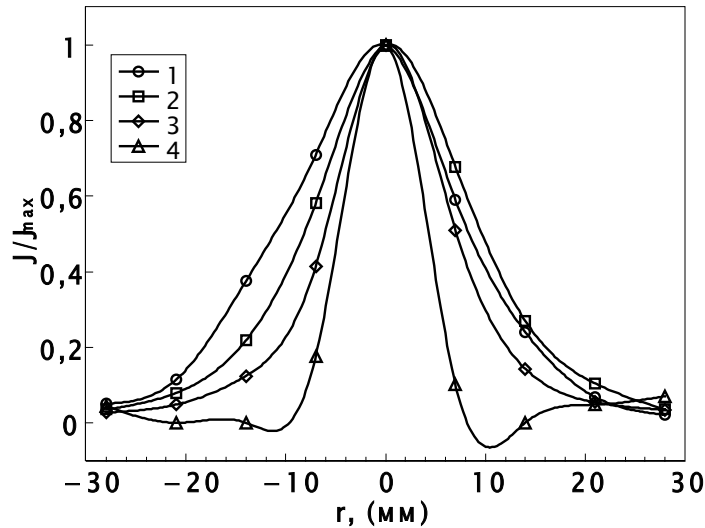


Рисунок 3.9 – Относительные распределения энергии по сечению электронного пучка на расстоянии 5 мм от эмиссионного электрода [85]. 1 –  $\tau=150$  мкс, 2 –  $\tau=100$  мкс, 3 –  $\tau=40$  мкс, 4 – 20 мкс.  $I_b=200$ А,  $B_1=50$  мТл,  $B_2=50$  мТл,  $U_g = 6$  кВ.

Пространственные характеристики плазмы и влияние магнитного поля в плазменном эмиттере с электродом 4 (Рисунок 2.1) исследовали с использованием численной модели в дрейфово-диффузионном приближении [87, 88] для усредненной плотности и энергии электронов плазмы,  $n_e=n_i$ . В плазменном эмиттере разрядная плазма формируется в неоднородном магнитном поле, которое влияет на подвижность заряженных частиц и распределение концентрации плазмы,  $B_1 = 17,5$  и  $35$  мТл – магнитное поле в области эмиссионного электрода. На рис. 3.10а показаны контурные линии концентрации разрядной плазмы  $n_1$  в сечении разрядной полости при токе разряда 100 А и напряжении 50 В. Температура и потенциал плазмы составляют, соответственно, 19,6 эВ и 13,5 В. С увеличением магнитного поля уменьшается подвижность заряженных частиц и увеличивается концентрация  $n_1$  на оси симметрии разрядной области и поверхности эмиссионного электрода. На рис. 3.10б при разных значениях магнитного поля показано распределение концентрации плазмы на эмиссионном электроде.

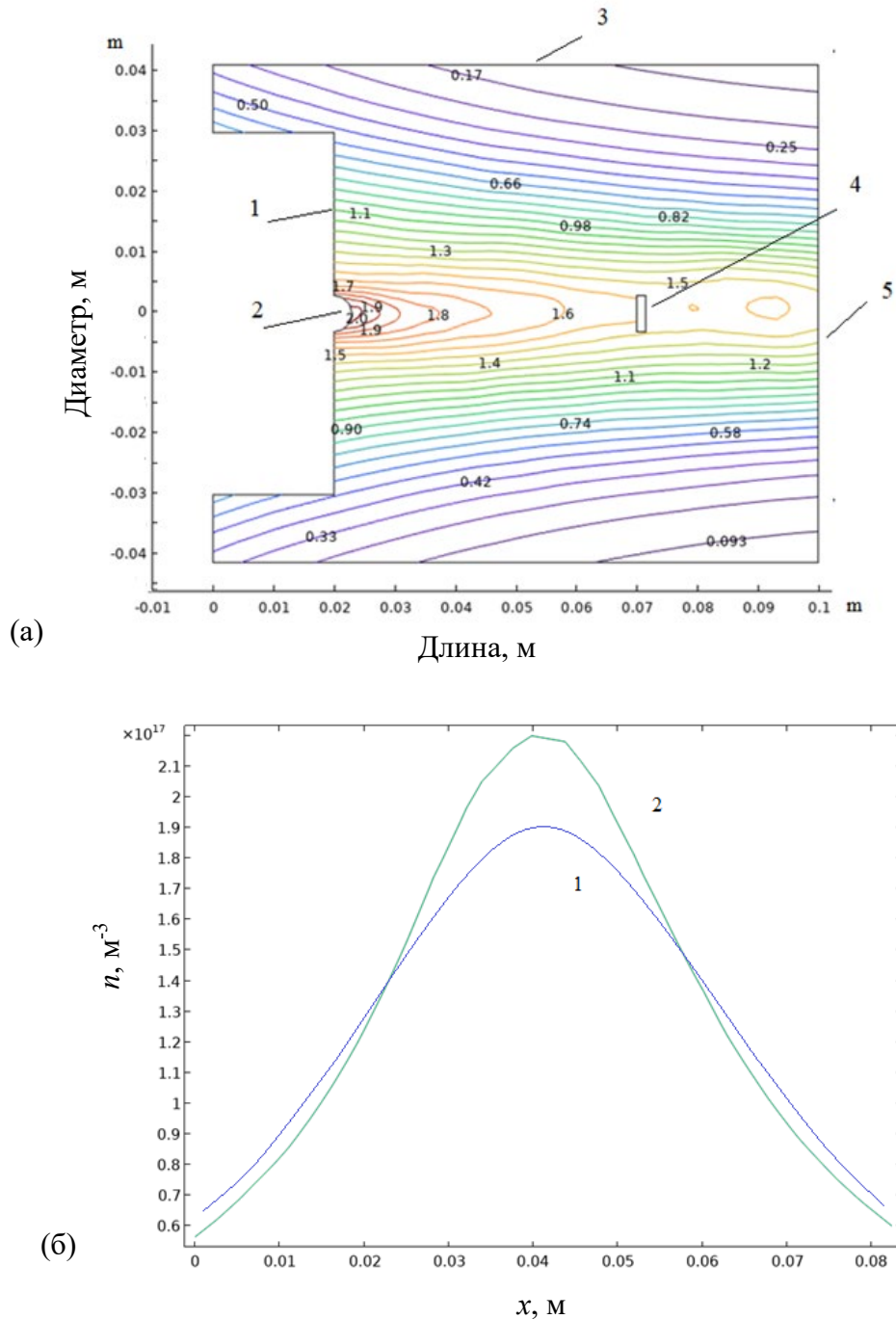


Рисунок 3.10 – Контурные линии концентрации разрядной плазмы ( $\times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ) в плазменном эмиттере (а): 1 – катод, 2 – источник электронов, 3 – полый анод, 4 – перераспределяющий электрод, 5 – эмиссионный электрод и распределение концентрации плазмы вдоль эмиссионного электрода (б): 1 –  $B_1 = 17,5 \text{ мТл}$ , 2 –  $35 \text{ мТл}$ .

Концентрация плазмы увеличивается практически линейно с ростом тока разряда: для  $p=110 \text{ мПа}$  при изменении тока разряда от 50 до 200 А концентрация плазмы в центральной области эмиссионной сетки возрастает с  $0,85 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$  до  $3,6 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

При перераспределении тока разряда между электродами 3, 4 и 5 (Рисунок 3.10) за счёт включения электродов 3 и 4 через резистор относительно электрода 5 изменяется распределение

концентрации разрядной плазмы  $n_1$ . Так для тока разряда 100 А при уменьшении суммарного тока на анод 3 и электрод 4 с 53 А до 0 (и увеличении тока на эмиссионном электроде с 47 до 100 А) концентрация плазмы на оси системы увеличивается с  $1.4 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$  до  $1.8 \times 10^{17} \text{ м}^{-3}$ .

### 3.3. Извлечение электронов из плазменного эмиттера

Источник электронов генерирует пучок с колоколообразным радиальным распределением плотности энергии. Характерный вид распределения в плоскости коллектора представлен на рисунке 3.11.

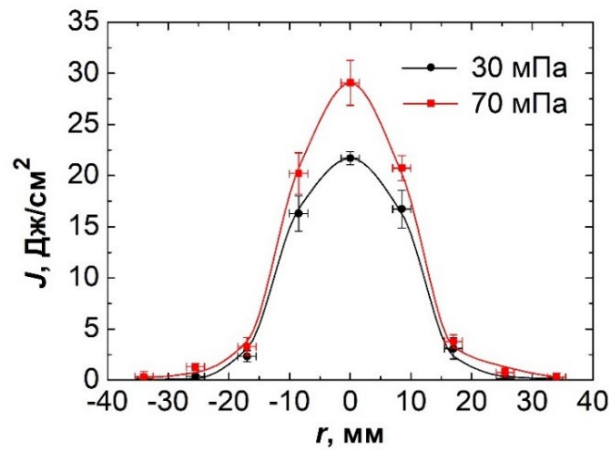
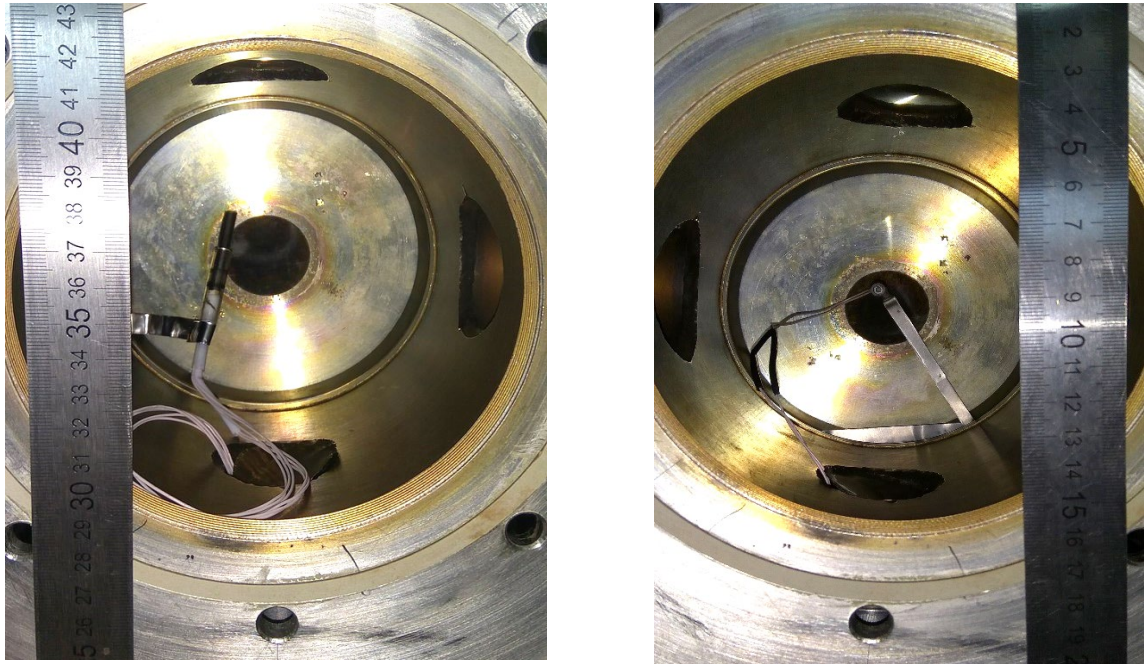


Рисунок 3.11 – Радиальное распределение плотности энергии пучка электронов в плоскости коллектора для  $I_d = 100 \text{ А}$ ,  $U_g = 14 \text{ кВ}$ ,  $\tau = 100 \text{ мкс}$ .

В плазменном эмиттере электронов с увеличенным анодом (Рисунок 2.8) при помощи плоского зонда с охранным кольцом (Рисунок 2.9) проведены измерения параметров плазмы. Для этого, зонд в эмиттере устанавливали в трёх позициях: сбоку от эмиссионной сетки диаметром 40 мм собирающей плоскостью перпендикулярно ей (Рисунок 3.12а), в центре разрядной ячейки на расстоянии 15 мм от эмиссионной сетки с такой же ориентацией относительно неё и внутри полого катода вдоль оси симметрии разрядной ячейки, как показано на рис. 3.12б.



(а)

(б)

Рисунок 3.12 – Размещение зонда в разрядной ячейке: а) сбоку; б) по центру

Потенциал плазмы измеряли при ускоряющем напряжении 14 кВ и без ускоряющего напряжения методом точки перегиба электронной ветви ВАХ. Результаты измерений для эмиссионной сетки 0,3×0,3 мм при токе разряда 100 А и давлении 40 мПа приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Потенциал плазмы и плотность электронного тока в разных областях эмиттера

	φ, В		Плотность электронного тока, А/см <sup>2</sup>	
	0	14	0	14
<b>Положение</b>				
Сбоку	8	45	0,6	≈ 0,7
В центре	6	-	15	-
Внутри полого катода	3	25	50	~ 30

Наблюдается анизотропия распределения электронного тока насыщения и увеличение потенциала катодной плазмы при отборе электронов на (22–37) В. Увеличение потенциала плазмы может провоцировать образование катодных пятен на поверхности эмиссионного электрода, обращённой к разряду, и на эмиссионной сетке, что в свою очередь, приведёт к неконтролируемому увеличению тока эмиссии и пробоем ускоряющего промежутка.

### 3.4. Оценка коэффициента извлечения электронов из сеточного плазменного эмиттера

В источнике электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом ток в ускоряющем промежутке  $I_g$  может быть записан в виде:

$$I_g = \alpha I_d + I_i(1 + \gamma_{ef}), \quad (3.1)$$

где  $\alpha = I_{em}/I_d$  – коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера, равный отношению тока эмиссии  $I_{em}$  к току разряда  $I_d$ ;  $I_i$  – ток ускоренных ионов из анодной плазмы;  $\gamma_{eff}$  – эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии с металла (сетки и периферийной части эмиссионного электрода, обращенной к коллектору) при бомбардировке ускоренными ионами эмиссионного электрода, учитывающий геометрическую прозрачность эмиссионного электрода.

Ранее для нижней границы рабочего давления в источнике «СОЛЮ» С.В. Григорьевым при участии членов коллектива ИСЭ СО РАН был экспериментально определен коэффициент извлечения электронов. В случае эмиссионной сетки с размером ячейки  $0,3 \times 0,3$  мм и давления аргона ниже 10 мПа он составил  $\alpha \approx 0,55$  [65]. Считая коэффициент извлечения постоянным, был также определен эффективный коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода из стали 12Х18Н10Т, имеющего эмиссионное отверстием диаметром 40 мм, перекрытое сеткой с геометрической прозрачностью около 0,5 [65]. Так, для ионов аргона с энергией 25 кэВ он составил  $\gamma_{eff} \approx 1,6$ , что хорошо согласуется с литературными данными [89]. Между энергией, измеренной калориметром за импульс, и энергией, посчитанной с использованием полученных значений коэффициента извлечения и коэффициента вторичной эмиссии, в широком диапазоне рабочих параметров на нескольких экспериментальных стендах не обнаружено существенных расхождений.

Благодаря усилиям авторов работы [65], направленным на определение зависимости  $\gamma_{eff}(U_g)$  с хорошей точностью, метод позволяет рассчитать энергию на коллекторе с отклонением от измеренного значения примерно  $\pm 2,5\%$ . В зависимости от параметров генерации в диапазоне давления (30–50) мПа, ускоряющего напряжения (14–20) кВ, тока разряда (35–230) А варьирование в расчётах коэффициента извлечения на 0,05–0,13 относительно принятого 0,55 приводит к изменению расчётного значения энергии за импульс не более, чем на  $\pm 2,5\%$ . При этом для более высоких давлений и ускоряющих напряжений диапазон варьирования коэффициента извлечения, не приводящего к ухудшению точности метода, выше.

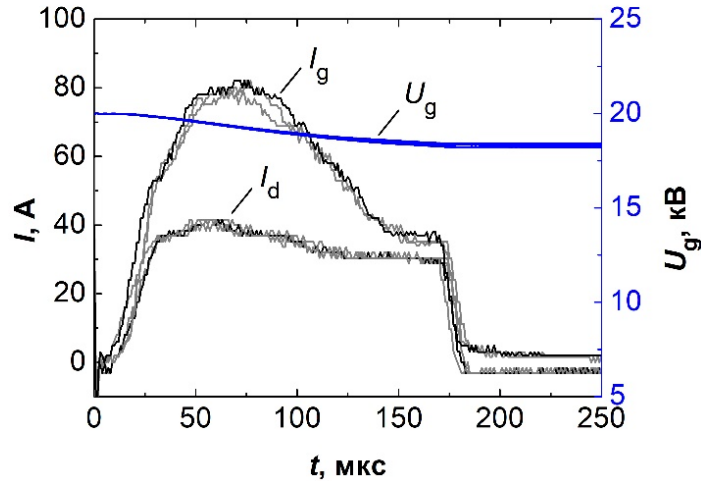


Рисунок 3.13 – Характерные осциллограммы тока разряда  $I_d$ , тока в ускоряющем промежутке  $I_g$  источника электронов при  $p = 35$  мПа и магнитном поле 50 мТл.

Например, оценим энергию за импульс для режимов, осциллограммы которых представлены на рисунке 3.13. Они были получены при давлении 35 мПа. Измеренная энергия, приносимая за импульс пучком на коллектор, составила  $(134 \pm 5)$  Дж, расчётная энергия, если принять  $\alpha = 0,4$  составила  $(127 \pm 9)$  Дж, при  $\alpha = 0,55$  –  $(132 \pm 9)$  Дж, а при  $\alpha = 0,75$  –  $(138 \pm 9)$  Дж, что всего на 3% больше измеренной. Такие оценки дают долю тока ионов в токе ускоряющего промежутка  $\approx 30\%$ , если  $\alpha$  лежит в диапазоне  $(0,4–0,55)$ , и 25% – если в приведённом режиме  $\alpha = 0,75$ . Оценки среднего за импульс тока ионов согласно калориметрическим данным по формуле (3.2), приведённой ниже, лежат в указанном диапазоне.

$$I_i = \frac{\int_0^\tau I_g U_g dt - E_b}{\bar{U}_g \tau}, \quad (3.2)$$

где  $\tau$  – длительность импульса,  $I_g$  – ток в цепи ускоряющего промежутка,  $U_g, \bar{U}_g$  – напряжение на ускоряющем промежутке и его среднее за импульс значение,  $E_b$  – измеренная калориметром энергия пучка.

Измерения радиального распределения тока в плазменном катоде в разные моменты времени, измерения потенциала катодной плазмы и анализ осциллограмм основных электрических цепей источника электронов свидетельствуют о наличии переходных процессов на начальной стадии формирования пучка в первые (10–50) мкс. В последующие интервалы времени тоже возможны изменения условий генерации вследствие инерционности процессов десорбции газа с электродов источника электронов и испарения мишени, а, следовательно, стоит ожидать изменения коэффициента  $\alpha$  в течение всего импульса пучка субмиллисекундной длительности.

Отключение тока разряда приводит к росту потенциала катодной плазмы относительно эмиссионного электрода (6 на рис. 2.1). Причиной изменения потенциала, вероятно, является уменьшение числа отрицательных зарядов в плазме ввиду прекращения основного канала их поступления и быстрого ухода электронов в ускоряющий промежуток, а также на положительно смещенные электроды разрядной ячейки. После прекращения тока разряда катод разрядной ячейки и перераспределяющий электрод (4 на рис. 2.1), по-прежнему подверженные бомбардировке ускоренными ионами из распадающейся анодной плазмы, приобретают положительный потенциал относительно эмиссионного электрода. При этом катод разрядной ячейки оказывается изолированным от остальных электродов ячейки, и поступающий ток ионов должен быть компенсирован таким же по величине током плазменных электронов. Перераспределяющий электрод соединен с эмиссионным электродом через резистор  $R_{ha} = 5$  Ом, на котором за время среза импульса тока разряда увеличивается автосмещение потенциала с отрицательных 8 В – положительных 9 В до (5–15) В, что затрудняет выход вторичных электронов из электродов в катодную плазму. В конфигурациях электронных источников, где перераспределяющий электрод отсутствует, например, в эмиттере с увеличенным анодом, вводится отдельный электрод обратной связи 2 (Рисунок 2.8 на стр. 27) [90]. Таким образом, в рассматриваемых условиях отключение тока разряда приводит к прекращению эмиссии электронов из плазменного эмиттера.

Применение бестрансформаторного схемотехнического решения на выходе источника электропитания разрядной ячейки плазменного катода [46, 71] позволило наблюдать на срезе импульса тока в цепи ускоряющего промежутка два участка с разной скоростью и законом изменения тока (Рисунок 3.14). Согласно формуле (3.1), первый участок соответствует срезу импульса тока плазменного катода, второй – экспоненциальный спад тока ионов, которые извлечены из распадающейся анодной плазмы в отсутствие эмиссии электронов из разрядной ячейки плазменного эмиттера, и соответствующий ток вторичных электронов.

Область релаксации анодной плазмы отчетливо видна на осциллограмме тока ускоряющего промежутка (Рисунок 3.14б). При давлении рабочего газа – аргона в вакуумной камере 65 мПа она следует за областью ступенчатого изменения с характерным временем (0,25–0,4) мкс и скоростью уменьшения (100–120) А/мкс. Аппроксимируя участок осциллограммы длительностью 10 мкс было оценено время релаксации плазмы, которое при указанном давлении составило (10–15) мкс. Такое существенное время может быть связано с поддержанием концентрации за счёт ускоренных вторичных электронов и затрудненным уходом электронов на стенки трубы дрейфа поперек магнитного поля.

При относительно низком давлении, доля тока ионов от общего тока в ускоряющем промежутке за время среза импульса тока разряда (0,3–0,4) мкс существенно не изменяется, и

согласно формуле (3.1), можно заключить, что после прекращения импульса тока разряда  $I_d$  ток в ускоряющем промежутке  $I_g$  уменьшится именно на величину тока эмиссии  $I_{em}$  из катодной плазмы.

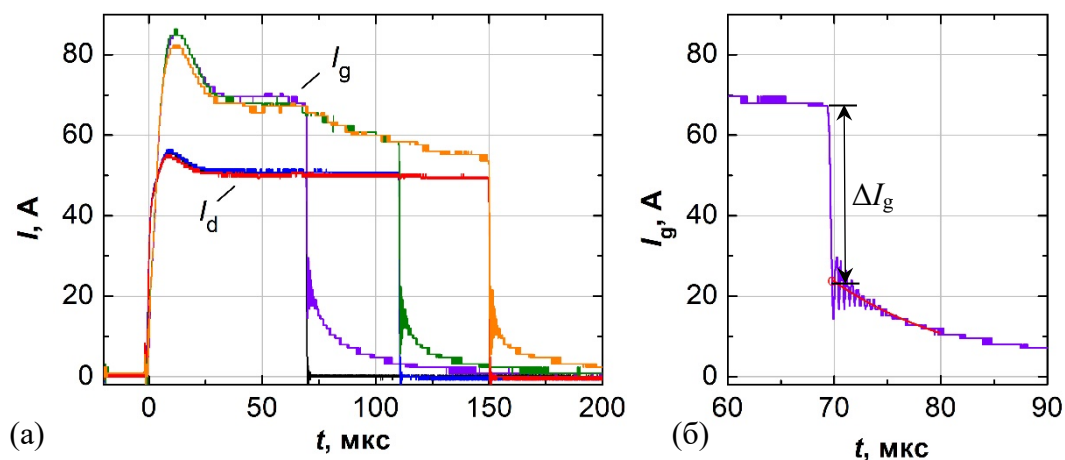


Рисунок 3.14 – Характерные осциллограммы тока разряда  $I_d$  и тока в ускоряющем промежутке  $I_g$  источника электронов при  $p = 65$  мПа,  $U_g = 7$  кВ и магнитном поле 50 мТл.

Оценим изменение ионного тока в ускоряющем промежутке при давлении 15 мПа и 65 мПа. Будем предполагать, что коэффициент извлечения не изменяется в течение импульса более, чем на величину, приводящую к изменению расчётной энергии по отношению к измеренной калориметром на 5% при заданном постоянном значении коэффициента. При давлении 15 мПа и ускоряющем напряжении 20 кВ ионный ток не превышает 2 А, что незначительно по сравнению с током ускоряющего промежутка около 30 А. За время среза импульса тока разряда ионный ток не изменяется. При давлении 65 мПа и том же ускоряющем напряжении, ионный ток в конце импульса длительностью 110 мкс составляет (20–28) А из общего тока ускоряющего промежутка 90 А. За время среза импульса тока разряда согласно оценкам, ионный ток уменьшается до примерно 17 А. При давлении 65 мПа и ускоряющем напряжении 7 кВ ионный ток в конце импульса длительностью 110 мкс составляет (14–19) А из общего тока ускоряющего промежутка около 60 А. За время среза импульса тока разряда согласно оценкам ионный ток уменьшается до примерно 8 А. Таким образом, при давлении 65 мПа, в отличие от 15 мПа, ток в цепи ускоряющего промежутка при отключении тока разряда уменьшается существенно больше, чем на величину тока эмиссии из катодной плазмы.

Хорошая повторяемость режимов работы исследуемого источника электронов от импульса к импульсу позволяет изменять длительность импульса, и полученные в разных импульсах на разной длительности значения тока эмиссии интерпретировать, как изменение в течение единого импульса. Коэффициент  $\Delta I_g / I_d$  можно интерпретировать как коэффициент извлечения, только если концентрация анодной плазмы и доля тока ионов от общего тока в цепи

ускоряющего промежутка за время среза импульса тока разряда плазменного катода существенно не изменяется [91], что в нашем случае возможно при малом для рабочего диапазона давлении. Если указанное условие не выполняется, полученное значение будет выше коэффициента извлечения, и требуется учитывать изменение ионного тока и, соответственно, тока вторичных электронов на анализируемом участке среза импульса тока ускоряющего промежутка.

Стоит отметить, что при уменьшении длительности импульса уменьшается энергия пучка, приносимая на коллектор. В результате, в отдельных режимах генерации пучка осциллограммы тока в ускоряющем промежутке для импульсов (10–30) мкс и (100–150) мкс могли отличаться в амплитуде до 15%. Для нивелирования этого эффекта и сохранения одинаковой средней мощности пучка, частота следования импульсов варьировалась в пределах (0,3–1) Гц.

Аналізу подвергались характерные осциллограммы тока ускоряющего промежутка. Аппроксимация выполнялась экспоненциальной функцией методом наименьших квадратов идентично для каждой осциллограммы стандартными средствами пакета Excel без какой-либо ручной предобработки. Полученные значения коэффициента  $\Delta I_g/I_d$  (Рисунок 3.15) для давления 15 мПа согласуются с ранее определенной величиной коэффициента извлечения, а изменение в течение импульса было менее 10% от среднего значения.

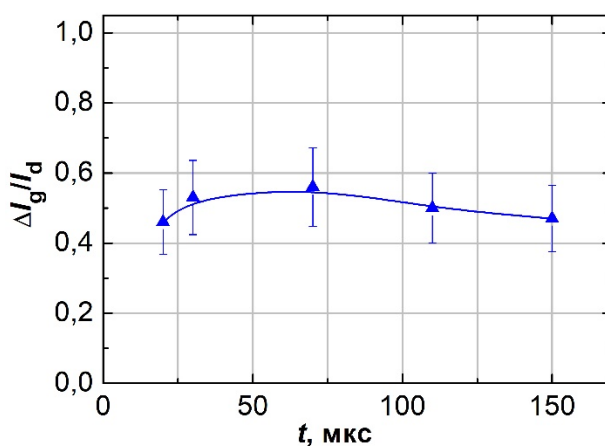


Рисунок 3.15 – Динамика коэффициента  $\Delta I_g/I_d$  плазменного эмиттера при давлении 15 мПа и ускоряющем напряжении 20 кВ

Таким образом, в настоящей работе предложен способ оценки эффективного коэффициента извлечения электронов из плазменного эмиттера на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы, применимый в условиях ионного потока на эмиссионный электрод и в разрядную ячейку эмиттера. Метод полезен в исследованиях генерации и транспортировки пучка электронов в системах, где прямые измерения коэффициента извлечения затруднены или

невозможны вследствие конструктивных особенностей или невозможности разделения составляющих тока эмиссии.

### *3.5. Влияние потока ускоренных ионов из анодной плазмы на потенциал плазмы дугового разряда*

Данный раздел освещает исследования функционирования плазменного эмиттера электронов на основе дугового разряда низкого давления при наличии плазмы в пространстве дрейфа пучка электронов. Целью данного раздела работы было определить характер влияния ускоренного ионного потока, поступающего в пространство эмиттера из анодной плазмы.

Исследования проведены на источнике электронов с увеличенным анодом (Рисунок 2.8), допускающим зондовые измерения параметров катодной плазмы.

Величину ионного тока на эмиссионный электрод оценивали из следующих предположений: 1) ток в цепи ускоряющего промежутка состоит из тока эмитированных из плазменного катода первичных электронов, тока ионов из анодной плазмы и тока вторичных электронов; 2) пучок электронов транспортируется до коллектора без потерь; 3) энергия, принесенная на коллектор, включает в себя энергию ускоренных первичных и вторичных электронов, ионы и электроны анодной плазмы не приносят энергию на коллектор. Таким образом, сравнивая интеграл произведения тока и напряжения в ускоряющем промежутке с энергией, измеренной на коллекторе, можно оценить ионный ток на эмиссионный электрод [18]:

$$I_i = \frac{E_g - E_b}{U\tau}, \quad (3.3)$$

где  $E_g$  – интеграл произведения тока и напряжения в ускоряющем промежутке,  $E_b$  – измеренная на коллекторе энергия,  $U$  – напряжение в ускоряющем промежутке,  $\tau$  – длительность импульса.

Потери пучка электронов при транспортировке в условиях эксперимента, то есть при давлении рабочего газа порядка (6–90) мПа, в продольном магнитном поле (30–50) мТл происходят в основном за счёт попадания электронов периферийной части пучка на стенки трубы дрейфа.

Для обработки материалов наиболее часто используются режимы с транспортирующим магнитным полем  $\geq 30$  мТл и давлением (20–40) мПа. Установлено, что в этом случае потери пучка на стенки трубы дрейфа не превышают 2,5% от его общего энергосодержания, поэтому в оценках ими можно пренебречь. Зависимость потерь от давления рабочего газа приведена на рис. 3.16.

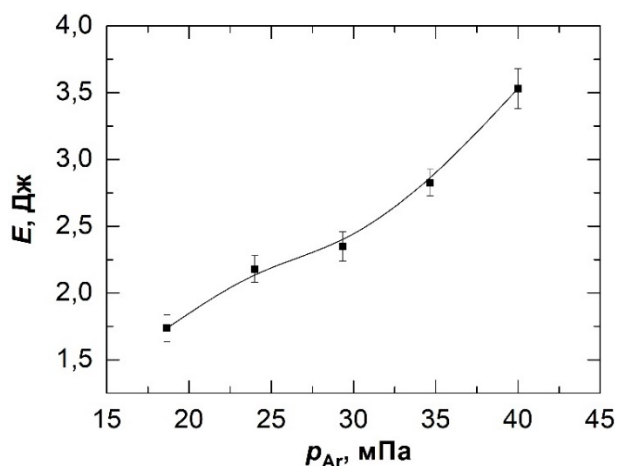


Рисунок 3.16 – Интегральные потери энергии на трубу дрейфа в зависимости от давления.  $I_d = 100$  А,  $\tau = 100$  мкс,  $U_g = 15$  кВ,  $B_z = 30$  мТл.

Увеличение потерь в абсолютном выражении связано с ростом тока пучка при увеличении давления рабочего газа. При большем давлении, увеличивается и концентрация анодной плазмы, за счёт чего растёт величина ионного тока на эмиссионный электрод и, соответственно, ток вторичных электронов.

Измерение энергии, принесенной пучком электронов на коллектор, производили калориметром (Рисунок 2.5), описанным ранее в разделе «Методика эксперимента».

Для измерения потенциала катодной плазмы в разрядную ячейку на расстоянии (10 – 15) мм от торца анода и (5–10) мм от края эмиссионного отверстия к периферии помещали плавающий эмиссионный зонд (Рисунок 2.11). Для измерения плотности ионного тока насыщения в ту же область помещали плоский зонд диаметром 2 мм с охранным кольцом (Рисунок 2.9).

Токи основных цепей источника электронов измеряли поясами Роговского, ускоряющее напряжение высоковольтным щупом 1000:1 Актаком АСА-6039, а напряжение горения разряда плазменного катода щупом 100:1 Hoden Electronics HP9258 и, также, поясом Роговского, измеряя ток в цепи нагрузочного резистора, установленного параллельно выходу блока питания разряда.

Разряд плазменного катода имеет ВАХ, типичную для дугового разряда низкого давления. При давлении 90 мПа для катода с эмиссионной сеткой 0,18×0,18 мм изменение тока разряда в пределах от 100 до 425 А приводит к незначительному росту напряжения горения – от 50 до примерно 60 В. Снижение рабочего давления до 40 мПа не приводит к существенному изменению ВАХ. Напряжение горения в этом случае изменяется от 55 до 75 В при том-же изменении тока.

Стоит отметить, что в силу самой природы разряда с катодным пятном и некоторых конструктивных особенностей катодного электрода, напряжение горения от импульса к

импульсу может изменяться на 5 или даже 10 В. Иногда изменения можно наблюдать в течение импульса тока разряда, но в среднем ВАХ имеет характер, описанный выше.

Изменение рабочего давления в диапазоне от 40 до 90 мПа при токе разряда 100 А не вызывает заметного изменения напряжения горения разряда, если из него не извлекают электроны. Однако при подаче ускоряющего напряжения на эмиссионный электрод, напряжение между катодом и анодом разрядной ячейки уменьшается, что особенно заметно при повышенном давлении. Так, например, при ускоряющем напряжении 14 кВ напряжение на разрядном промежутке с увеличением давления немонотонно уменьшается от 45 до 5 В, а потенциал катодной плазмы относительно анода возрастает, соответственно, от 5 до 45 В (Рисунок 3.17). Уменьшение ускоряющего напряжения до 8 кВ не приведет к заметным изменениям на графиках.

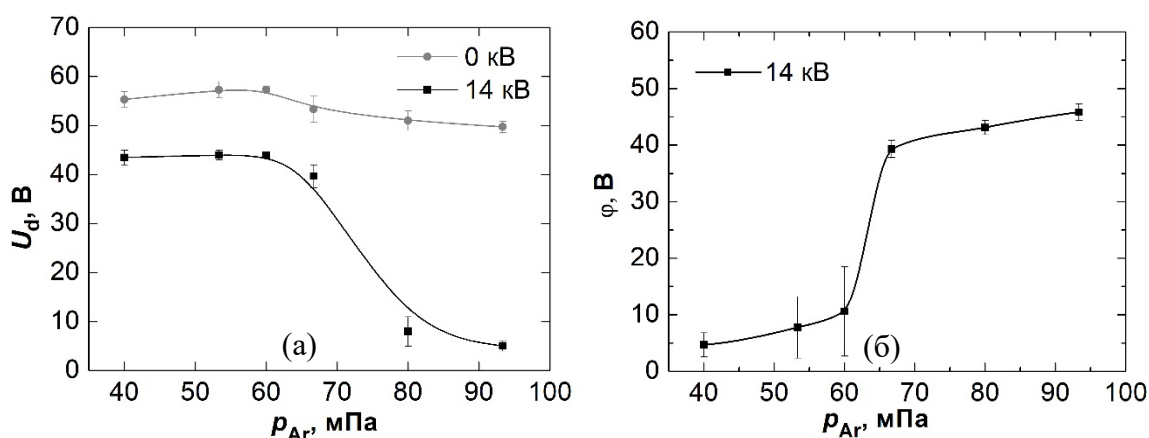


Рисунок 3.17 – Зависимость напряжения на разрядном промежутке (а) и потенциала плазмы (б) от давления рабочего газа для катода с эмиссионной сеткой  $0,18 \times 0,18 \text{ мм}^2$ ,  $I_d = 100 \text{ А}$ .

Увеличение потенциала плазмы относительно анода при извлечении из разряда электронов может свидетельствовать об увеличении коэффициента извлечения и/или об увеличении ионного потока через ячейки эмиссионной сетки. Ток разряда начинает замыкаться на коллектор через ускоряющий промежуток, а на анод разрядной ячейки в меньшей степени.

Установлено также, что увеличение тока разряда от 100 до 200 А при давлении 90 мПа приводит к увеличению потенциала плазмы на 17% (от  $\approx 45 \text{ В}$  до  $\approx 53 \text{ В}$ ), а напряжение на межэлектродном промежутке, соответственно, уменьшается так, что катодное падение потенциала остается почти неизменным. Поэтому уменьшение напряжения на промежутке анод-катод также можно рассматривать в качестве величины, характеризующий воздействие на плазменный катод.

В следующем эксперименте при относительно невысокой емкости накопительной батареи (6 мкФ) выбрано относительно низкое начальное ускоряющее напряжение (менее 10 кВ), благодаря чему при токе в цепи ускоряющего промежутка  $\sim 500 \text{ А}$  через 100 мкс накопительная

батарея полностью разряжается (Рисунок 3.18). На том же рисунке можно видеть снижение напряжения горения разряда в условиях электронной эмиссии с плазменного катода.

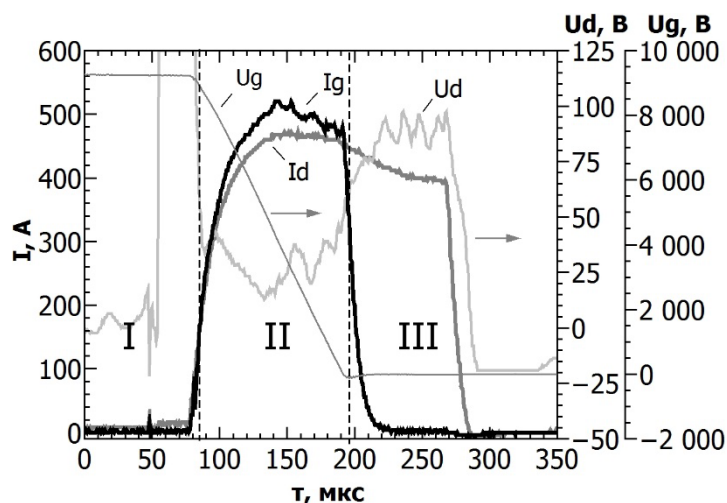


Рисунок 3.18 – Осциллограммы тока разряда  $I_d$ , тока в ускоряющем промежутке  $I_g$ , напряжения анод-катод плазменного эмиттера  $U_d$  и ускоряющего напряжения  $U_g$  источника электронов. Использовалась эмиссионная сетка с ячейкой  $0,3 \times 0,3$  мм, давление аргона в камере – 13 мПа.

Между областью I и II на рас. 3.18 происходит зажигание разряда плазменного катода. В отсутствие эмиссии (область III) напряжение горения разряда  $\sim 90$  В, что втрое выше напряжения горения в условиях электронной эмиссии из дугового разряда плазменного катода. Также можно заметить переходную область при изменении ускоряющего напряжения от нуля до  $\sim 1$  кВ, когда межэлектродное напряжение плавно изменяется на значительную величину.

На рис. 3.19 отражен характер изменения напряжения горения разряда в зависимости от ускоряющего напряжения в течение единичного импульса для двух давлений и двух различных эмиссионных сеток. Результаты получены при начальном ускоряющем напряжении 6 кВ и менее, которое не используется в технологических процессах обработки материалов, но позволяет наглядно видеть изменение напряжения анод-катод газоразрядной ячейки плазменного катода по мере уменьшения ускоряющего напряжения за счёт разрядки накопительной емкости 6 мкФ за время (150–200) мкс.

Видно, что в области ускоряющих напряжений от нуля до (3–5) кВ наблюдается снижение напряжения горения разряда с ростом ускоряющего напряжения. Изменение наиболее заметно для электронного источника с эмиссионной сеткой  $0,3 \times 0,3$  мм<sup>2</sup> с большей прозрачностью и растет с увеличением давления рабочего газа. Стоит отметить, что при больших ускоряющих напряжениях, характерных для технологического применения электронного источника, напряжение горения практически не изменяется от величины ускоряющего напряжения. Для сетки  $0,3 \times 0,3$  мм<sup>2</sup> оно составляет  $\sim 55$  В при давлении 7 мПа и  $\sim -25$  В при давлении 22 мПа для

напряжений до 20 кВ. Использование сетки  $0,18 \times 0,18 \text{ мм}^2$  позволяет получить более высокие напряжения анод-катод: 65 и 40 В при 7 и 22 мПа соответственно.

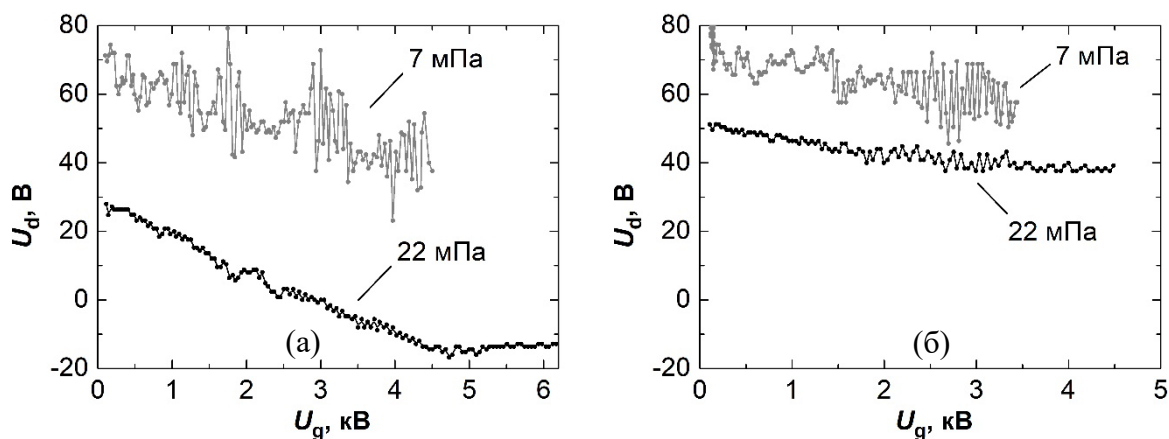


Рисунок 3.19 – Изменение напряжения горения разряда в течение импульса в зависимости от ускоряющего напряжения при токе разряда 235 А. а) с эмиссионной сеткой  $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$  с геометрической прозрачностью 50%; б) с эмиссионной сеткой  $0,18 \times 0,18 \text{ мм}^2$  с прозрачностью 45% для двух давлений.

Вычисленное из calorиметрических измерений по формуле (3.1) значение ионного тока на эмиссионный электрод в зависимости от давления рабочего газа приведено на рис. 3.20. Стоит отметить, что напряжение на разрядном промежутке без эмиссии в этих условиях максимально изменяется в пределах от 54 до 50 В от минимального до максимального давления.

На представленном графике наблюдается корреляция между величиной ионного тока в цепи ускоряющего электрода и напряжением межэлектродного промежутка плазменного катода. Для подтверждения этого факта, в пространстве транспортировки электронного пучка организовали дополнительную ионизацию рабочего газа путем создания несимметричного отражательного разряда. Для этого, в цепь коллектора источника электронов поместили проволочный резистор сопротивлением 0,2 Ом. При протекании тока пучка через резистор на нем образуется падение напряжения. Таким образом, на коллекторе электронного источника в течение импульса тока пучка присутствует отрицательный потенциал автосмещения, который является отражающим для электронов анодной плазмы. Так как дрейф электронов на стенки вакуумной камеры и трубы дрейфа затруднен из-за магнитного поля, а попадание электронов на эмиссионный электрод невозможно из-за высокого отрицательного потенциала, отраженные электроны будут осциллировать в пространстве дрейфа и дополнительно ионизовать рабочий газ, если имеют достаточную энергию. Такой подход позволяет увеличить концентрацию анодной плазмы при неизменном давлении рабочего газа.

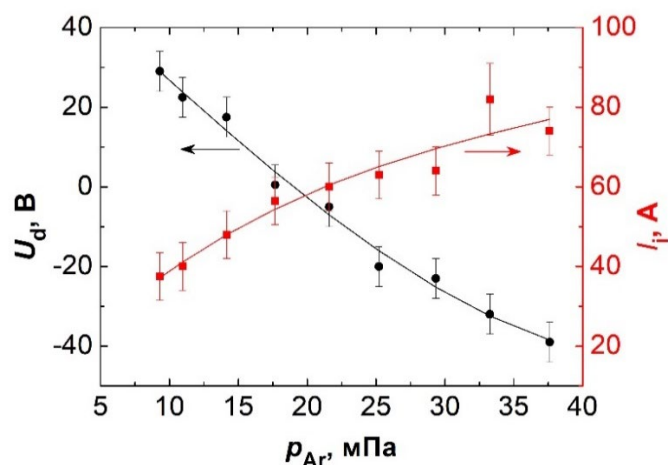


Рисунок 3.20 – Изменение ионного тока с границы анодной плазмы в зависимости от давления рабочего газа и соответствующее напряжение на разрядном промежутке. Сетка  $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ ,  $I_d = 100 \text{ А}$ ,  $U_g = 10 \text{ кВ}$ .

Характерные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке и потенциала накаливаемого зонда в разрядной ячейке плазменного катода приведены на рис. 3.21.

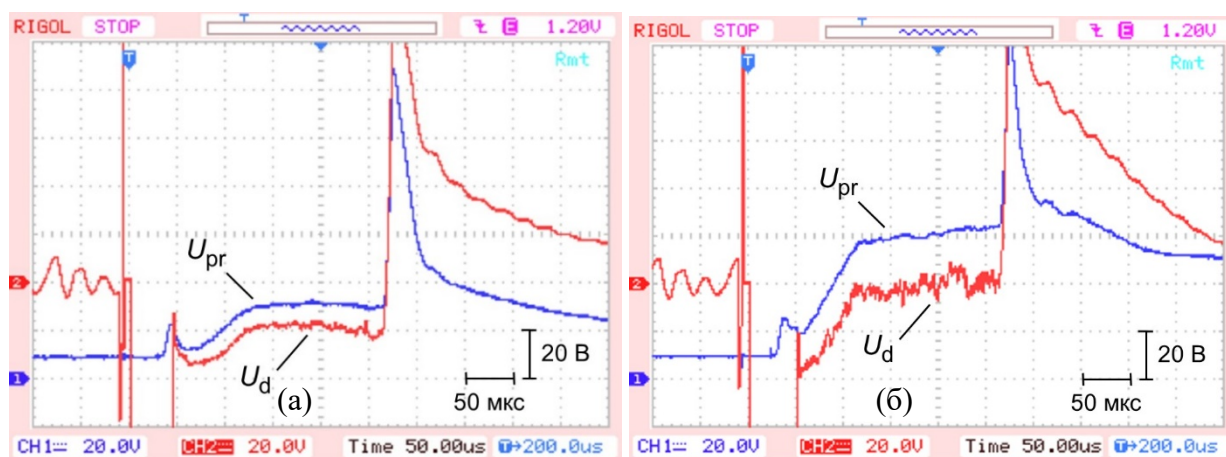


Рисунок 3.21 – Характерные осциллограммы напряжения на эмиссионном зонде (синий) и напряжения разрядного промежутка (красный) в обычных условиях (а) и с дополнительной ионизацией (б).  $I_d = 100 \text{ А}$ ,  $p_{Ar} = 67 \text{ мПа}$ ,  $U_g = 6 \text{ кВ}$ .

Увеличение концентрации анодной плазмы путем организации несимметричного отражательного разряда в пространстве транспортировки электронного пучка привело к увеличению потенциала плазмы относительно анода с 30 до 60 В. Последний факт свидетельствует о существенном влиянии анодной плазмы, а именно ионного потока с ее границы, на работу плазменного эмиттера электронов.

Имеет место эффект уменьшения напряжения разрядного промежутка плазменного катода с увеличением тока разряда в условиях генерации пучка электронов (Рисунок 3.22). При этом без

эмиссии оно максимально изменяется в пределах от 50 до 55 В от режима «65 А» до «180 А». Указанный эффект также можно связать с увеличением ионного тока.

Даже незначительное, от 0,3 кВ, ускоряющее напряжение увеличивает скорость нарастания концентрации катодной плазмы в периферийной области разрядной ячейки (за эмиссионной сеткой). На рис. 3.23 приведены осциллограммы ионного тока насыщения при разных ускоряющих напряжениях.

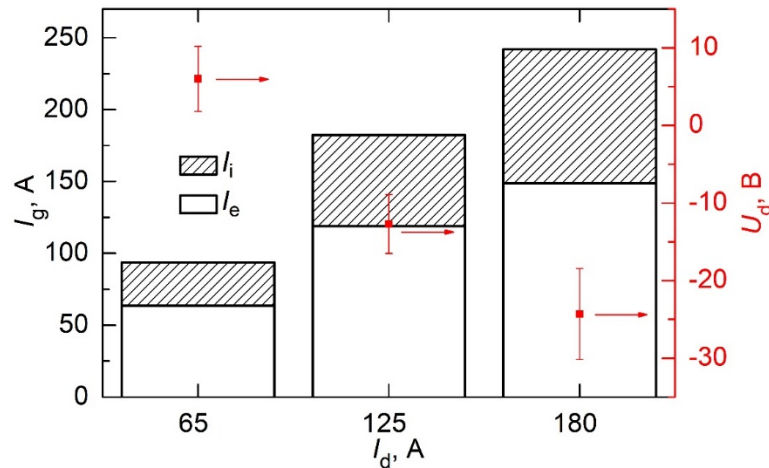


Рисунок 3.22 – Зависимость компонент тока в ускоряющем промежутке и напряжения анод-катод разрядной ячейки от тока разряда.  $U_g = 10$  кВ,  $p_{Ar} = 15$  мПа,  $B_1 = 50$  мТл,  $B_2 = 50$  мТл.

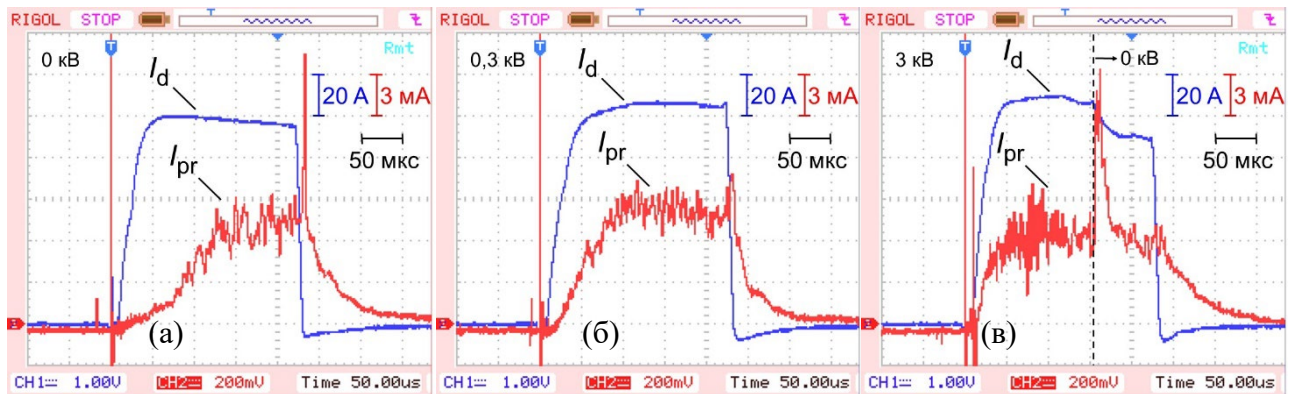


Рисунок 3.23 – Осциллограммы тока разряда (синий) и тока ионного насыщения (красный) при разном ускоряющем напряжении: *a* – 0 кВ, *б* – 0,3 кВ, *в* – 3 кВ.

Стоит отметить, что электронный ток на зонд в этих случаях практически повторяет ток разряда и не имеет затянутого фронта.

Таким образом, показано, что с увеличением ионного тока в область разрядной ячейки плазменного эмиттера электронов на основе дугового разряда низкого давления увеличивается потенциал катодной плазмы относительно анода и уменьшается напряжение анод-катод разрядной ячейки. В исследуемом диапазоне параметров в пределах имеющейся погрешности

экспериментов характер зависимости грубо можно считать линейным. Также замечено, что наличие эмиссии электронов и, как следствие, анодной плазмы увеличивает скорость нарастания концентрации катодной плазмы на периферии разрядной ячейки.

### *3.6. Выводы*

В ходе выполнения работы предложен способ оценки коэффициента извлечения электронов в источнике электронов с плазменным катодом и анодом по срезу импульса тока в ускоряющем промежутке.

ВАХ разряда, формирующего плазменный катод в исследуемом источнике электронов имеет слаборастущий характер и существенно не отличается для стандартного источника «СОЛО» и источника с увеличенным анодом.

В отсутствие извлечения электронов при давлении 70 мПа для катода с эмиссионной сеткой 0,18×0,18 мм, изменение тока разряда в пределах от 100 до 425 А приводит к незначительному росту напряжения горения – от 50 до примерно 60 В. При давлении 30 мПа напряжение на промежутке анод-катод изменяется от 55 до 75 В при том же изменении тока.

В условиях эмиссии электронов через ячейки сетки 0,18×0,18 мм при ускоряющем напряжении (5–25) кВ напряжение на разрядном промежутке с увеличением давления от 40 до 90 мПа немонотонно уменьшается от 45 до 5 В, а потенциал катодной плазмы относительно анода возрастает, соответственно, от 5 до 45 В. Показано, что уменьшение напряжения анод-катод и соответствующее увеличение потенциала разрядной плазмы всегда сопровождается увеличением тока ионов в разрядную ячейку плазменного катода.

Возможно сочетание параметров, при котором напряжение на промежутке анод-катод заметно не изменяется с появлением эмиссии электронов из плазменного катода. Это мелкая эмиссионная сетка, например, 0,18×0,18 мм, относительно низкое давление, например, 12,5 мПа.

Показано, что в источнике электронов «СОЛО» имеет место изменение распределения плотности тока эмиссии с течением времени. В первые микросекунды горения разряда ток эмиссии в центральной области плазменного катода без перераспределяющего электрода может пятикратно превышать соответствующее значение на радиусе 15 мм и двукратно превышать стационарное значение. Стационарное распределение устанавливается через (10–50) мкс.

Увеличение потенциала катодной плазмы под действием потока ионов из анодной плазмы или с увеличением давления газа, а также превышение тока эмиссии электронов в первые микросекунды существования разряда плазменного катода над стационарным значением являются факторами, дестабилизирующими работу плазменного источника электронов и повышающими вероятность пробоя ускоряющего промежутка.

## ГЛАВА 4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Промышленные источники электронов обладают чрезвычайно высокой надёжностью, предсказуемостью и повторяемостью результатов воздействия пучка. Пробой ускоряющего промежутка промышленного источника – зачастую недопустимая аварийная ситуация. Разрабатываемое экспериментальное оборудование должно не только демонстрировать ранее недостижимые параметры или режимы, позволяющие получить существенные полезные эффекты, сложно реализуемые иным способом, но и стабильно работать. Очевидно, пробой ускоряющего промежутка – нежелательный, сложноконтролируемый фактор, ухудшающий воспроизводимость результатов электронно-пучкового воздействия, сокращающий срок службы эмиссионной сетки. Плазменные источники электронов на основе дугового разряда могут быть спроектированы для широкого диапазона параметров пучка. Наряду с эффективным кондиционированием ускоряющего промежутка ПИЭЛ в зависимости от параметров пучка, в первую очередь от длительности импульса, наиболее целесообразным будет один из рассмотренных ниже способов снижения количества электрических пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка, экспериментально подтверждённых на источнике электронов «СОЛО».

### *4.1. Изменение скорости роста тока разряда*

В настоящем исследовании перед прямоугольным импульсом тока разряда (Рисунок 4.1а) добавили область, где ток увеличивается сравнительно медленно (Рисунок 4.1б). Управление формой импульса осуществляли системой электропитания с подключаемыми в течение импульса балластными сопротивлениями (Рисунок 2.4 на стр. 24). Среднюю скорость роста тока в ускоряющем промежутке уменьшили с 65 до 9 А/мкс, и таким образом сформировали фронт тока  $\sim 20$  мкс, за время которого распределение тока в плазменном катоде принимает стационарный вид.

Пучком электронов с формой тока, представленной на рис. 4.1а и рис. 4.1б в режиме  $U_{g0}=17$  кВ,  $p_{Ar}=37$  мПа с амплитудой тока разряда 240 А воздействовали на перемещающуюся мишень, при этом определяли долю импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов.

В эксперименте использовали массивную мишень из стали 12Х18Н10Т, генерировали 600 импульсов воздействия, следующих с частотой 0,3 Гц в пакетах по 100 импульсов. На мишени было выбрано 6 непересекающихся областей обработки, внутри которых положение пучка не изменяли.

Несмотря на то, что энергия в пучке с «затянутым» фронтом по сравнению с исходным импульсом (Рисунок 4.1а) не уменьшилась, доля импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов (Таблица 4.1) уменьшилась существенно – с 25% до 8%. Последний факт связан с всплеском тока на фронте, который возникает, вероятно, из-за десорбции газа в разрядной ячейке плазменного катода и из-за переходных процессов в нём.

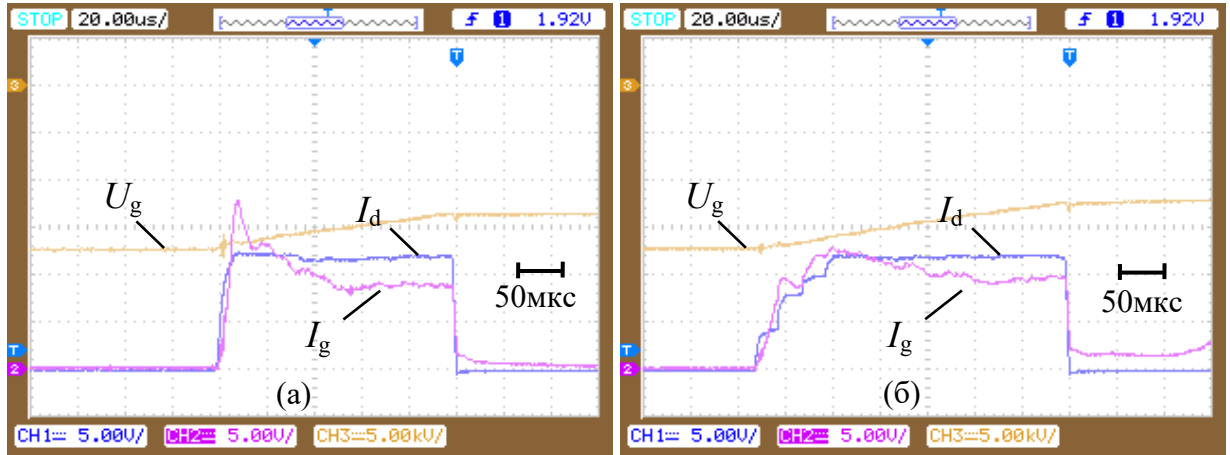


Рисунок 4.1 – Характерные осциллограммы основных цепей источника электронов в обычном режиме (а) и с участком медленного нарастания тока (б).  $U_{g0}=17$  кВ,  $p_{Ar}=37$  мПа. Синий –  $I_d$ , 100 А/кл., маджента –  $I_g$ , 100 А/кл., коричневый –  $U_g$ , 5 кВ/кл.

Таблица 4.1. Доля импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка источника электронов от общего числа импульсов в зависимости от скорости нарастания тока в ускоряющем промежутке.

Параметры \ Режим	Режим прямоугольного импульса	Режим с плавным нарастанием тока
Средняя скорость нарастания $I_g$ , А/мкс	65	9
Количество пробоев (из 600 импульсов)	147	50
Доля импульсов с пробоями	24,5% (0,21 – 0,28)	8% (0,06 – 0,11)

Предложенный подход был реализован в блоке питания поджигающего и основного разряда плазменного катода с импульсным выходным разделительным трансформатором. Сложно изготовить высоковольтный разделительный трансформатор для генерации длинного (200 мкс и более) импульса тока с крутым фронтом. Однако, как показывает практика, зачастую

в этом нет необходимости. Например, для импульса длительностью от 100 мкс фронт 20 мкс может быть приемлемым. Такой трансформатор ограничит скорость нарастания тока, и будет служить фильтром высокочастотных помех, возникающих в результате коммутации разрядного промежутка.

Таким образом, уменьшение скорости нарастания тока в ускоряющем промежутке плазменного источника электронов на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и открытой границей анодной плазмы за счёт уменьшения скорости роста тока дугового разряда плазменного катода приводит к уменьшению доли импульсов с пробоями ускоряющего промежутка. В частности, уменьшение скорости нарастания тока в ускоряющем промежутке с 65 до 9 А/мкс при воздействии импульсов с током в ускоряющем промежутке 200 А, длительностью 100 мкс, начальным ускоряющим напряжением 17 кВ и давлении рабочего газа – аргона 37 мПа на поверхность стали 12Х18Н10Т, приводит к уменьшению доли пробоев с 25 до 8 %.

#### 4.2. Удлинение и поворот канала транспортировки пучка

Обработка интенсивным пучком электронов сопряжена с десорбцией газа, плавлением и испарением материала мишени. Ионизованные пары, динамическое увеличение давления увеличивают вероятность электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка. В следующих исследованиях увеличили длину канала транспортировки с 30 до 80 см (Рисунок 4.2). Конфигурацию магнитного поля подбирали так, чтобы сохранить диаметр пучка электронов на коллекторе и добиться схожего поля в области плазменного катода.

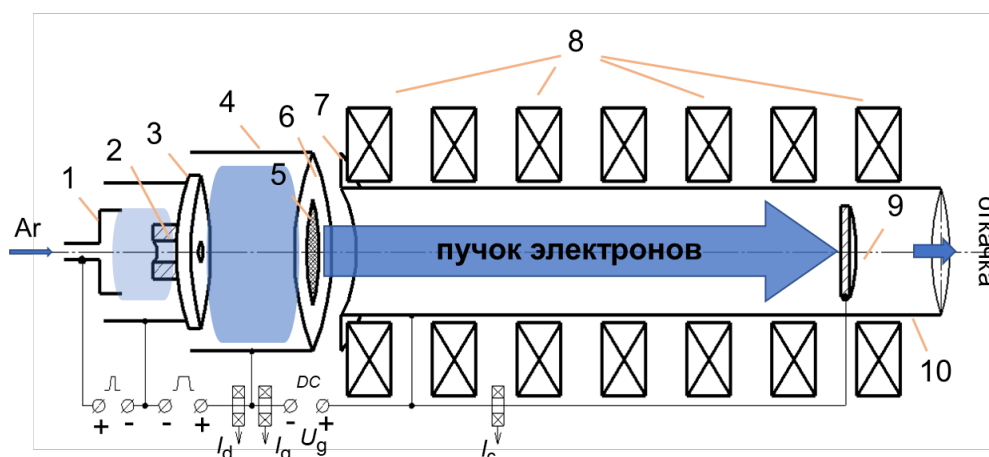


Рисунок 4.2 – Схема источника электронов с удлиненной областью транспортировки. 1 – анод поджигающего разряда, 2 – трубчатый катод, 3 – катодный электрод, 4 – анод основного разряда, 5 – эмиссионная сетка, 6 – эмиссионный электрод, 7 – извлекающий электрод, 8 – катушки магнитного поля, 9 – коллектор, 10 – труба дейфа.

Затем был изготовлен изогнутый на  $90^\circ$  с радиусом кривизны 50 см канал транспортировки длиной 80 см (Рисунок 4.3) [92].

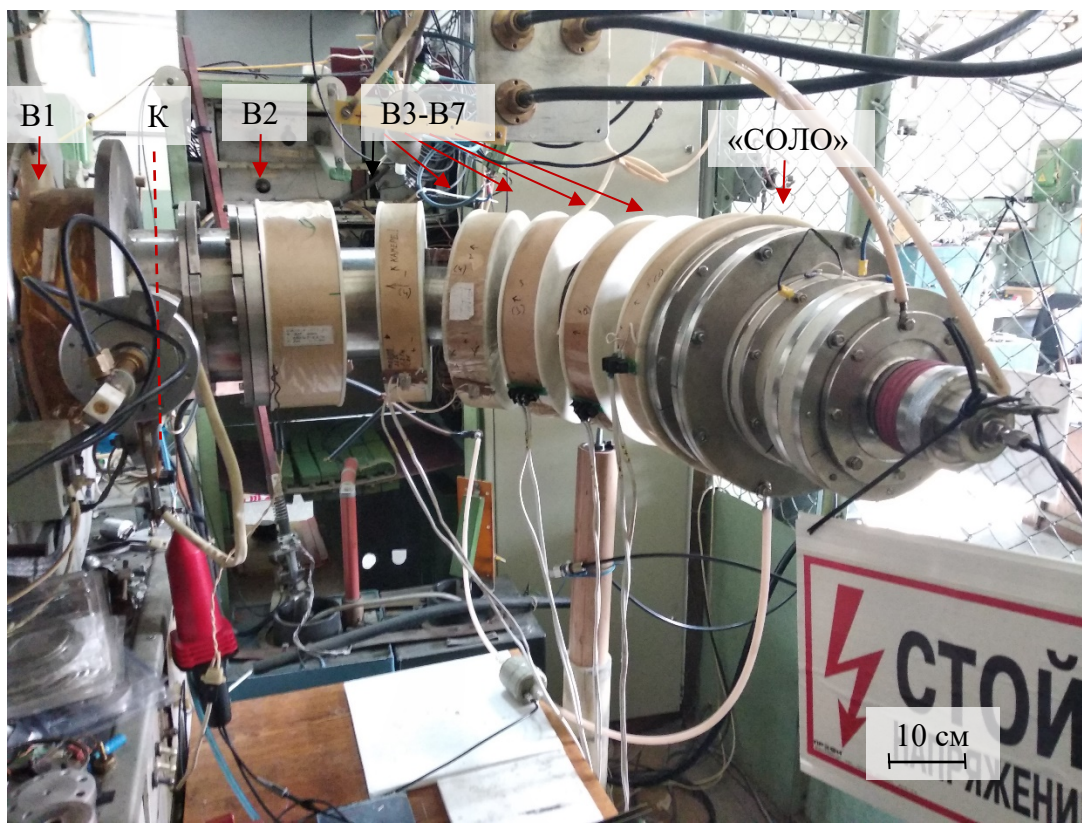


Рисунок 4.3 – Поворотная транспортирующая система в составе экспериментального стенда.  
(B1–B7) – катушки магнитного поля, K – плоскость расположения коллектора,  
«СОЛО» - источник электронов.

В большинстве случаев транспортировка пучка электронов в поворотной системе не вызывала существенного видоизменения характера радиального распределения плотности энергии по его сечению в области коллектора по сравнению с исходной геометрией, однако в режимах с током разряда менее 100 А при давлении аргона 45 мПа наблюдалось уменьшение ширины распределения с выраженным максимумом в центральной области. Управление профилем распределения плотности энергии в поворотной системе за счёт изменения сочетания величин магнитного поля в катушках транспортировки затруднено: если в исходной геометрии их было две, то при повороте пучка необходимо подбирать конфигурацию ведущего поля, изменяя ток в семи катушках, лишь две из которых расположены соосно. Простое изменение магнитного поля в последних соосных катушках, которые расположены в области коллектора, приводило к миграции положения пучка электронов в горизонтальной плоскости: увеличение магнитного поля с 30 мТл до 50 мТл при величине поля в остальных катушках 25 мТл смещало центр пучка примерно на 1,5 см ко внутреннему радиусу системы транспортировки. Таким

образом, можно было бы управлять положением пучка, однако установлено, что его прохождение внутри катушки со смещением от центра приводит к эллипсности, а изменение плотности энергии при варьировании магнитного поля требует повторного проведения калориметрических измерений, многократно увеличиваются время и затраты на исследования или обработку изделий.

Следовательно, задавшись величиной транспортирующего магнитного поля в катушках В1, В2, расположенных у коллектора необходимо произвести механическую настройку положения катушек системы транспортировки так, чтобы пучок приходился строго в центр крайней катушки. Транспортировка пучка электронов в настроенной поворотной системе не приводит к формированию эллипсности распределения, отпечатки пучка получаются круглые (Рисунок 4.4).

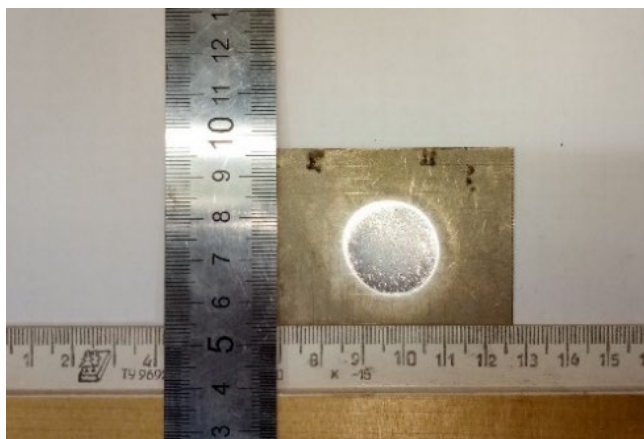


Рисунок 4.4 – Фотография отпечатка пучка электронов после его прохождения в системе транспортировки с поворотом траектории на 90 градусов.

С использованием созданной системы зондовых измерений, проведены исследования анодной (пучковой) плазмы в исходной геометрии источника электронов с каналом транспортировки 30 см и при использовании поворотной системы.

Измерения выполнены двойным зондом из вольфрамовых стержней с длиной рабочей области 10 мм и диаметром по 0,8 мм каждый, расстояние между стержнями 4 мм (Рисунок 2.14 на стр. 33). Зонд располагали перпендикулярно коллектору на расстоянии 14 см от него в сторону источника электронов со смещением на 15 мм относительно оси (для поворотной системы смещение к внутреннему радиусу). От пучка электронов зонд прикрывали медным экраном диаметром 10 мм. Концентрацию плазмы и температуру электронов определяли на 70-ой микросекунде тока пучка.

Тенденции динамики параметров плазмы при изменении тока пучка, давления рабочего газа, величины ускоряющего напряжения и магнитного поля исследовали при минимальных

параметрах источника электронов: токе в ускоряющем промежутке до 30 А, ускоряющем напряжении до 10 кВ. Увеличение ускоряющего напряжения приводило к зарядке двойного зонда на начальной стадии тока пучка так, что при давлении рабочего газа 20 мПа его потенциал относительно земли мог превысить 3 кВ. При повышенном до 60 мПа давлении и ускоряющем напряжении 16 кВ работа источника электронов во время измерений в исходной геометрии без отклонения пучка могла сопровождаться электрическими пробоями ускоряющего промежутка и перебоями в работе системы зондовых измерений. Увеличенное значение тока пучка кратно снижало ресурс работы зонда.

В исходной геометрии (канал транспортировки 30 см) при давлении 20 мПа, ускоряющем напряжении 5 кВ и магнитном поле 30 мТл двукратное увеличение тока в ускоряющем промежутке с 15 А до 30 А приводило к росту концентрации плазмы в исследуемой области примерно на 40% (с  $1,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), а регистрируемая температура электронов увеличилась с примерно 6 эВ до 7,7 эВ.

Увеличение давления рабочего газа с 20 мПа до 60 мПа при токе 15 А также приводит к увеличению концентрации плазмы с  $1,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Увеличение давления рабочего газа приводит к росту тока в ускоряющем промежутке при прочих неизменных параметрах с 15 А до 20 А. Наблюдается двукратное увеличение регистрируемой температуры электронов  $T_{e\perp}$  с 6 эВ до 12 эВ. При токе 30 А концентрация плазмы увеличилась на 15% с  $1,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,9 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , при этом ток в ускоряющем промежутке увеличился примерно на 10%. Температура электронов увеличилась с 7,7 эВ до 8,4 эВ.

Увеличение ускоряющего напряжения с 5 кВ до 10 кВ также приводит к росту концентрации анодной плазмы. При  $I_g=15$  А концентрация плазмы увеличивается с  $1,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , а при  $I_g = 30$  А – с  $1,6 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $2,5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Температура электронов в обоих случаях увеличилась на (4–6) эВ.

Увеличение транспортирующего магнитного поля с 30 мТл до 50 мТл вызывает уменьшение концентрации плазмы в области измерения с  $1,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $3,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Температура электронов увеличилась с 6 эВ до 8 эВ.

Исследования параметров анодной плазмы в поворотной системе транспортировки показали схожие тенденции динамики параметров при изменении условий, однако регистрируемая концентрация плазмы оказалась втрое меньше, чем в исходной конфигурации. Так, при давлении аргона 20 мПа, ускоряющем напряжении 5 кВ, токе в ускоряющем промежутке 15 А и магнитном поле в области коллектора 30 мТл концентрация плазмы составила  $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Увеличение тока пучка вдвое, до 30 А, приводит, как в случае исходной геометрии, к увеличению концентрации плазмы примерно на 40%. Регистрируемая температура электронов, однако, уменьшалась с увеличением тока пучка и ускоряющего напряжения, но

данные по  $T_{e\perp}$  имеют высокий, до 35%, уровень относительной погрешности и требуют осторожной интерпретации.

Концентрация плазмы в поворотной системе сильнее реагировала на увеличение ускоряющего напряжения и давления рабочего газа, особенно при увеличенном токе пучка. Так, при уставке тока 30 А, ускоряющем напряжении 5 кВ, магнитном поле в области коллектора 30 мТл при увеличении давления аргона с 20 мПа до 60 мПа концентрация плазмы возросла с примерно  $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , ток в ускоряющем промежутке увеличился с 30 А до примерно 40 А.

В поворотной системе транспортировки сложно изменить величину магнитного поля, не изменив при этом положение пучка и характер распределения тока. Увеличение магнитного поля в области коллектора с 30 мТл до 50 мТл ( $I_g = 30 \text{ А}$ ,  $U_g = 5 \text{ кВ}$ ,  $p_{\text{Ar}} = 20 \text{ мПа}$ ) привело к незначительному (на 10%) снижению концентрации плазмы с  $3 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  до  $2,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Регистрируемая температура электронов уменьшилась с 7 эВ до 4,4 эВ.

Для аппроксимации радиального распределения концентрации электронов в пучке воспользуемся распределением плотности энергии, представленным на рис. 4.5. Аппроксимируем его функцией Гаусса

$$J(r) = J_0 e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (4.1)$$

где  $J_0 = 16 \text{ Дж/см}^2$ , а  $r_0 = 13 \text{ мм}$ , и считая концентрацию электронов пропорциональной плотности энергии, принесенной пучком на коллектор, для центральной области пучка будем иметь

$$n_0 = \frac{I}{\pi e \vartheta r_0^2}, \quad (4.2)$$

где  $I$  – ток пучка,  $\vartheta$  – скорость электронов,  $e$  – заряд электрона.

Для пучка электронов с током 30 А и энергией электронов 5 кэВ концентрацию на его оси можно оценить на уровне  $8,5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Это на полтора порядка меньше концентрации плазмы, замеренной на расстоянии 15 мм от оси системы, кроме того, ток в ускоряющем промежутке содержит ток ионов из анодной плазмы и, соответственно, ток пучка будет меньше 30 А на величину этого ионного тока. При указанных условиях пространственный заряд пучка электронов в момент измерения можно считать полностью скомпенсированным ионами анодной пучковой плазмы.

Условимся считать предельными режимами электронно-пучкового воздействия такие, при которых электрический пробой ускоряющего промежутка после его тренировки возникает с вероятностью около 0,5. Продолжительная, 100 импульсов и более, работа в таком режиме может приводить к увеличению вероятности пробоя и требуется повторная тренировка ускоряющего

промежутка, особенно в случае воздействия на легкоплавкий материал, например, алюминий. После пробоя ускоряющего промежутка источника электронов субмиллисекундной длительности (100–250 мкс), его работа в предельном режиме восстанавливается, как правило, за несколько импульсов, в течение которых можно наблюдать увеличение времени от начала импульса до пробоя. В редких случаях возникали критические нарушения работы, при которых пробой ускоряющего промежутка более 20-и импульсов подряд возникает на фронте тока, при этом снижали параметры облучения и вновь производили тренировку. Незначительное, на (10–15)%, увеличение мощности пучка относительно предельного режима приводит к увеличению вероятности пробоя до 1.

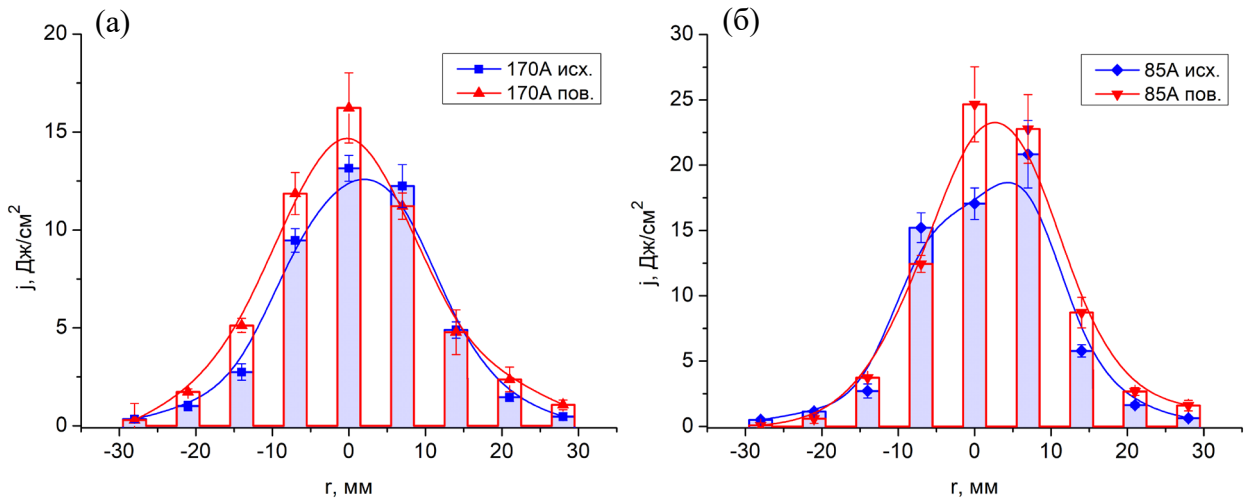
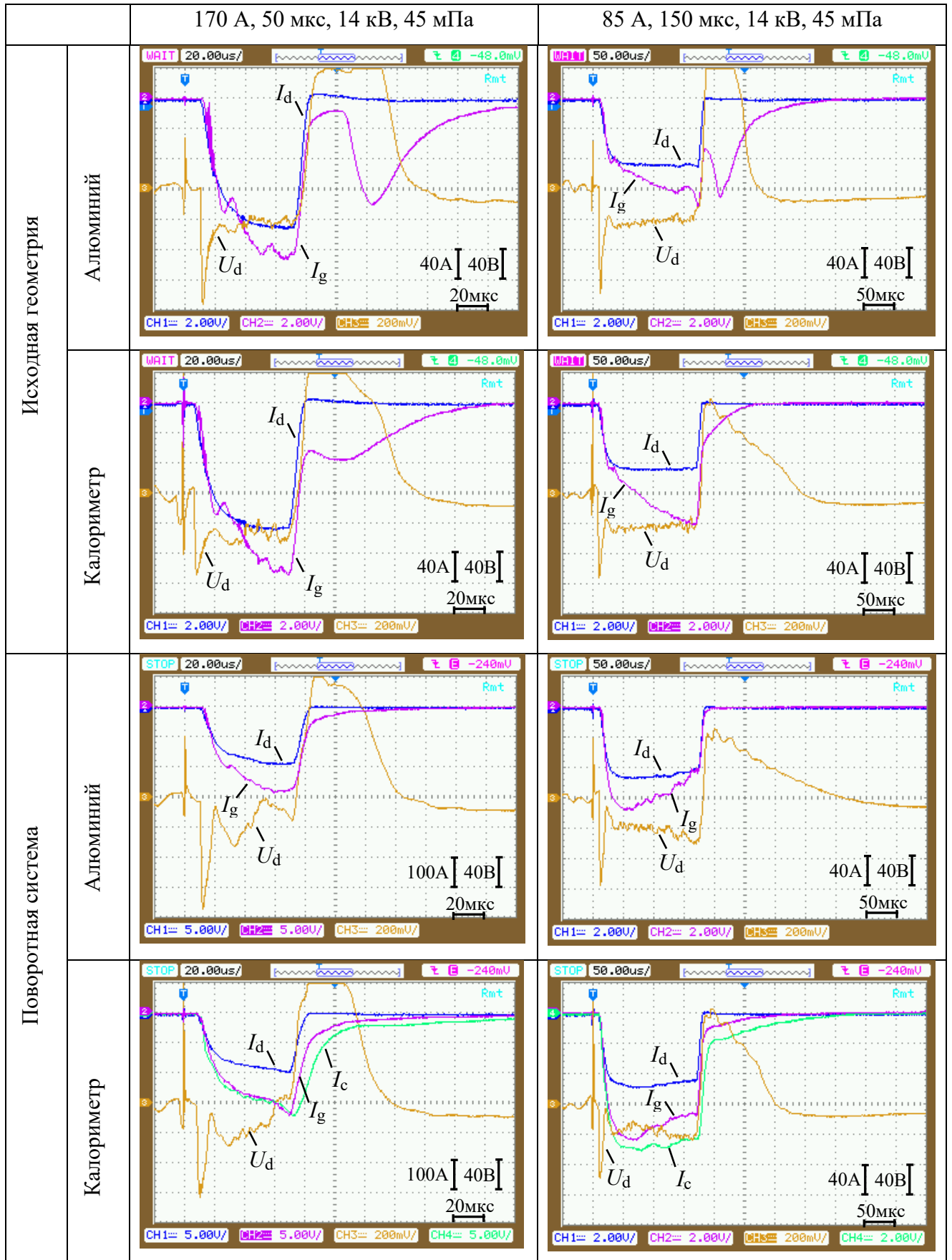


Рисунок 4.5 – Радиальное распределение плотности энергии пучка электронов в области коллектора для исходной и поворотной системы транспортировки.  $I_d = 170$  А,  $\tau = 50$  мкс и

$$I_d = 85 \text{ А, } \tau = 150 \text{ мкс, } U_g = 14 \text{ кВ, } p_{Ar} = 45 \text{ мПа.}$$

Для источника электронов с коллектором, находящимся на оси системы на расстоянии 30 см от эмиссионной сетки (исходная геометрия) определены предельные режимы, в которых выполнено измерение радиального распределения плотности энергии по сечению пучка в области коллектора. Затем, при тех же режимах, повторили измерения для поворотной системы транспортировки. В таблице 4.2 приведены соответствующие осциллограммы основных цепей источника электронов для 2-х режимов, отличающихся длительностью импульса.

Таблица 4.2. Сравнение осциллограмм основных цепей источника электронов при воздействии пучка электронов на алюминиевую мишень и на калориметр.



Диафрагма калориметра и его поглотители изготовлены из меди, а мишень/коллектор – из алюминия, что существенно изменяет условия генерации пучка для этих двух случаев. По этим причинам осциллограммы при воздействии пучка электронов на мишень и на калориметр отличаются, что видно из представленных осциллограмм в таблице выше.

Отличительной особенностью осциллограммы тока в цепи ускоряющего промежутка  $I_g$  в предельном режиме на алюминии является наличие тока по завершении импульса основного разряда  $I_d$ . После основного импульса стабильно развивается неконтролируемый второй импульс (Таблица 4.2), амплитуда которого в некоторых режимах может даже превышать амплитуду тока, достигаемую в течение импульса основного разряда. Осциллограмма воздействия на калориметр в том же режиме имеет «хвост» меньшей амплитуды. Основной же импульс тока при воздействии на калориметр имеет амплитуду больше, чем при воздействии на алюминий, что особенно проявляется на длинных импульсах, например, при 150 мкс, давлении рабочего газа 45 мПа, уставке тока основного разряда 85 А, амплитуда тока в ускоряющем промежутке  $I_g$  увеличивается со 120 А до 160 А.

Изменение осциллограмм требует оценки энергии, принесенной пучком электронов на мишень или калориметр. Её выполняли согласно формуле (4.3).

$$E_b = E_g - E_i, \quad (4.3)$$

$$E_g = \sum_i I_g[i] U_g[i] \Delta t, \quad (4.4)$$

$$E_i = \sum_i I_i[i] U_g[i] \Delta t, \quad (4.5)$$

$$I_i = \frac{I_g - I_d \alpha}{\gamma(U_g) + 1}, \quad (4.6)$$

где  $I_g[i]$  – ток в ускоряющем промежутке в  $i$ -ой точке осциллограммы,  $I_d[i]$  – ток разряда,  $U_g[i]$  – напряжение в ускоряющем промежутке,  $\alpha$  – коэффициент извлечения,  $\gamma(U)$  – эффективный коэффициент вторичной эмиссии,  $\Delta t$  – время между точками осциллограммы.

Предполагается, что коэффициент извлечения в различных условиях генерации пучка остается неизменным, а вторичная эмиссия обусловлена только ионно-электронной эмиссией. Измерения показали, что оценки энергии для исходной геометрии дают результат с погрешностью в пределах 5% относительно калориметрических измерений интегральной энергии. Для поворотной системы транспортировки оценки показывают заниженный в среднем на 7% результат с отклонением от среднего значения в пределах 13%.

Внедрение поворотной системы транспортировки с расстоянием 80 см от коллектора привело к увеличению амплитуды тока в ускоряющем промежутке при прочих неизменных параметрах (исключая конфигурацию транспортирующего магнитного поля). Расчетное

увеличение энергии пучка для режима с уставкой тока разряда 170 А,  $\tau = 50$  мкс,  $U_g = 14$  кВ,  $p_{Ar} = 45$  мПа составило примерно 20% (со 150 до 180 Дж), пропорционально выросла плотность энергии в центральной области пучка электронов. Характер распределения плотности энергии существенно не изменился (Рисунок 4.5), что дает право сравнивать режимы работы поворотной и исходной системы транспортировки.

Рассчитанное увеличение энергии пучка для режима с уставкой тока разряда 85 А,  $\tau = 150$  мкс,  $U_g = 14$  кВ,  $p_{Ar} = 45$  мПа при переходе к поворотной системе составило примерно 10% (со 185 до 205 Дж). Измеренная плотность энергии в центральной области пучка электронов увеличилась заметно больше этого значения (Рисунок 4.5б). Исходное распределение в указанном режиме имело асимметрию, после транспортировки в поворотной системе асимметрии не наблюдалось, но в центральной области фиксировалось выраженное обострение.

Поскольку исходная и поворотная системы отличаются не только формой, но и длиной транспортировки электронного пучка, то для корректного сравнения предельных режимов генерации электронного пучка было принято решение рассмотреть еще одну прямую систему, длина транспортировки пучка в которой равна длине поворотной системы (80 см).

В таблице 4.3 и таблице 4.4 приведены осциллограммы предельных режимов для алюминиевой мишени в случае исходной системы транспортировки – с расстоянием 30 см от эмиссионной сетки до коллектора, удлиненной – с расстоянием 80 см и поворотной той же длины.

Сравнивая осциллограммы предельных режимов облучения алюминия для  $\tau = 150$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $p_{Ar} = 45$  мПа в исходной и удлиненной системе транспортировки можно видеть вторичный импульс тока  $I_g$  после основного импульса в отсутствие тока разряда плазменного катода. Он провоцируется плотной коллекторной плазмой, которая, расширяясь и двигаясь в системе транспортировки, достигает области эмиссионного электрода, где создает поток ускоренных ионов в разрядную ячейку и на эмиссионный электрод, вызывая ток вторичных электронов. При переходе от исходной геометрии к удлиненной, максимум вторичного импульса в этом режиме смещается после основного импульса с 50 мкс до 125 мкс. Поворотная система транспортировки позволяет более чем на порядок снизить амплитуду тока неуправляемого вторичного импульса предельного режима в указанных параметрах, или вовсе избавиться от этого импульса в остальных исследуемых режимах.

Таблица 4.3. Характерные осциллограммы предельных режимов источника электронов для разной геометрии канала транспортировки пучка при ускоряющем напряжении 20 кВ.

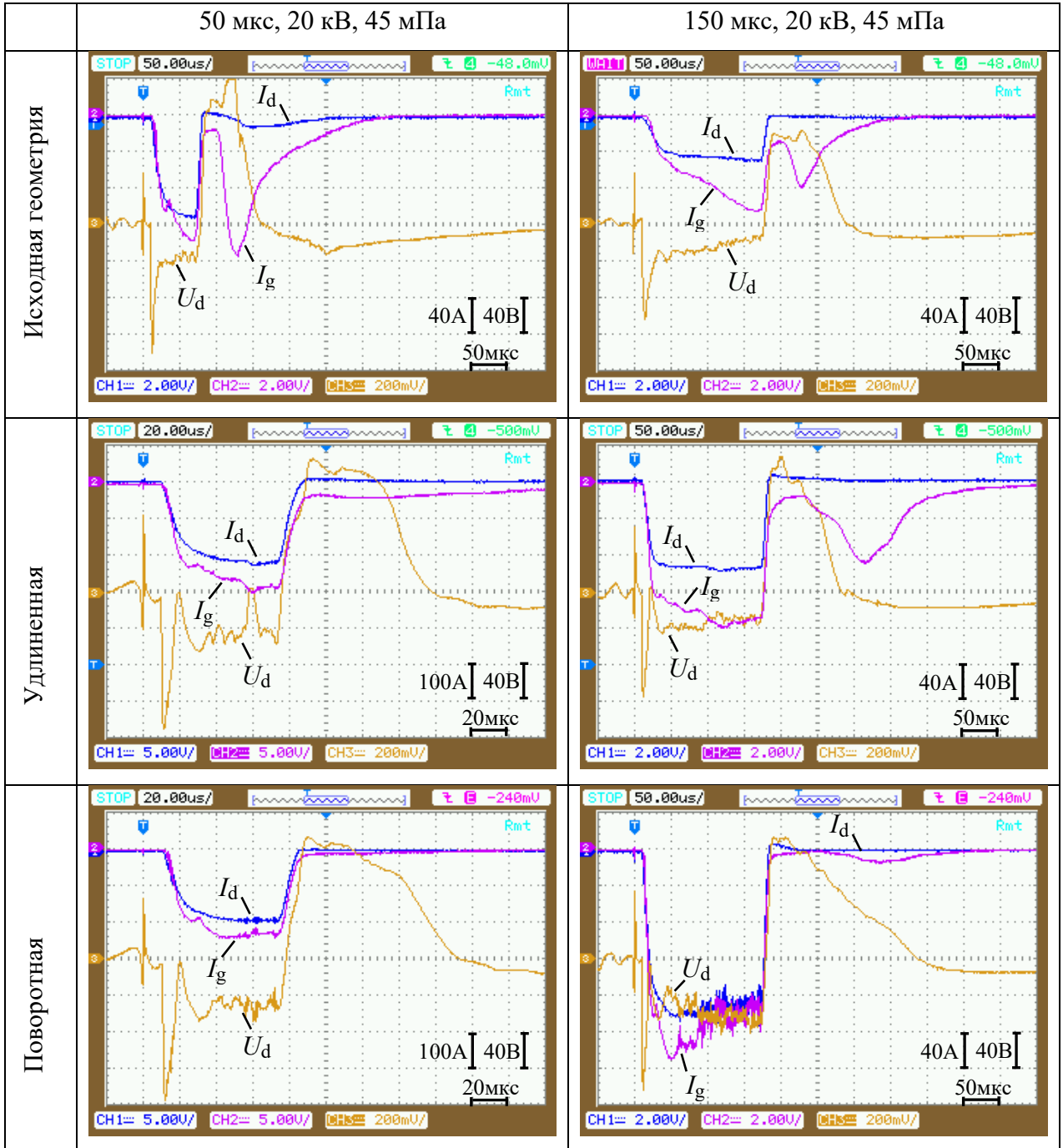
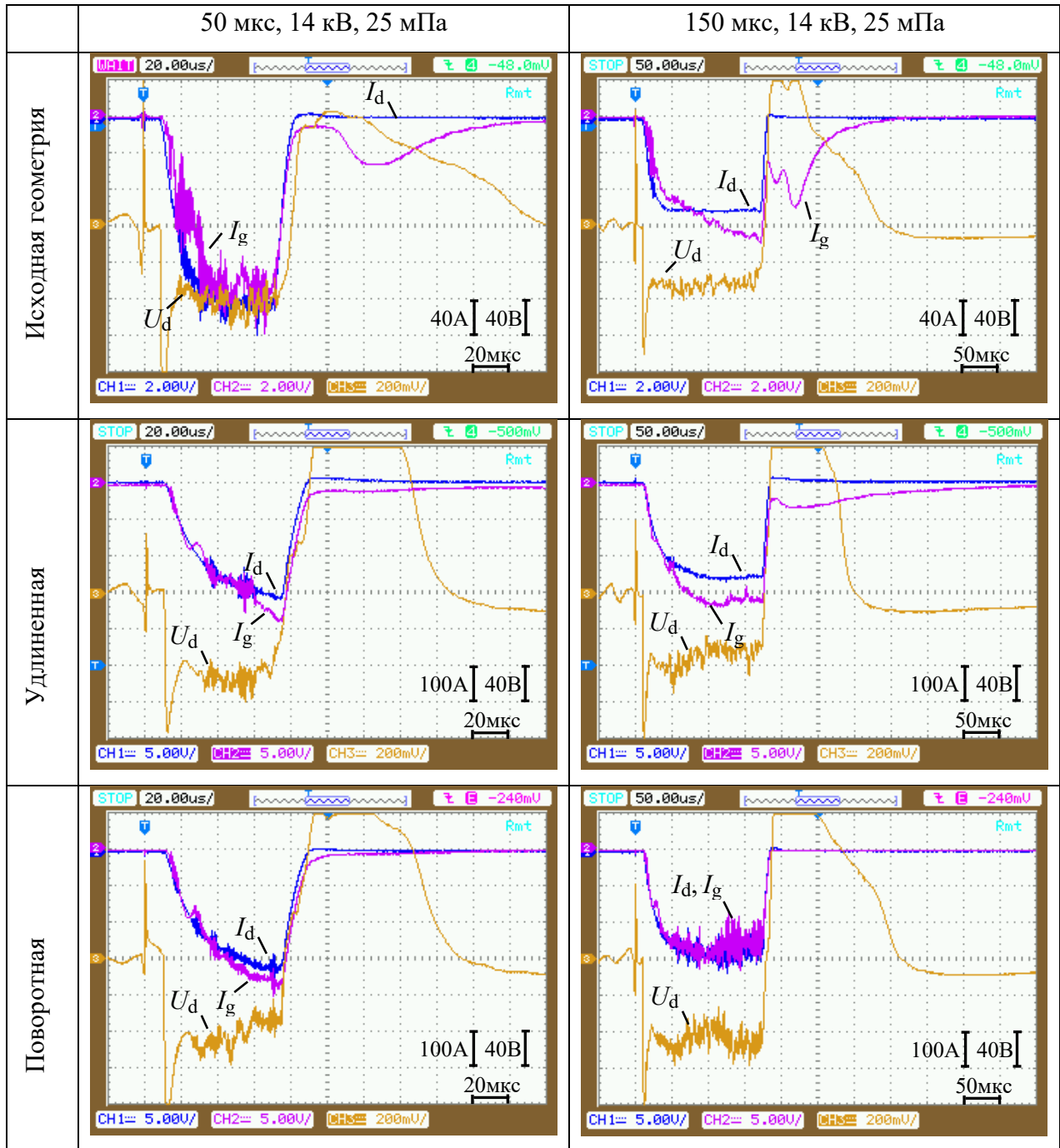


Таблица 4.4. Характерные осциллограммы предельных режимов источника электронов для разной геометрии канала транспортировки пучка при ускоряющем напряжении 14 кВ.



Таким образом, типичным случаем для предельных режимов генерации пучка с поворотной системой транспортировки является отсутствие вторичного неуправляемого импульса тока после основного импульса тока разряда. Однако полностью избавиться от «хвоста» тока  $I_g$  по завершении импульса тока плазменного катода не удалось. Тем не менее, энергосодержание «хвоста» импульса в исследуемых предельных режимах не превышало 10% от основного импульса даже при воздействии на алюминиевую мишень. Т.к. предельные режимы редко используются для обработки реальных изделий из-за высокой вероятности пробоя

ускоряющего промежутка, а по мере снижения тока в ускоряющем промежутке «хвост» импульса пропадает, проблему наличия тока в ускоряющем промежутке по завершении тока разряда плазменного катода можно считать решенной благодаря использованию поворотной системы транспортировки электронного пучка.

В таблице 4.5 сведены предельные режимы генерации электронного пучка при его воздействии на массивный алюминиевый коллектор с различными системами транспортировки: исходной, удлиненной и поворотной. В качестве параметра сравнения выбрана амплитуда тока в ускоряющем промежутке  $I_{g \max}$ .

Таблица 4.5. Максимальный ток в цепи ускоряющего промежутка для предельных режимов работы источника электронов.

p, мПа	$U_g$ , кВ	$\tau$ , мкс	Исх. $I_{g \max}$ , А	Удл. $I_{g \max}$ , А	Пов. $I_{g \max}$ , А	Удл/Исх	Пов/Удл	Пов/Исх
25	14	50	195	360	365	1,8	1,0	1,9
25	14	150	130	330	290	2,5	0,9	2,2
25	20	50	150	400	340	2,7	0,9	2,3
25	20	150	90	140	315	1,6	2,3	3,5
45	14	50	210	320	315	1,5	1,0	1,5
45	14	150	130	255	230	2,0	0,9	1,8
45	20	50	170	290	240	1,7	0,8	1,4
45	20	150	105	155	220	1,5	1,4	2,1

Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что внедрение поворотной системы транспортировки позволяет до 3,5 раз увеличить амплитуду тока в ускоряющем промежутке. С точки зрения достижения максимальных параметров при обработке алюминия поворотную систему транспортировки целесообразно применять в случае длинных 150-микросекундных импульсов при высоком (20 кВ) ускоряющем напряжении. При работе с короткими 50-микросекундными импульсами и/или с низким (14 кВ) ускоряющим напряжением достаточно использовать прямую удлиненную систему транспортировки.

В таблице 4.6 приведена максимальная за импульс мощность в цепи ускоряющего промежутка, рассчитанная для предельных режимов.

В исследуемых режимах максимальная расчетная мощность пучка электронов в течение импульса на алюминиевом коллекторе была достигнута в удлиненной системе при давлении  $p_{Ar} = 25$  мПа,  $\tau = 50$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $I_{g \max} = 400$  А, и составила 5,2 МВт ( $P_{g \max} = 6,8$  МВт). Поворотная система показала результат на 10% ниже. Ионный ток в ускоряющем промежутке учитывали согласно формуле (4.6).

Таблица 4.6. Максимальная мощность, достигаемая в цепи ускоряющего промежутка для предельных режимов работы источника электронов.

$p$ , мПа	$U_g$ , кВ	$\tau$ , мкс	Исх. $P_g$ , МВт	Удл. $P_g$ , МВт	Пов. $P_g$ , МВт	Удл/Ст	Пов/Удл	Пов/Ст
25	14	50	2,5	4,0	4,0	1,61	1,01	1,63
25	14	150	1,5	3,4	3,1	2,26	0,92	2,09
25	20	50	2,8	6,8	6,0	2,46	0,87	2,15
25	20	150	1,7	2,6	5,5	1,55	2,08	3,22
45	14	50	2,6	3,5	3,5	1,37	1,00	1,37
45	14	150	1,4	3,0	2,9	2,05	0,97	1,99
45	20	50	3,1	5,1	4,5	1,63	0,88	1,43
45	20	150	1,9	2,7	4,1	1,44	1,52	2,18

В таблице 4.7 сравнивается интегральная характеристика – энергия в ускоряющем промежутке ( $E_g = \int I_g U_g \partial t$ ) предельных режимов для различных систем транспортировки.

Приведенные результаты подтверждают сделанные ранее выводы. В исследуемых режимах максимальная расчетная энергия, принесенная на алюминиевый коллектор за импульс, была достигнута в поворотной системе при давлении  $p_{Ar} = 25$  мПа,  $\tau = 150$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $I_{g \max} = 315$  А, и составила 580 Дж ( $E_g = 740$  Дж). Удлиненная система транспортировки без поворота показала результат на 20% ниже.

Таблица 4.7. Энергия, рассчитанная за импульс в цепи ускоряющего промежутка для предельных режимов работы источника электронов.

$p$ , мПа	$U_g$ , кВ	$\tau$ , мкс	Исх. $E_g$ , Дж	Удл. $E_g$ , Дж	Пов. $E_g$ , Дж	Удл/Ст	Пов/Удл	Пов/Ст
25	14	50	170	235	245	1,4	1,0	1,4
25	14	150	280	490	420	1,8	0,9	1,5
25	20	50	215	400	350	1,9	0,9	1,6
25	20	150	300	605	740	2,0	1,2	2,5
45	14	50	220	250	230	1,1	0,9	1,0
45	14	150	300	440	365	1,5	0,8	1,2
45	20	50	285	380	285	1,3	0,8	1,0
45	20	150	330	565	565	1,7	1,0	1,7

Так, применение поворотной системы транспортировки длиной 80 см в режимах с длительностью импульса 150 мкс при ускоряющем напряжении 20 кВ по сравнению с системой транспортировки без поворота пучка той же длины позволяет до 2,3 раз увеличить максимальный ток в ускоряющем промежутке (со 140 А до 315 А) и до 1,2 раз энергию в ускоряющем промежутке (с 605 Дж до 740 Дж) при воздействии на алюминиевую мишень.

Благодаря внедрению поворотной системы транспортировки удалось провести обработку алюминия без возникновения пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка в режиме  $I_d = 150$  А,  $\tau = 250$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $p_{Ar} = 25$  мПа, магнитное поле в катушках В3–В7 (Рисунок 4.3) составляло 30 мТл, В1, В2 – 50 мТл, после предварительной тренировки на молибденовом коллекторе с током  $I_d = 250$  А. Расчетная энергия пучка за импульс составляла 530 Дж,

максимальная за импульс мощность воздействия – 2,3 МВт. Характерные осциллограммы, полученные в ходе обработки приведены на рис. 4.6а. Прямые измерения распределения плотности энергии, приносимой пучком на коллектор в этом режиме, были затруднительны ввиду того, что калориметр перегревался, поэтому измерения выполнены при меньшей длительности импульса, определён коэффициент пропорциональности, равный отношению рассчитанной по осциллограммам  $I_d$  и  $I_g$  энергии пучка с учётом ионного тока к измеренной плотности энергии, и полученный коэффициент применён к расчётной энергии пучка с полной длительностью 250 мкс. По оценкам распределение плотности энергии имело колоколообразную форму шириной около 2,6 см с энергией в центральной области около 65 Дж/см<sup>2</sup>.

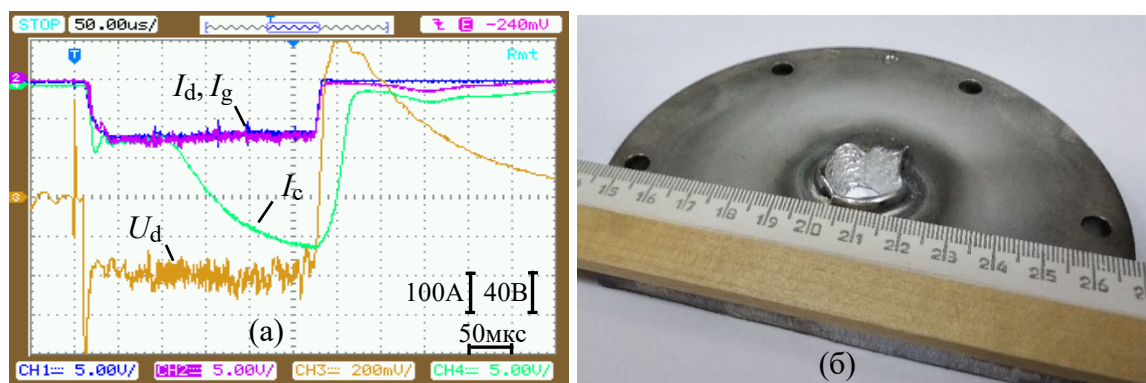


Рисунок 4.6 – Характерные осциллограммы основных цепей источника электронов в беспробоном режиме с поворотной системой транспортировки (а) и результат воздействия пучка на алюминиевую мишень (б).

Стоит отметить, что полученный беспробоный режим превосходит предельный режим для исходной геометрии: та же расчетная максимальная мощность пучка (2,3 МВт) достигалась в предельном режиме при длительности импульса 50 мкс. Расчетная энергия пучка за импульс 50 мкс составляла 160 Дж ( $E_g = 215$  Дж). Такое непропорциональное увеличение энергии с ростом длительности импульса связано с частичной разрядкой накопительной конденсаторной батареи.

Ток в цепи коллектора  $I_c$  (Рисунок 4.6а), существенно превосходящий ток в ускоряющем промежутке, связан с уходом на коллектор не только ускоренных пучковых, но и плазменных электронов. Интенсивное импульсно-периодическое воздействие на алюминиевые образцы с ранее недостижимыми плотностями энергии позволяет переплавлять поверхностный слой глубиной несколько миллиметров, продолжительное воздействие способно разрушать образцы толщиной 10 мм и более (Рисунок 4.6б) не вызывая электрические пробои высоковольтного ускоряющего промежутка.

После проведения серии экспериментов было замечено, что внутренняя поверхность поворотной системы транспортировки со стороны коллектора по внешнему радиусу имела следы распыленного алюминия. Со стороны ускоряющего электрода таких следов распыления визуально не обнаружено. Таким образом, поворотная система позволяет снизить количество паров мишени, достигающих эмиссионного электрода, что увеличивает электрическую прочность ускоряющего промежутка, т.е. кратно увеличивает энергосодержание и максимальную мощность пучка.

Таким образом, на источнике электронов «СОЛЮ» с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом с открытой границей плазмы, были получены следующие результаты:

1. Проведены зондовые измерения параметров анодной (пучковой) плазмы как при использовании отклоняющей системы транспортировки электронного пучка, так и без нее, которые показали, что увеличение давления (в диапазоне 20–60 мПа), тока пучка (в диапазоне 15–30 А), ускоряющего напряжения (в диапазоне 5–10 кВ) и магнитного поля в области коллектора (в диапазоне 30–50 мТл) приводит к увеличению концентрации и температуры анодной плазмы. Концентрация анодной плазмы ( $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) при этом почти на два порядка превышает концентрацию электронов пучка, что подтверждает предположение о транспортировке пучка в обеих системах в условиях полной компенсации его пространственного заряда;

2. Проведено экспериментальное сравнение предельных параметров источника электронов как при использовании отклоняющей системы, так и без нее при модификации поверхности одинаковых модельных образцов, роль которых выполняла алюминиевая мишень. Внедрение поворотной системы транспортировки длиной 80 см позволяет до 3,5 раз увеличить амплитуду тока в ускоряющем промежутке по сравнению с прямым каналом длиной 30 см. В исследуемых режимах максимальная расчетная мощность пучка электронов в течение импульса на алюминиевом коллекторе была достигнута в удлиненной системе при давлении  $p_{\text{Ar}} = 25 \text{ мПа}$ ,  $\tau = 50 \text{ мкс}$ ,  $U_g = 20 \text{ кВ}$ ,  $I_{g \text{ max}} = 400 \text{ А}$ , и составила 5,2 МВт ( $P_g = 6,8 \text{ МВт}$ ). В исследуемых режимах максимальная расчетная энергия, принесенная на алюминиевый коллектор за импульс, была достигнута в поворотной системе при давлении  $p_{\text{Ar}} = 25 \text{ мПа}$ ,  $\tau = 150 \text{ мкс}$ ,  $U_g = 20 \text{ кВ}$ ,  $I_{g \text{ max}} = 315 \text{ А}$ , и составила 580 Дж ( $E_g = 740 \text{ Дж}$ ). Удлиненная система транспортировки без поворота показала результат на 20% ниже. Так, применение поворотной системы транспортировки длиной 80 см в режимах с длительностью импульса 150 мкс при ускоряющем напряжении 20 кВ по сравнению с системой транспортировки без поворота пучка той же длины позволяет до 2,3 раз увеличить максимальный ток в ускоряющем промежутке (со 140 А до 315 А)

и до 1,2 раз энергию в ускоряющем промежутке (со 605 Дж до 740 Дж) при воздействии на алюминиевую мишень.

3. Режимы с наибольшим энергосодержанием удается достичь, используя более длинные системы транспортировки электронного пучка. В ряде случаев интегральные и мгновенные характеристики максимальных режимов для этих систем имеют близкие значения, однако, в ходе экспериментов с различными системами транспортировки наблюдается неконтролируемый выброс тока в ускоряющем промежутке уже после окончания горения основного дугового разряда, ответственного за генерацию эмиссионной (катодной) плазмы. Этот ток связан с процессами взаимодействия электронного пучка с парами материала мишени, которые, развиваясь, приводят к инициированию ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода даже после прекращения генерации эмиссионной плазмы. Показано, что при увеличении длины трубы дрейфа и ее искривлении задержка образования этого «самоиницированного» тока увеличивается, а его амплитуда уменьшается (более чем на порядок), которая, в свою очередь, тем больше, чем выше значение плотности энергии электронного пучка. Так, при использовании отклоняющей системы транспортировки амплитуда этого тока минимальна в сравнении с «прямыми» системами, что определяет более стабильную работу источника электронов, а кроме этого, позволяет точно контролировать энергию, вложенную в поверхность образца при модификации поверхности конкретного металлического изделия;

4. Благодаря внедрению поворотной системы транспортировки удалось провести обработку алюминия без возникновения пробоев высоковольтного ускоряющего промежутка в режиме  $I_d = 150$  А,  $\tau = 250$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $p_{Ar} = 25$  мПа, магнитное поле в катушках от 30 мТл до 50 мТл, после предварительной тренировки на молибденовом коллекторе с током  $I_d = 250$  А. Расчетная интегральная энергия пучка за импульс составляла 530 Дж, максимальная за импульс мощность воздействия – 2,3 МВт. Стоит отметить, что полученный беспробойный режим превосходит предельный режим для исходной системы: та же расчетная максимальная мощность пучка достигалась в предельном режиме при длительности импульса не более 50 мкс.

#### *4.3. Формирование дополнительного плазменного анода*

В источнике электронов «СОЛЮ» плазменный анод создается в результате ионизации рабочего газа самим пучком. На начальной стадии генерация пучка происходит в условиях недокомпенсации пространственного заряда, что ограничивает ток на фронте, вызывает его колебания. До генерации тока пучка, система не является свободной от загрязнений: на электродах присутствуют адсорбированный после развакуумирования кислород и пары воды, а также загрязнения в виде плёнок материалов мишени и их оксидов, оставшиеся после

предыдущего цикла обработки. При работе в импульсно-периодическом режиме, к моменту начала очередного импульса тока пучка, система подвержена десорбции газа, распылению материала эмиссионного электрода при пробоях, достижению паров мишени поверхности эмиссионного и других электродов (загрязнение системы от предыдущего импульса тока пучка), а воздействие на новые, ранее не обработанные пучком электронов участки мишени, усугубляют загрязнения от неё. Эти и другие факторы требуют механизмов кондиционирования электродов системы источника электронов.

Для решения этих вопросов была разработана и создана разрядная ячейка, представленная на рис. 4.7 [93, 94], которая была установлена в источник электронов за эмиссионным электродом в пространство дрейфа пучка в составе электродной системы СОЛО (Стенд 1). Разработанная разрядная ячейка позволяет формировать дополнительный плазменный анод независимо от времени генерации пучка электронов.

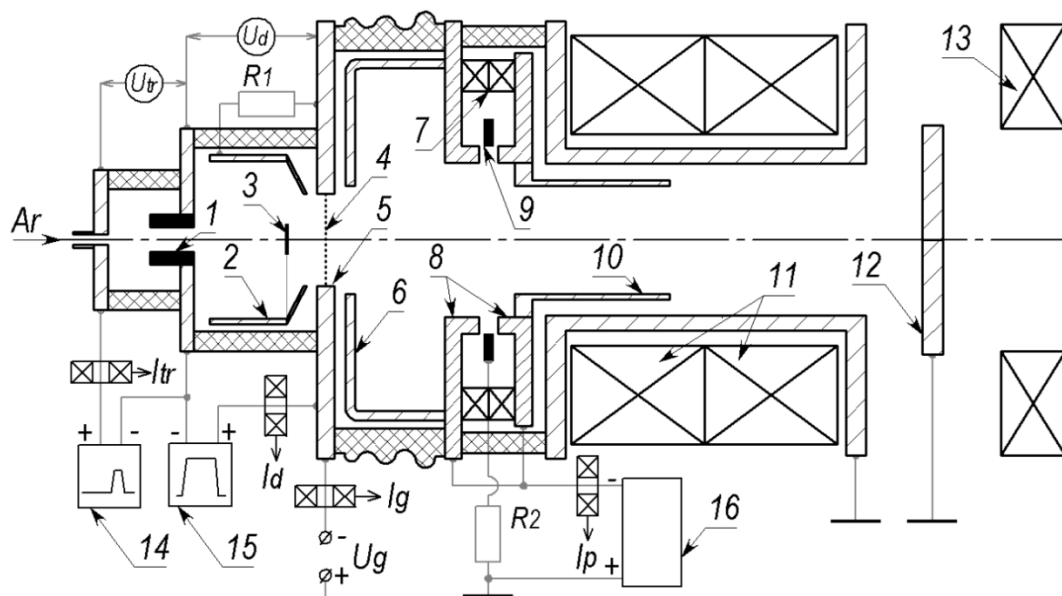


Рисунок 4.7 – Схема источника электронов с разрядной ячейкой дополнительного плазменного анода. 1 – катод, 2 – анодная вставка, 3 – перераспределяющий электрод, 4 – эмиссионная сетка, 5 – ускоряющий электрод, 6 – катод-отражатель, 7 – постоянные магниты, 8 – катоды-магнитопроводы, 9 – анод разрядной ячейки генератора плазмы, 10 – полый катод, 11 – «верхние» соленоиды магнитного поля, 12 – коллектор, 13 – «нижний» соленоид магнитного поля, 14 – блок питания поджигающего разряда, 15 – блок питания разряда плазменного катода, 16 – блок питания генератора дополнительной анодной плазмы.

Катоды-магнитопроводы 8 концентрируют поле постоянных магнитов 7 в зазоре кольцевой формы шириной 6,5 мм и внутренним диаметром 86 мм. Величина магнитного поля в зазоре 110 мТл, и направлено оно встречно полю соленоидов 11. На ближнем к эмиссионной

сетке 4 магнитопроводе установлен катод 6 высотой 55 мм и диаметром 180 мм, имеющий входное отверстие диаметром 50 мм. На дальнем магнитопроводе закреплен полый катод 10 длиной 92 мм и диаметром 64 мм. Анодами для разрядной ячейки являются кольцевой анод 9, коллектор 12, а также стенки вакуумной камеры. Рабочий газ подается через ячейку плазменного катода. Электрическое питание на кольцевой анод подводится через герметичный токоввод, изолированный на 5 кВ от катодов (Рисунок 4.8).

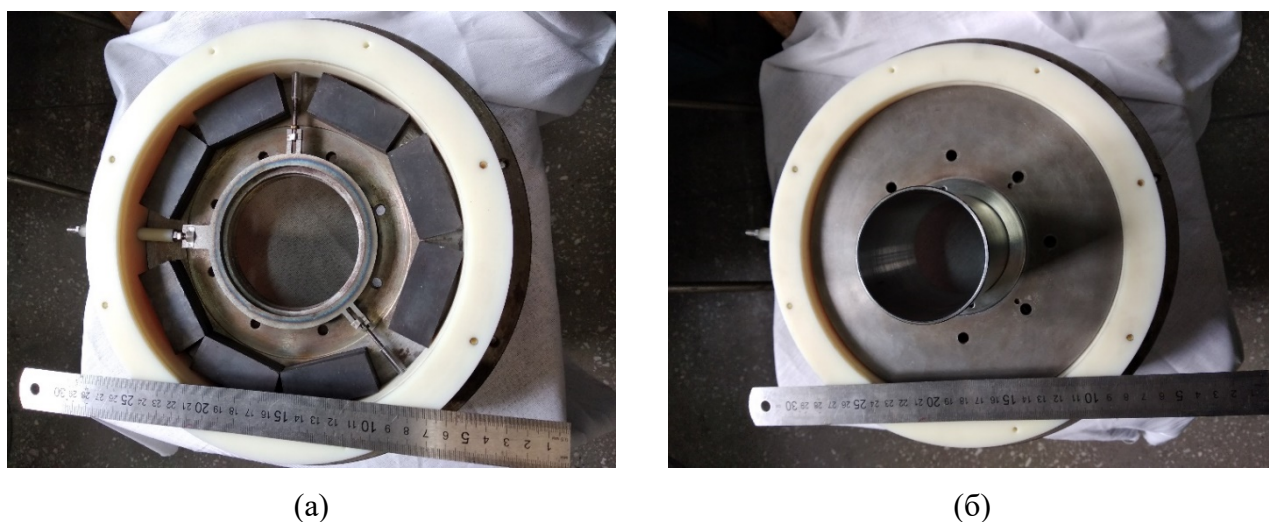


Рисунок 4.8 – Фотография разрядной ячейки плазменного анода в разборе (а) и с установленной катодной полостью (б).

Схема блока питания разряда, формирующего дополнительный плазменный анод, приведена на рис. 4.9. Он состоит из накопительной емкости  $C1$ , которая заряжается регулируемым напряжением (1–5) кВ блоком питания с гальванически развязанными от потенциала «земли» выводами, балластного сопротивления  $R\delta 1$ , транзисторного ключа  $VT1$ , управляемого программируемым микроконтроллером  $CV$ , ключа  $SA1$  и вспомогательных элементов.

Ключ  $SA1$  служит для коммутации цепи коллектор-эмиттер транзистора  $VT1$  при напряжении питания больше 3,5 кВ в режимах работы устройства, когда импульсная подача напряжения на разрядную ячейку не требуется.

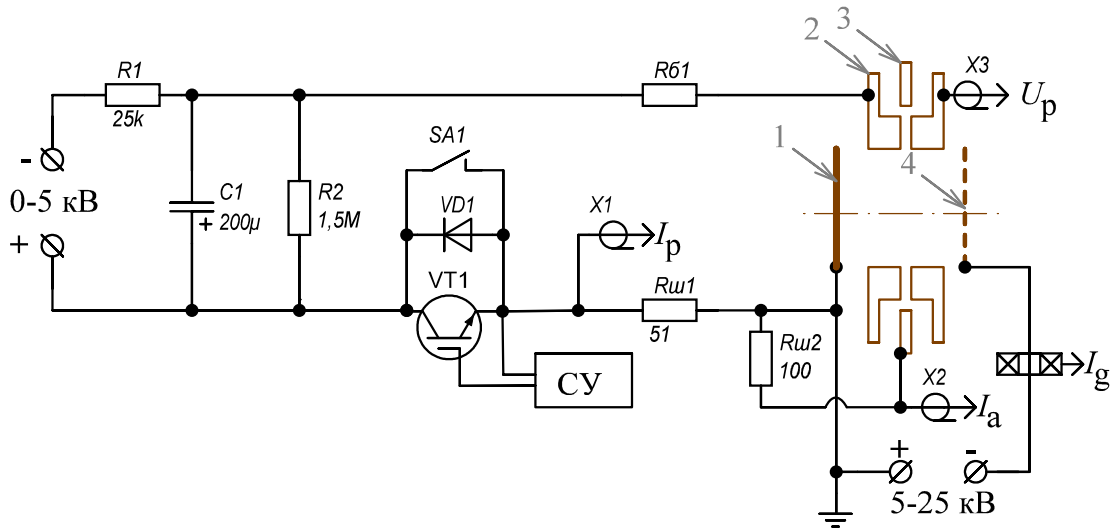


Рисунок 4.9 – Схема электропитания анодного разряда. СУ – система управления, 1 – коллектор, 2 – катод, 3 – анод, 4 – эмиссионная сетка источника электронов.

Последовательность работы источника электронов, оснащенного ячейкой дополнительного плазменного анода, проиллюстрирована на рис. 4.10.

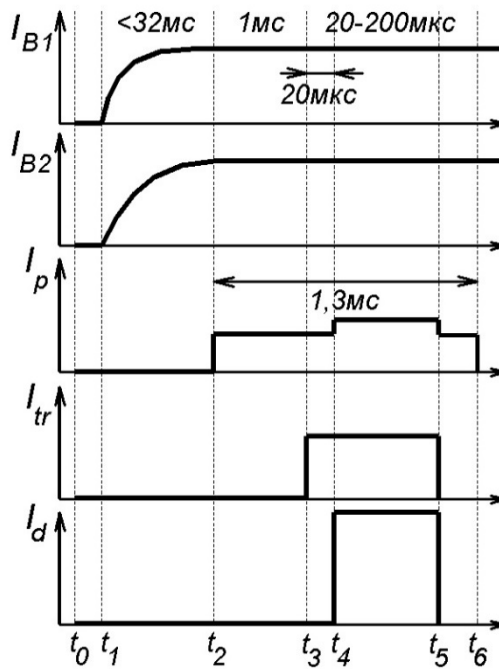


Рисунок 4.10 – Циклограмма работы основных узлов источника электронов с ячейкой дополнительного плазменного анода.  $I_{B1}$  – ток первого соленоида;  $I_{B2}$  – ток второго соленоида;  $I_p$  – ток разряда дополнительного плазменного анода;  $I_{tr}$ ,  $I_d$  – токи инициирующего и основного дугового разрядов плазменного катода электронного источника.

В момент времени  $t_0$  на эмиссионный электрод подано регулируемое ускоряющее напряжение (5–25) кВ и установлено требуемое давление рабочего газа в источнике электронов и рабочей камере. Затем, в момент времени  $t_1$  включаются катушки магнитного поля, и максимум через 32 мс, ко времени  $t_2$  ток обеих катушек достигает заранее установленного стационарного значения. В это время подается питание на разрядную ячейку дополнительного анода, а через 1 мс, в момент времени  $t_3$  – на ячейку иницирующего разряда. Через 20 мкс после этого, в момент времени  $t_4$  осуществляется питание основной разрядной ячейки плазменного катода с заранее заданной амплитудой тока и длительностью импульса. Электропитание ячейки дополнительного плазменного анода и ячейки иницирующего разряда плазменного катода подано в течение всего импульса основного разряда.

Дополнительный плазменный анод имеет два режима работы: слаботочный с током до 15 мА при напряжении горения до 5 кВ и основной – с током до 20 А и напряжением горения порядка 300 В. ВАХ слаботочной формы разряда имеет линейно растущий вид и приведена на рис. 4.11. При напряжении горения (3–4) кВ примерно 75% тока разряда замыкается через кольцевой анод. В ток разряда  $I_p$  не входит ток цепи ускоряющего промежутка  $I_g$ .

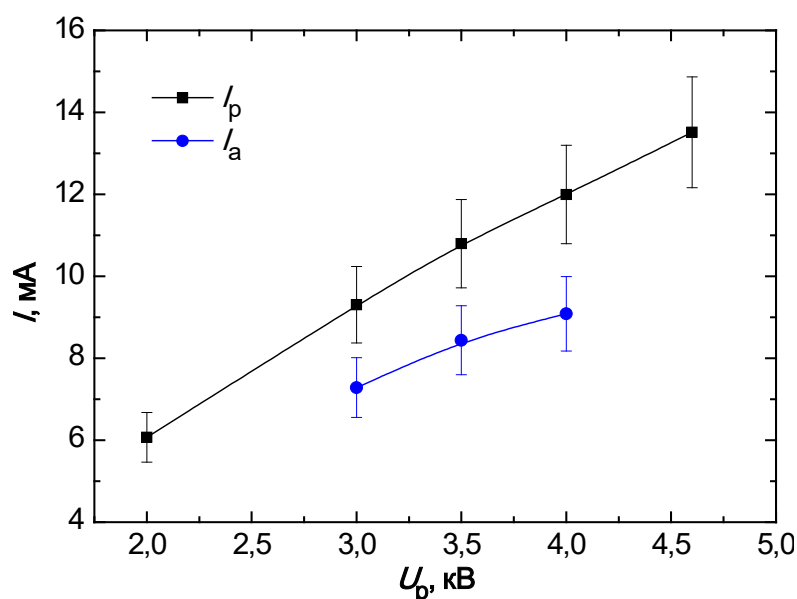


Рисунок 4.11 – ВАХ разряда дополнительного плазменного анода в слаботочном режиме.

$$p_{\text{Ar}} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ Па}, U_g = 10 \text{ кВ}, I_{b1} = I_{b2} = 0.$$

Слаботочный режим может быть использован для ионной очистки электродов источника электронов и источника плазмы между циклами воздействия на коллектор или образцы.

В присутствии магнитного поля соленоидов 5 (Рисунок 4.7), поле кольцевого зазора генератора плазмы ослабляется, что должно приводить к затруднению горения разряда, одновременно полый катод 9 (Рисунок 4.7) создает условия для переключения тока разряда на

заземленный коллектор. В результате разряд переходит в основную форму горения, что можно видеть на осциллограммах рис. 4.12.

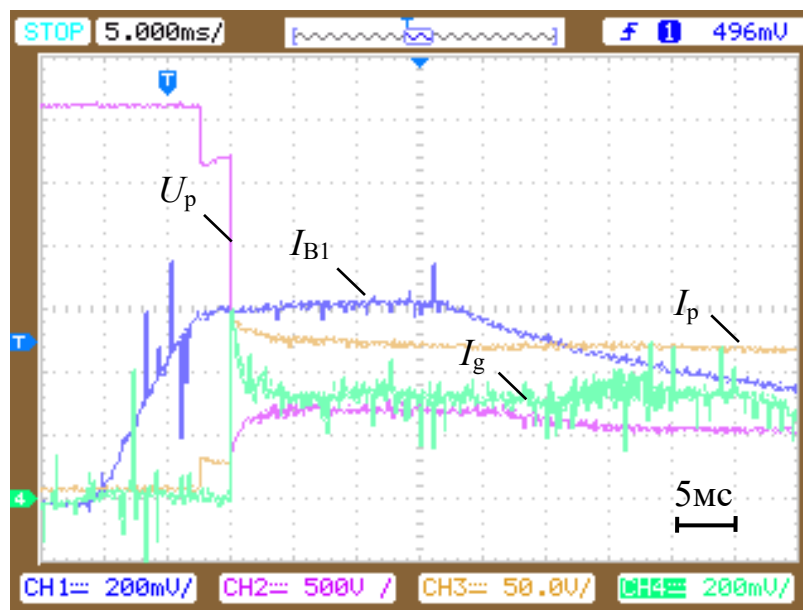


Рисунок 4.12 – Характерные осциллограммы основных цепей системы формирования плазменного анода.  $p_{Ar} = 20$  мПа,  $U_g = 10$  кВ. Синий – магнитное поле в верхней катушке  $I_{B1}$ , 3,3 А/В, 0,7 А/кл.; маджента – напряжение горения разряда плазменного анода  $U_p$ , 500 В/кл., коричневый - ток плазменного анода общий  $I_p$ , 0,8 А/кл.; зелёный – ток в цепи ускоряющего промежутка  $I_g$ , 0,4 А/кл.

Дальнейшее увеличение магнитного поля до 50 мТл может приводить к обратному переходу из основной формы в слаботочную, как показано на рис. 4.13. Возможной причиной является уменьшение тока на полый катод за счёт снижения скорости дрейфа электронов поперек магнитного поля.

Расширить диапазон рабочих параметров удалось введением катода-отражателя 10 (Рисунок 4.7). Он создает дополнительный канал замыкания тока, диафрагмирует часть высоковольтного ускоряющего электрода и, как предполагается, увеличивает концентрацию разрядной анодной плазмы в области эмиссионной сетки. Ситуация, проиллюстрированная на рис. 4.13, относится к случаю, когда вместо катода-отражателя установлена труба дрейфа диаметром 82 мм той же длины. Применение же катода-отражателя позволило генерировать дополнительную анодную плазму при ведущем магнитном поле до 100 мТл, ограниченного системой электропитания.

Даже в отсутствие катода-отражателя и полого катода увеличение давления рабочего газа или наложение аксиального магнитного поля приводит к переходу анодного разряда из

слаботочной формы в основную с характерной скоростью нарастания тока порядка 10 А/мкс. Напряжение перехода в зависимости от давления рабочего газа приведено на рис. 4.14.

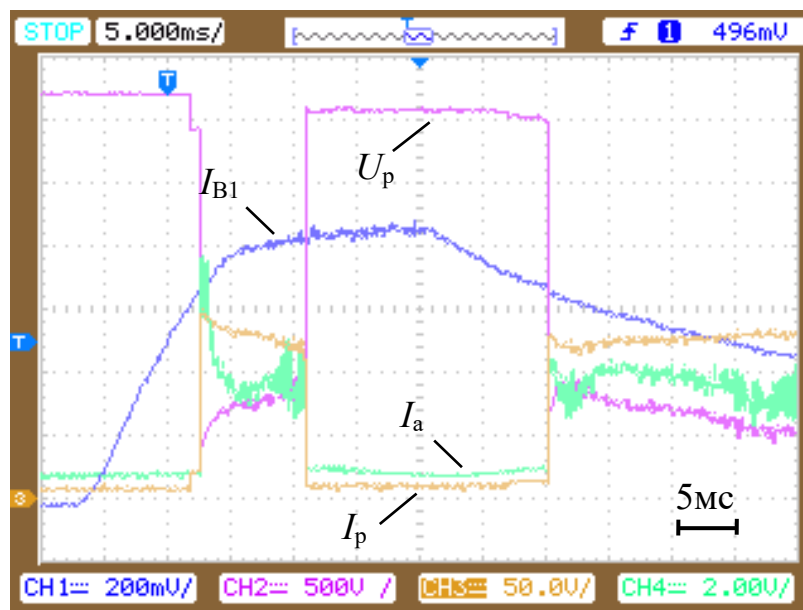


Рисунок 4.13 – Характерные осциллограммы основных цепей системы формирования плазменного анода, иллюстрирующие обратный переход разряда из основного режима в дежурный. Магнитное поле в области генерации пучка  $B_1 = 50$  мТл,  $p = 20$  мПа,  $U_g = 10$  кВ.  $I_{B1} = 0,7$  А/кл.;  $U_p = 500$  В/кл.;  $I_p = 0,8$  А/кл.;  $I_a = 22$  мА/кл.

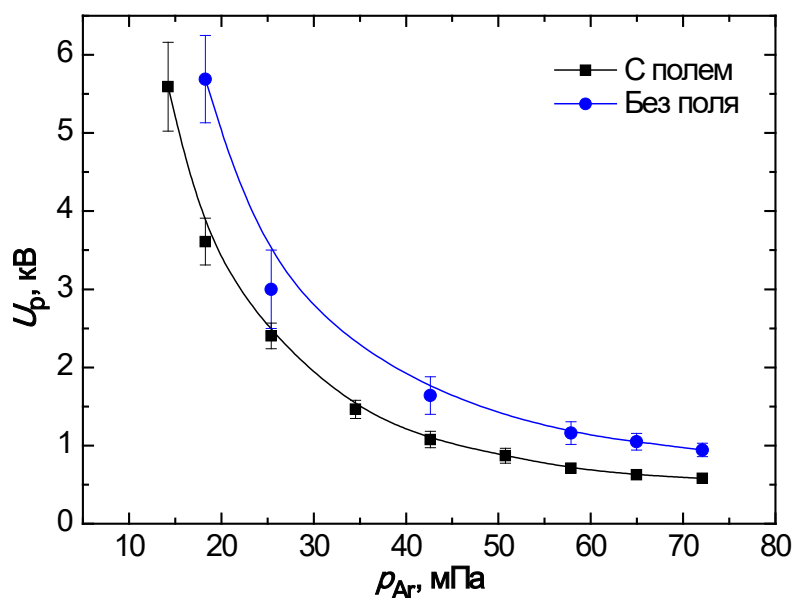


Рисунок 4.14 – Напряжение перехода разряда плазменного анода из слаботочной в основную форму.  $U_g = 10$  кВ. Магнитное поле постоянное 47,5 мТл.

Таким образом, в разработанной разрядной системе в диапазоне давлений от 20 до 70 мПа переключение разряда в основную форму может происходить наложением продольного

магнитного поля, благодаря чему, для некоторых практических приложений систему электропитания генератора дополнительной анодной плазмы можно упростить.

ВАХ разряда ячейки плазменного анода в основном режиме горения почти горизонтальная, она приведена на рис. 4.15а. Плазма анодного разряда присутствует вблизи эмиссионной сетки и эмиссионного электрода, благодаря чему поверхности этих электродов подвержены воздействию потока ионов. Ток в цепи ускоряющего промежутка  $I_g$ , который включает в себя ток ионов с границы анодной плазмы и ток вторичных электронов, не входит в ток  $I_p$ , его характерная величина приведена на рис. 4.15б.

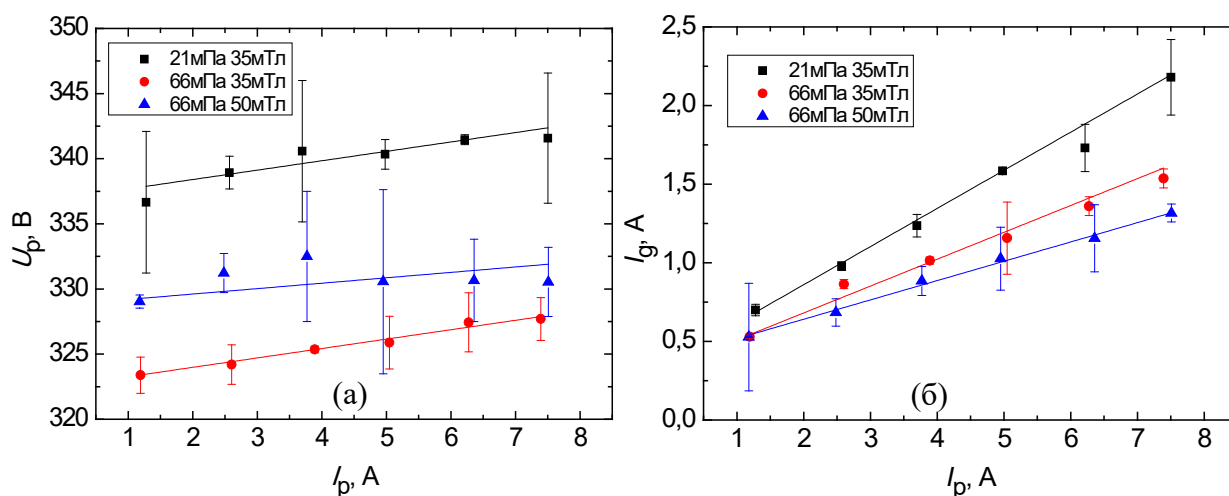


Рисунок 4.15 – ВАХ разряда дополнительного плазменного анода (а) и зависимость тока в ускоряющем промежутке источника электронов от тока разряда плазменного анода (б) при ускоряющем напряжении 5 кВ.

Увеличение тока разряда ячейки дополнительного анода в диапазоне (6 – 20) А приводит к пропорциональному увеличению концентрации анодной плазмы. Например, при давлении рабочего газа 20 мПа, ускоряющем напряжении 5 кВ, внешнем магнитном поле 30 мТл и токе разряда 6 А она составляет  $5,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , при токе 12,5 А – около  $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , при 20 А –  $1,7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

С увеличением ускоряющего напряжения с 5 до 10 кВ концентрация плазмы анодного разряда снижается с  $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Вероятно, это связано с уменьшением потенциала анодной плазмы, т.е. величины анодного падения, что приводит к изменению характера замыкания тока на анод. Регистрируемая температура электронов увеличивается с 9 до 12,5 эВ.

То же увеличение ускоряющего напряжения с 5 до 10 кВ приводит к увеличению концентрации анодной плазмы, созданной пучком электронов. При токе в ускоряющем промежутке 12,5 А  $n_e$  увеличивается незначительно: с  $1,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , при токе 25 А - с  $1,8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $\approx 2,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Величина  $T_{e1}$  в обоих случаях возрастает на (4–6) эВ.

Эффект может быть вызван интенсивной десорбцией газа и испарением материала конструктивных элементов вблизи зонда с последующей ионизацией паров высокоэнергетичными электронами пучковой плазмы.

Установлено, что концентрация пучковой анодной плазмы источника электронов при токе в ускоряющем промежутке 12,5 А и ускоряющем напряжении 5 кВ на порядок превышает концентрацию плазмы анодного разряда с тем же током, и при давлении 20 мПа, магнитном поле 30 мТл составляет  $1,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Двукратное изменение тока в ускоряющем промежутке (и пропорционального увеличения тока пучка электронов) от 12,5 до 25 А за счёт изменения тока основного разряда плазменного катода не приводит к кратному изменению концентрации анодной плазмы. Она возрастает на ~35%. Увеличение тока пучка до 50 А приводит к росту концентрации пучковой плазмы до  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Установлено, что увеличение давления рабочего газа с 20 мПа до 60 мПа приводит к уменьшению величины  $T_{e\perp}$  с 9 эВ до  $\approx 6,5$  эВ плазмы анодного разряда с током 12,5 А, ускоряющим напряжении 5 кВ. При этом температура электронов пучковой плазмы с током в ускоряющем промежутке 12,5 А напротив увеличилась с 7 эВ до почти 14 эВ.

Концентрация пучковой и разрядной плазмы незначительно увеличивалась с ростом рабочего давления от 20 до 60 мПа: разрядной с током разряда 12,5 А – с  $9 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$  до  $1,1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , пучковой с током в ускоряющем промежутке 12,5 А – с  $1,3 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , с током 25 А - с  $1,8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Увеличение напряжения ускоряющего промежутка приводило к зарядке зонда на фронте формирования пучка (Рисунок 4.16). При 15 кВ и давлении 20 мПа потенциал зонда относительно «земли» достигал 3 кВ. Результаты измерений искажались, а также существовала опасность выхода из строя зонда, поэтому в этом диапазоне параметров исследование не выполняли.

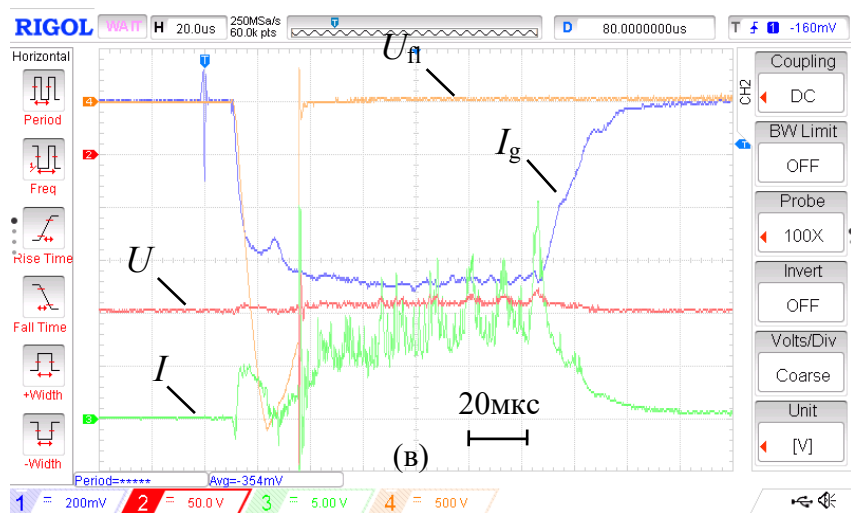
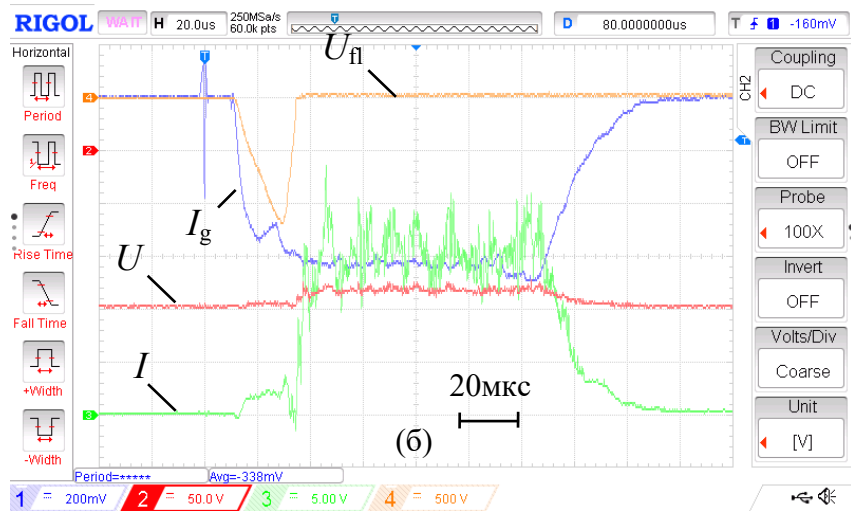
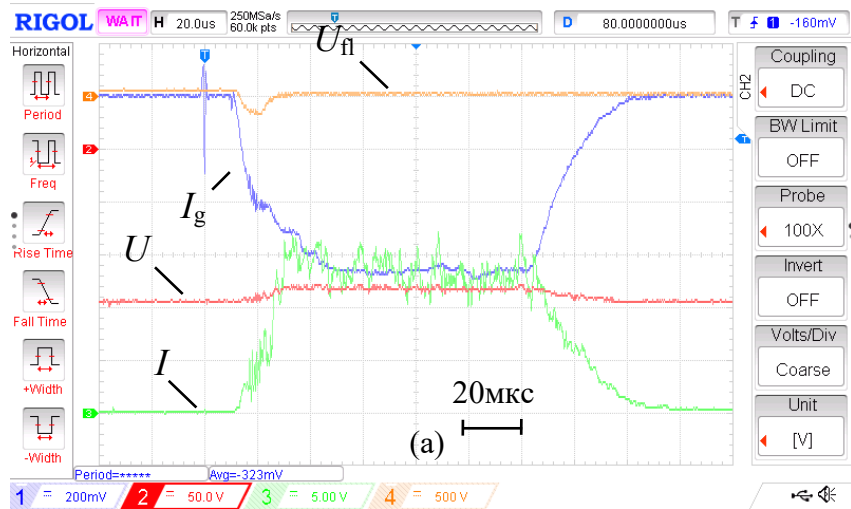


Рисунок 4.16 – Характерные осциллограммы цепей зонда и тока в ускоряющем промежутке для разных ускоряющих напряжений: *а* – 5 кВ, *б* – 10 кВ, *в* – 15 кВ, давление 20 мПа. Синий – ток в ускоряющем промежутке  $I_g$ , 4 А/кл., коричневый – потенциал зонда относительно «земли»  $U_{fl}$ , 500 В/кл., зелёный – ток зонда  $I$ , 20 мА/кл., красный – напряжение смещения зонда  $U$ , 50 В/кл.

Длительность импульса разряда плазменного анода в настоящей работе была постоянной равной 1,3 мс. Через 1 мс после начала импульса тока формируется пучок электронов. Его прохождение через ячейку плазменного анода вызывает короткое замыкание отрицательного вывода блока питания анодного разряда на «землю» на время длительности тока пучка, затем работа дополнительного анода восстанавливается (Рисунок 4.17). Эту особенность необходимо учитывать при разработке системы электропитания.

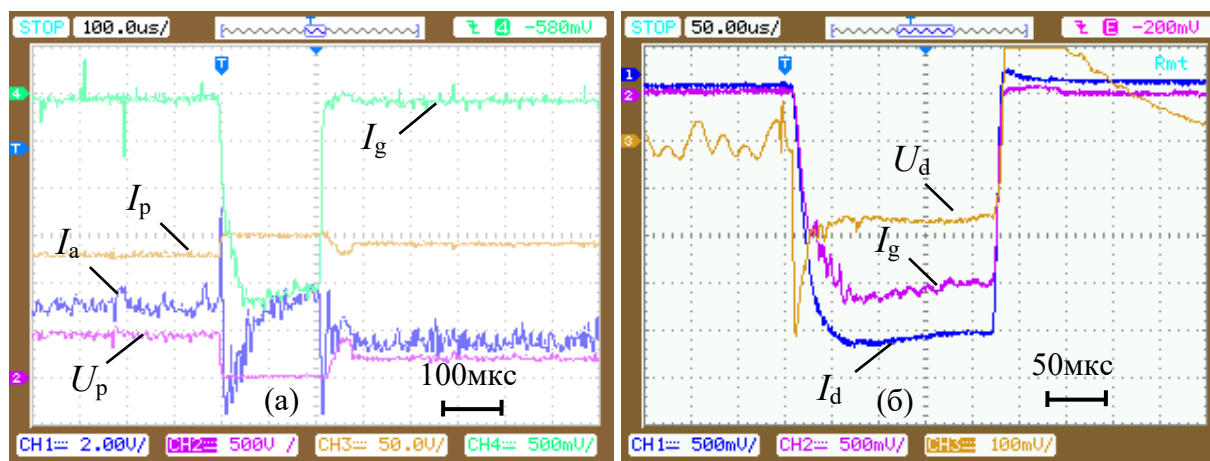


Рисунок 4.17 – Характерные осциллограммы основных цепей системы формирования плазменного анода при наличии пучка электронов (а) и цепей источника электронов (б).

$$\tau = 200 \text{ мкс}, I_d = 50 \text{ А}, p_{Ar} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ Па}, U_g = 10 \text{ кВ}.$$

а) синий – ток кольцевого анода ячейки  $I_a$ , 22 мА/кл.; маджента – напряжение горения разряда плазменного анода  $U_p$ , 500 В/кл.; коричневый – ток плазменного анода общий  $I_p$ , 0,8 А/кл.; зелёный – ток в цепи ускоряющего промежутка  $I_g$ , 10,4 А/кл.

б) синий – ток основного разряда плазменного катода  $I_d$ , 10 А/кл.; маджента – ток в ускоряющем промежутке  $I_g$ , 10 А/кл.; коричневый – напряжение анод-катод основного разряда плазменного катода,  $U_d$ , 20 В/кл.

В отсутствие анодного разряда, когда катоды-магнитопроводы разрядной ячейки заземлены, при прохождении пучка электронов наблюдается ток ионов на кольцевой анод. При токе пучка около  $I_g = 100 \text{ А}$  и давлении рабочего газа  $p_{Ar} = 16 \text{ мПа}$ , его величина составляет 70 мА.

#### 4.4. Влияние дополнительной анодной плазмы на генерацию пучка электронов

На рис. 4.18 приведены радиальные распределения плотности энергии в плоскости коллектора, приносимой ускоренными электронами, образованными за счёт вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода под действием бомбардировки ускоренными ионами из плазмы анодного разряда.

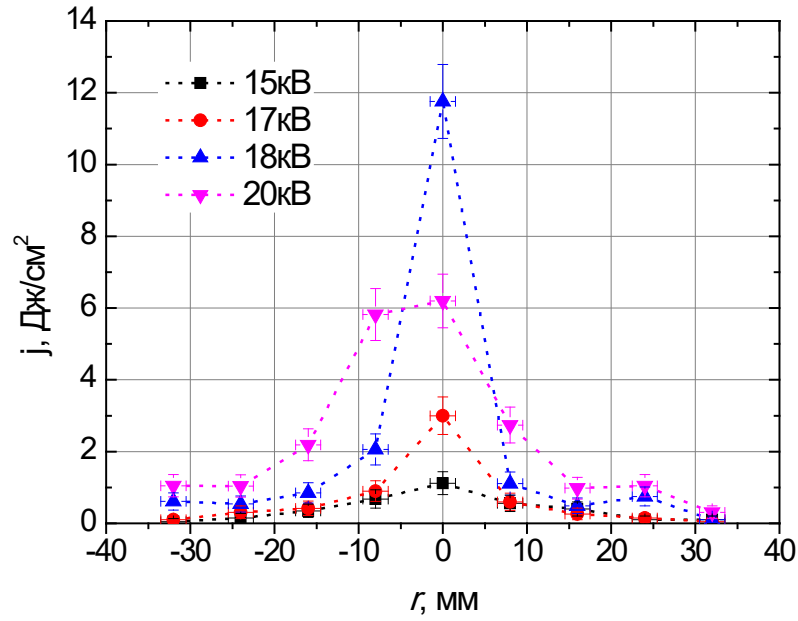


Рисунок 4.18 – Распределение плотности энергии, выделяемой на коллекторе при функционировании разряда дополнительного плазменного анода с током 15 А при разных ускоряющих напряжениях.

Характер распределения позволяет косвенно судить о радиальной неоднородности концентрации разрядной плазмы в плоскости эмиссионного электрода. Примечательно, что на этот параметр заметное влияние оказывает величина ускоряющего напряжения. Распределения плотности энергии, приносимой на коллектор при совместной работе источника электронов и генератора анодной плазмы приведены на рис. 4.19.

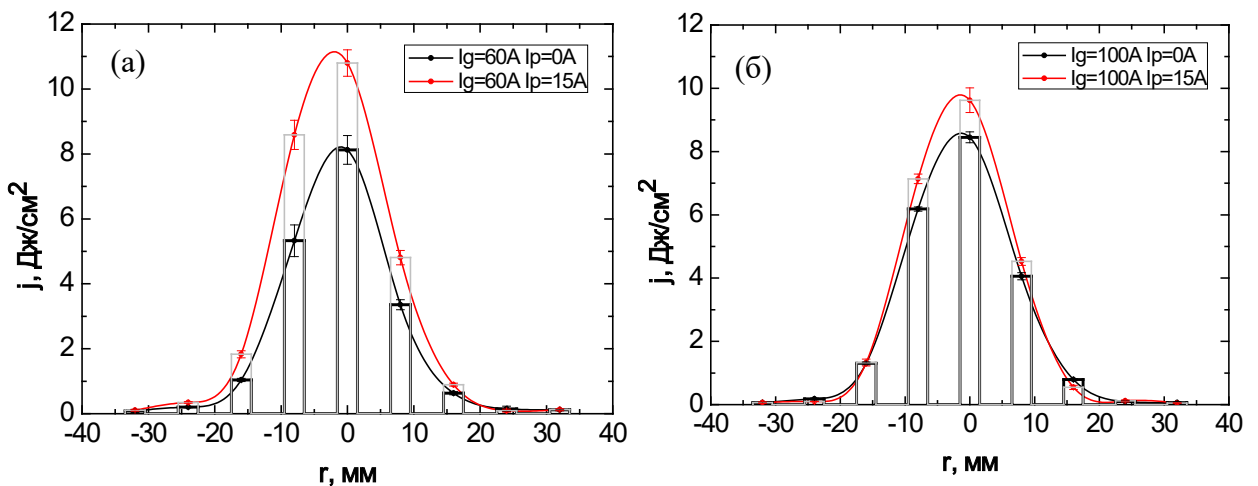


Рисунок 4.19 – Радиальное распределение плотности энергии пучка электронов длительностью 70 мкс в области коллектора для  $I_d = 60$  А,  $U_g = 15$  кВ (а) и  $I_d = 100$  А,  $U_g = 12$  кВ.  $p_{Ar} = 20$  мПа,  $B_z = 30$  мТл.

Влияние дополнительной анодной плазмы на распределение плотности энергии сводится к увеличению регистрируемой плотности энергии за счёт вторичных электронов, приходящих на коллектор до генерации основного пучка.

Установлено, что разработанная разрядная система для генерации анодной плазмы облегчает инициирование основного разряда плазменного катода. Например, при давлении 7,2 мПа, заданном токе разряда плазменного катода 100 А, когда напряжение холостого хода источника питания основного разряда достигало 600 В, и магнитном поле в области генерации 40 мТл, пропуски зажигания разряда составили не более 5%, тогда как без анодного разряда при таких параметрах зажигание основного разряда плазменного катода не происходило.

С понижением давления рабочего газа до 16 мПа можно заметить появление высокочастотных колебаний тока пучка (тока в ускоряющем промежутке) в первые 10 мкс его формирования (Рисунок 4.20).

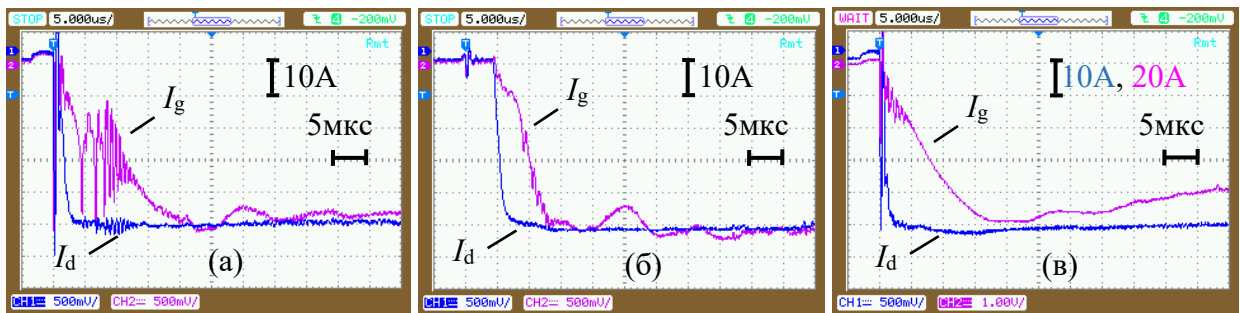


Рисунок 4.20 – Характерные осциллограммы тока основного разряда  $I_d$  и тока в ускоряющем промежутке  $I_g$  источника электронов, демонстрирующие влияние анодного разряда.  $U_g = 10$  кВ,

(а) – без вспомогательного разряда,  $p_{Ar} = 16$  мПа, (б) –  $I_p = 2$  А,  $p_{Ar} = 16$  мПа,

(в) – без вспомогательного разряда,  $p_{Ar} = 42$  мПа.

Несмотря на то, что концентрация пучковой анодной плазмы в установившемся режиме более чем на порядок превосходит концентрацию разрядной плазмы дополнительного анода, наличие последней позволяет подавить высокочастотные колебания на фронте тока пучка или уменьшить их амплитуду. Данный эффект не связан с локальным увеличением давления рабочего газа при работе системы формирования плазменного анода, т.к. увеличение давления неизбежно приводит к росту концентрации плазмы в области эмиссионного электрода и, как следствие, к увеличению тока в цепи ускоряющего промежутка, что не наблюдается в данном случае. Например, увеличение рабочего давления до 42 мПа не привело к полному подавлению шума тока ускоряющего промежутка, сам ток при этом вырос вдвое (Рисунок 4.20в). Высокочастотные колебания тока ускоряющего промежутка можно связать с недостаточной компенсацией пространственного заряда пучка электронов на начальной стадии генерации.

При давлении (25–30) мПа высокочастотные колебания наблюдаются при токе в ускоряющем промежутке 240 А и выше. Их наличие ухудшает электромагнитную совместимость источника электронов и измерительного оборудования, особенно систем контактного измерения параметров плазмы. Применение разработанной системы формирования дополнительной анодной плазмы позволило уменьшить давление, при котором колебания тока в ускоряющем промежутке отсутствуют. В таблице 4.8 оно приведено в зависимости от ускоряющего напряжения и тока анодного разряда для тока в ускоряющем промежутке 240 А и магнитного поля 30 мТл.

Таблица 4.8. Давление в мПа, при котором отсутствуют высокочастотные колебания тока разряда и тока в ускоряющем промежутке при разных ускоряющих напряжениях  $U_g$ , и токах генератора анодной плазмы  $I_p$ .

$U_g$ , кВ \ $I_p$ , А	0	2	15
5	25	20	16
10	30	19	16
15	33	19	12
20	33	17	14

Концентрация пучковой анодной плазмы была измерена в похожих условиях, при токе пучка 100 А, ускоряющем напряжении 5 кВ она составила  $2,4 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Плазма в пространстве дрейфа, создаваемая разработанным источником за 1 мс до генерации пучка электронов имеет концентрацию на один-два порядка ниже, тем не менее, улучшает условия генерации пучка электронов на начальной стадии, что выражается в уменьшении амплитуды высокочастотных колебаний тока пучка или их подавлении. Удалось уменьшить давление, при котором высокочастотные колебания на фронте тока пучка не возникают. Как можно видеть (Таблица 4.8), при токе разряда плазменного анода 2 А давление можно снизить на (20–50)%, при этом эффект тем существеннее, чем выше ускоряющее напряжение. Увеличение тока разряда с 2 А до 15 А позволяет понизить минимальное давление «бесшумного» режима еще на (15–20)% до (12–16) мПа при токе в ускоряющем промежутке 240 А.

Воздействие потока ускоренных ионов на эмиссионный электрод вызывает его травление и очистку. Источником таких ионов может служить плазма дополнительного анода. В следующем эксперименте, сравнивается доля импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов и время возникновения пробоя при наличии дополнительного плазменного анода и в его отсутствие. Во втором случае, все

электроды разрядной ячейки плазменного анода были заземлены, кольцевой анод – через резистор 50  $\Omega$ . Коллектором служил молибденовый цилиндр диаметром 70 мм, толщиной 12 мм. Параметры генерации пучка выбраны  $I_d=400$  А,  $U_g=14$  кВ,  $\tau=50$  мкс,  $f=0,3$  Гц, давление 20 мПа или 65 мПа.

Для определения доли импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов, источник электронов был предварительно оттренирован примерно 1000 импульсами при давлении 20 мПа без включения ячейки плазменного анода. Затем выполнено от 2 до 6 серий по 100 импульсов для каждого  $I_p$  с чередованием его величины. Определялось количество пробоев в первые 15 мкс и за весь импульс длительностью 50 мкс. Результаты приведены в таблице 4.9. Перед определением доли импульсов с пробоями при 65 мПа выполнена тренировка источника электронов 5000 импульсами в указанном давлении.

Таблица 4.9. Доля импульсов с пробоями ускоряющего промежутка от общего числа импульсов.

Ток разряда анода $I_p, \text{А}$	Давление аргона и длительность импульса			
	20 мПа, 15 мкс	20 мПа, 50 мкс	65 мПа, 15 мкс	65 мПа, 50 мкс
0	20% (0,15–0,26)	34% (0,27–0,40)	19% (0,16–0,22)	28% (0,25–0,32)
1,25	-	-	22% (0,19–0,25)	43% (0,39–0,47)
12,5	13% (0,09–0,18)	40% (0,33–0,47)	3% (0,01–0,05)	44% (0,39–0,50)

Таким образом, для источника электронов с плазменным катодом создан генератор дополнительной анодной плазмы оригинальной конструкции. Результатом использования генератора дополнительной анодной плазмы с током разряда 12,5 А является снижение доли импульсов, в которых возникали пробой ускоряющего промежутка в первые 15 мкс импульса тока пучка примерно с 20% до 13% и до 3% при давлении газа 20 мПа и 65 мПа соответственно (Таблица 4.9). Данные справедливы для частоты следования импульсов (0,3 – 1) Гц.

При увеличении длительности импульса до 50 мкс доля импульсов с пробоями возрастает с 34% и 28% до примерно 40%. Это связано с тем, что во время импульса тока пучка на электроды генератора плазмы подается электрическое смещение. Ток, протекающий в цепи генератора плазмы, превышает ток дугообразования, поэтому существует вероятность образования катодных пятен на электродах, находящихся под отрицательным относительно плазмы потенциалом. Катодное пятно вблизи эмиссионного электрода в свою очередь провоцирует пробой ускоряющего промежутка. Таким образом, целесообразно заземлить электродную

систему генератора плазмы дополнительного анода во время прохождения импульса тока пучка. В представленном варианте система эффективна для уменьшения доли импульсов с пробоями при коротких импульсах длительностью около 15 мкс.

Увеличение частоты следования импульсов с 1 Гц до 2 Гц приводит к увеличению доли импульсов, в которых возникали пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов. В частности, при давлении 65 мПа и указанных выше параметрах генерации пучка электронов – с 28% до 40%, что может быть связано с недостаточным временем для отвода энергии пучка от мишени и ее интегральным нагревом при многочисленном электронно-пучковом воздействии.

Таким образом, разработанная система генерации дополнительной анодной плазмы существенно улучшает характеристики источника электронов с плазменным катодом. Установлено, что наличие анодной плазмы облегчает инициирование основного разряда (пропуски зажигания снижаются до 5% в условиях, когда без неё зажигание не происходило) и эффективно подавляет высокочастотные колебания тока пучка на начальной стадии формирования. При этом минимальное рабочее давление «бесшумного» режима снижается на (20–50)% при токе анодного разряда 2 А и дополнительно на (15–20)% при увеличении тока до 15 А.

Применение генератора анодной плазмы с током 12,5 А значительно уменьшает долю импульсов, в которых возникают пробои ускоряющего промежутка от общего числа импульсов: в первые 15 мкс импульса их доля снижается с 20% до 13% при давлении 20 мПа и с 19% до 3% – при давлении 65 мПа.

#### *4.5. Новые возможности использования источников электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления*

Опыт практического применения ПИЭЛ свидетельствует о том, что уменьшение доли импульсов с пробоями ускоряющего промежутка весьма актуально для технологических процессов, связанных с воздействием на поверхность легкоплавких материалов, например, алюминия и его сплавов. Также это относится к системам «алюминиевая плёнка/подложка». В качестве примера практического использования источника электронов для улучшения свойств поверхности материалов проведено алитирование стали 20 из покрытия, выполненное на Стенде 1 с целью дальнейшего азотирования [95].

Химический состав стали 20 приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10. Химический состав стали (вес.%)

Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P	Cu
~ 98	0,17–0,24	< 0,25	< 0,25	0,35–0,65	0,17–0,37	< 0,04	< 0,04	< 0,25

На полированные до шероховатости  $R_a \sim 0,02$  мкм цилиндрические образцы стали диаметром 16 и высотой 5 мм методом дугового распыления с плазменным ассистированием на установке «КВИНТА» [96] нанесены плёнки чистого ( $\geq 99,95\%$ ) алюминия толщиной 1, 2,5 и 5 мкм. Полученные системы «пленка (Al) / подложка (сталь 20)» подвергались электронно-пучковому воздействию в трех режимах, представленных в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Режимы электронно-пучковой обработки

Условное обозначение режима	$I_d$ , А	$U_{g0}$ , кВ	$\tau$ , мкс	$B_1$ , мТл	$B_2$ , мТл	$E_s$ , Дж/см <sup>2</sup>	$W_s$ , МВт/см <sup>2</sup>	$p_{Ar}$ , мПа	$n$
50 мкс	200	25	50	58	100	23	0,46	25	3
100 мкс	200	22	100	60	80	30	0,3	25	3
200 мкс	200	19	200	65	80	40	0,22	25	3

Здесь  $I_d$  – величина тока основного разряда плазменного катода,  $U_{g0}$  – начальное ускоряющее напряжение,  $\tau$  – длительность импульса пучка,  $B_1$  – магнитное поле в области плазменного катода,  $B_2$  – магнитное поле в области образца,  $E_s$  – плотность энергии, приносимая пучком электронов за один импульс воздействия,  $W_s$  – плотность мощности пучка электронов,  $p_{Ar}$  – давление рабочего газа (аргона) в вакуумной камере,  $n$  – количество импульсов воздействия пучка.

Конфигурацию магнитного поля выбирали так, чтобы плотность энергии на диаметре образца можно было считать однородной. Распределение концентрации алюминия по глубине образцов стали с нанесенными пленками алюминия после воздействия пучком электронов исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа поперечного шлифа. Результаты приведены на рис. 4.21.

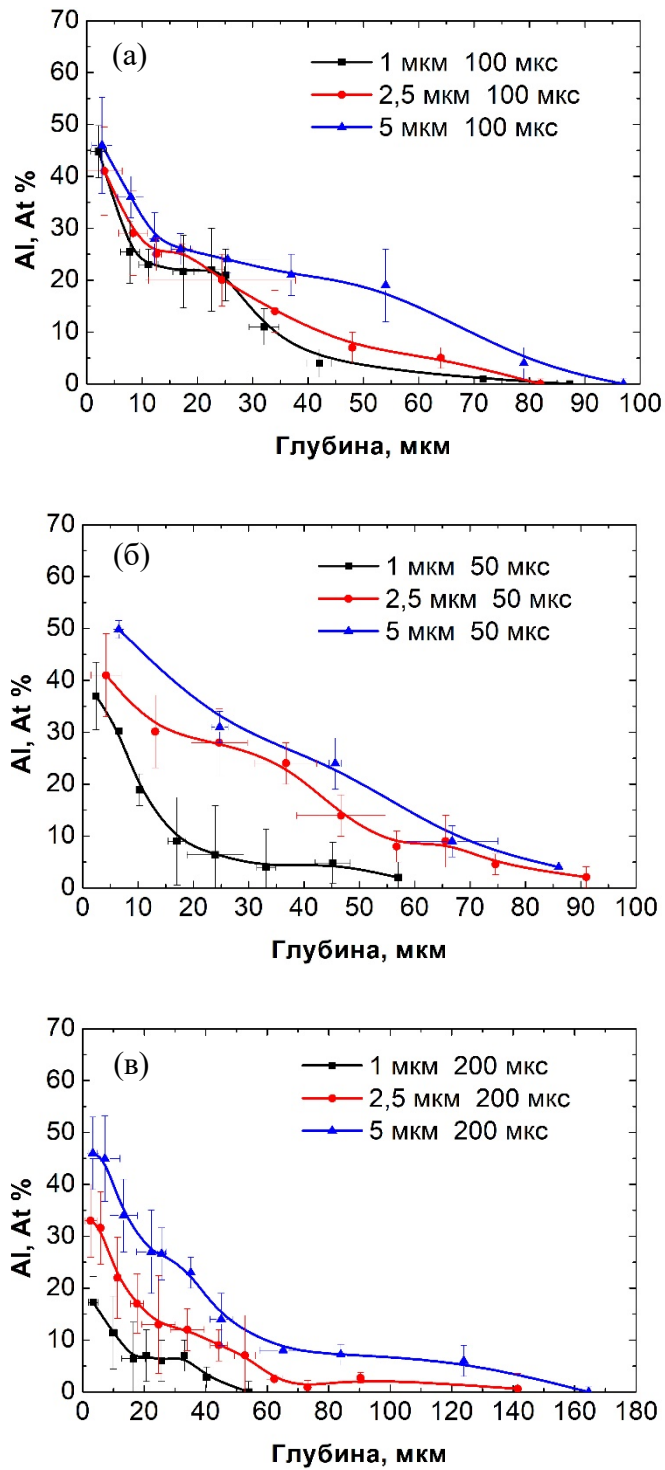


Рисунок 4.21 – Распределение концентрации алюминия по глубине

Во всех представленных режимах электронно-пучкового воздействия для выбранных толщин пленок алюминия произошло легирование поверхности стали 20 на глубину более 20 мкм. При большей толщине нанесенной пленки концентрация алюминия вблизи поверхности стали после воздействия пучка электронов с одинаковыми параметрами оказывается выше. Глубина, на которой методом микрорентгеноспектрального анализа обнаруживается алюминий также возрастает с увеличением толщины нанесенного слоя алюминия. Скорость убывания

концентрации различна для разных режимов воздействия, она не постоянна и изменяется с глубиной. Облучение системы «пленка (5 мкм Al) / подложка (сталь 20)» в режиме «200 мкс» приводит к проникновению атомов алюминия на глубину более 120 мкм.

Микротвердость стали 20 определяли методом Викерса. В исходном состоянии она составляет  $HV_{1,0} = 2640$  МПа. Тенденции изменения микротвердости поверхности в зависимости от параметров воздействия пучка электронов и толщины нанесённой пленки алюминия можно пронаблюдать на рис. 4.22.

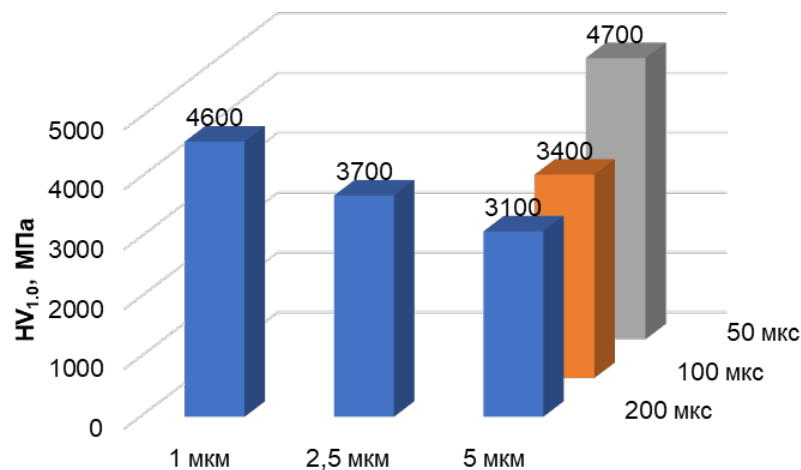


Рисунок 4.22 – Микротвердость ( $HV_{1,0}$ , МПа) на поверхности образцов «пленка (Al) / сталь (подложка)» после воздействия электронного пучка

На образцах с плёнкой 5 мкм наблюдается увеличение микротвердости поверхности при сокращении длительности электронно-пучкового воздействия. При воздействии пучком в режиме «200 мкс» на систему Al(пленка)/ст.20(подложка) при толщине пленки в диапазоне (1 – 5) мкм наблюдается уменьшение микротвердости поверхности с увеличением толщины покрытия. Однако во всех исследуемых случаях микротвердость после воздействия оказалась выше, чем у исходного образца стали без нанесенного покрытия.

Стоит отметить, что микротвёрдость поверхности образцов без покрытия, подвергнутых воздействию в режимах «50 мкс» и «200 мкс» составила 4580 и 4680 МПа соответственно. Необходимо также отметить, что Ст.20 (содержание углерода 0,13%) не относится к сталям, которые могут быть закалены в стандартных условиях. В [97] показано, что для сталей с содержанием углерода около 0,1% увеличение твердости около 30HRC и появление мартенситной фазы возможно добиться при сверхбыстрой закалке (более 5000 К/с). Такие условия с запасом обеспечивает воздействие интенсивного импульсного электронного пучка. Таким образом можно сделать вывод, что обработка стали 20 с помощью импульсного

электронного пучка (промежуточная стадия в нашем случае) представляет отдельный интерес для технологии поверхностной обработки.

Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что обработка в режиме «50 мкс» стали 20 с покрытием толщиной 1 мкм приводит к образованию на поперечном изломе области хрупкого разрушения поверхностного слоя на глубину до  $\sim(40-60)$  мкм (Рисунок 4.23).

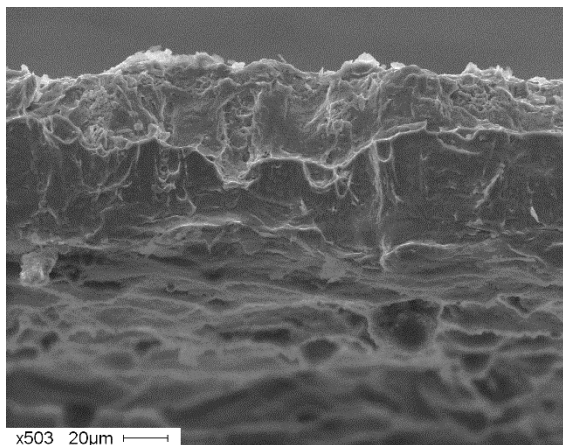


Рисунок 4.23 – Изображение структуры изломов поперечного сечения образца Ст.20, формирующейся при облучении системы «пленка (Al)/подложка» импульсным электронным пучком в режиме «50 мкс» (Таблица 4.11). Толщина пленки алюминия 1 мкм.

Трибологические свойства стали изучали на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester («TRIBOtechnic», Франция) в условиях сухого трения (Таблица 4.12). Тест на износостойкость проводился в геометрии «шарик-диск» при следующих параметрах: шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм, нагрузка 3 Н, дистанция 300 м, радиус трека износа 2 мм, скорость перемещения шарика 25 мм/с. Износостойкость образцов стали рассчитывали после проведения профилометрии трека износа. Снижение параметра износа (улучшение износостойкости) отражено в таблице ниже.

Таблица 4.12. Результаты трибологических испытаний алитированной стали (толщина пленки алюминия 1 мкм, длительность импульса пучка электронов 50 мкс)

Состояние стали	Параметр износа, $10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /Н*м	Коэффициент трения
Исходное	3,2	0,44
1 мкм Al + «50 мкс»	1,4	0,44

Таким образом, с помощью источника электронов с меньшей долей импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка, выполнено алитирование стали 20 из покрытия путём импульсного электронно-пучкового воздействия. Модифицированная поверхность

обладает увеличенной микротвёрдостью и износостойкостью (снижен параметр износа с 3,2 до  $1,4 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Нм) при близком (0,44) коэффициенте трения. Алитирование поверхности позволяет провести последующую технологическую операцию – азотирование, котораякратно увеличивает микротвёрдость поверхности представленных образцов до (17200–22600) МПа. Полученные результаты еще раз демонстрируют перспективность электронно-пучковой обработки материалов с целью улучшения физико-механических свойств.

Широкий диапазон изменения плотности мощности пучка позволил использовать источник электронов с улучшенными характеристиками в исследованиях по электронно-пучковой модификации поверхности коронарных стентов, которые показали, что в результате такого энергетического воздействия возможно удаление крапа на внутренней поверхности стента и удовлетворительное сглаживание внешней и внутренней поверхностей стента, что подтверждается актом внедрения (Приложения).

#### *4.6. Выводы*

1. На начальной стадии генерации пучка в источнике с дуговым плазменным катодом наблюдаются выраженные переходные процессы (всплески тока, высокочастотные колебания, изменение распределения тока), параметры и длительность которых зависят от давления, ускоряющего напряжения, магнитного поля и формы тока дугового разряда. Показано, что уменьшение скорости роста тока в ускоряющем промежутке за счёт формирования «медленного» участка фронта дугового разряда существенно повышает электрическую прочность ускоряющего промежутка без снижения энергии пучка. В режиме  $U_{g0} = 17$  кВ,  $p_{Ar} = 37$  мПа,  $\tau = 100$  мкс при токе в ускоряющем промежутке  $\sim 200$  А уменьшение  $dI_g/dt$  с 65 до 9 А/мкс снизило долю импульсов, в которых возникают пробойи ускоряющего промежутка от общего числа импульсов с 24,5% до 8%, что связывается с подавлением всплеска тока, обусловленного десорбцией газа и переходными процессами в эмиссионной плазме.

2. Существенным дестабилизирующим фактором работы источника электронов с плазменным катодом и анодом является распространение коллекторной плазмы и паров материала мишени в сторону ускоряющего электрода, приводящее к формированию неуправляемого «вторичного» импульса тока в ускоряющем промежутке после окончания основного дугового разряда. Показано, что введение поворотного канала транспортировки с отклонением траектории электронов на 90° уменьшает амплитуду этого импульса более чем на порядок и во многих режимах работы устраняет его. В результате поворотная система транспортировки (длина  $\sim 80$  см) позволяет при длительностях импульса  $\geq 50$  мкс существенно увеличить предельные параметры, ограниченные пробоем ускоряющего промежутка: амплитуду тока в ускоряющем промежутке до 3,5 раз по сравнению с каналом транспортировки 30 см

(например, при  $\tau = 150$  мкс,  $U_g = 20$  кВ,  $p_{Ar} = 25$  мПа – с 90 до 315 А) и энергию в ускоряющем промежутке до 2,5 раз (с 300 до 740 Дж). Таким образом удлиненный и поворотный канал транспортировки повышает электрическую прочность ускоряющего промежутка и улучшает управляемость энергией, доставляемой на образец.

3. Создание в ПИЭЛ с сеточным плазменным катодом и открытым плазменным анодом с концентрацией плазмы ( $10^{10} - 10^{11}$ ) см<sup>-3</sup> за 1 мс до формирования пучка, что на 1–2 порядка меньше, чем у пучковой плазмы, достаточно для облегчения зажигания дугового разряда ПИЭЛ и улучшения условий компенсации пространственного заряда пучка на фронте импульса. Показано, что при давлении 7,2 мПа, магнитном поле 40 мТл, напряжении холостого хода источника питания разряда 600 В без анодного разряда зажигание плазменного катода не происходило, тогда как при наличии предварительной анодной плазмы пропуски зажигания составили менее 5%.

4. Дополнительная анодная плазма подавляет высокочастотные колебания тока в ускоряющем промежутке, наблюдаемые на первых (10–15) мкс формирования пучка и позволяет снизить минимальное давление «бесшумного» режима при токе в ускоряющем промежутке 240 А и магнитном поле 30 мТл на (20–50)% с (25–33) мПа до (17–20) мПа при  $I_p = 2$  А и на (36–64)% до (14–16) мПа при  $I_p = 15$  А в диапазоне  $U_g$  (5–20) кВ. При этом, чем больше напряжение, тем больше удаётся снизить давление до возникновения шумов.

5. Показано, что предварительная анодная плазма в пространстве дрейфа снижает долю импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов: для коротких импульсов  $\tau = 15$  мкс,  $I_d = 400$  А,  $U_g = 14$  кВ дополнительная анодная плазма, генерируемая созданным источником при  $I_p = 12,5$  А снижает долю импульсов с пробоем ускоряющего промежутка от общего числа импульсов с  $\approx 20\%$  до 13% при  $p_{Ar} = 20$  мПа и до 3% при  $p_{Ar} = 65$  мПа.

6. Улучшенные характеристики источника электронов позволили выполнить алитирование стали 20 из покрытия на глубину более 120 мкм (при толщине покрытия 5 мкм и длительности импульса 200 мкс), тем самым снизить параметр износа с 3,2 до  $1,4 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, а также воздействовать на алюминиевую мишень в режиме плавления поверхности с энергией в пучке 530 Дж и мощностью 2,3 МВт за импульс до её разрушения без возникновения пробоев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Показано, что в осесимметричной разрядной ячейке плазменного эмиттера на основе дугового разряда плотность тока на анод в его центральной части на первой микросекунде горения разряда может кратно превышать стационарное значение, устанавливающееся после 10-ой – 50-ой микросекунды. Например, в разрядной ячейке длиной 84 мм диаметром 86 мм плазменного эмиттера с катодом в форме канала диаметром 8 мм длиной 50 мм при токе разряда 60 А плотность тока в центральной части анода с первой по 20-ую микросекунду горения разряда уменьшается с  $1,3 \text{ А/см}^2$  до  $0,64 \text{ А/см}^2$ .

2. Установлено, что в плазменном источнике электронов концентрация анодной пучковой плазмы и поток ионов с её границы, проникающий через ячейки эмиссионной сетки в плазменный эмиттер, существенно влияет на потенциал катодной плазмы. Например, увеличение концентрации анодной плазмы путем организации несимметричного отражательного разряда в пространстве транспортировки электронного пучка, а, следовательно, плотности ионного тока с её границы, в случае использования эмиссионной сетки с ячейкой  $(0,3 \times 0,3)$  мм приводит к увеличению потенциала плазмы относительно анода с 30 до 60 В при токе плазменного катода 100 А и давлении аргона в вакуумной камере 67 мПа.

3. Реализованы три эффективных способа повышения стабильности генерации широкоапертурных импульсных пучков в источниках электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления: увеличение длительности фронта тока разряда плазменного катода, увеличение длины канала транспортировки пучка и его поворот, создание дополнительной анодной плазмы перед генерацией пучка электронов.

4. Магнитная система транспортировки пучка электронов в форме четверти тора позволяет кардинально ослабить влияние коллекторной плазмы на источник электронов. При прочих равных условиях поворот канала транспортировки эффективнее прямого канала увеличивает максимальные параметры, если длительность импульса или ускоряющее напряжение выше.

Транспортировка электронного пучка с поворотом траектории на  $90^\circ$  позволяет до 2,3 раз повысить максимальный ток в ускоряющем промежутке (со 140 А до 315 А) и до 1,2 раз увеличить энергию, переносимую в цепи ускоряющего промежутка (со 605 Дж до 740 Дж), относительно системы транспортировки без поворота той же длины 80 см при обработке алюминия импульсами длительностью 150 мкс с ускоряющим напряжением 20 кВ при давлении 25 мПа. Механизм улучшения связан с подавлением неконтролируемого вторичного импульса тока (амплитуда снижается более чем на порядок) и уменьшением количества паров материала

мишени, достигающих эмиссионного электрода. Поворотную систему транспортировки наиболее целесообразно применять в режимах с длинными импульсами (150 мкс и более) при высоком ускоряющем напряжении (20 кВ).

5. Снижение скорости роста тока в цепи ускоряющего промежутка с 65 А/мкс до 9 А/мкс за счёт формирования участка плавного нарастания тока разряда плазменного катода позволило уменьшить долю импульсов, в которых возникают пробой ускоряющего промежутка от общего числа импульсов с 25% до 8%. Эффект связан с подавлением всплеска тока на фронте импульса и уменьшением плотности тока эмиссии на оси источника, обусловленного переходными процессами в плазменном катоде. Данный метод наиболее целесообразен для источников электронов с длительностью импульса от 100 мкс, где фронт тока порядка 20 мкс является приемлемым и не оказывает существенного влияния на технологический процесс.

6. Создан генератор дополнительной анодной плазмы, использование которого снижает долю импульсов с пробоями ускоряющего промежутка в первые 15 мкс импульса с 20% до 13% при давлении 20 мПа и с 19% до 3% при давлении 65 мПа (ток анодного разряда 12,5 А,  $I_d = 400$  А,  $U_g = 14$  кВ). Дополнительно устройство облегчает инициирование разряда плазменного катода, подавляет высокочастотные колебания тока пучка и позволяет снизить минимальное рабочее давление на 20–50%. Эффект обусловлен ионным травлением и очисткой поверхности эмиссионного электрода, влиянием поступающих в разрядную ячейку плазменного катода ионов, а также улучшением компенсации пространственного заряда пучка на начальной стадии формирования.

Представленные способы могут служить **практическими рекомендациями** для уменьшения вероятности пробоя ускоряющего промежутка, расширения диапазона рабочих параметров – снижения рабочего давления, увеличения мощности и энергии генерируемого пучка, а также улучшения управляемости током эмиссии в любом источнике электронов с сеточным плазменным катодом и плазменным анодом с открытой границей плазмы.

Реализация указанных способов открывает **новые перспективы** для обработки материалов. Например, удалось выполнить алитирование поверхности стали путём воздействия пучка электронов на систему «пленка (Al) / подложка (сталь 20)» с управляемыми воспроизводимыми параметрами практически без пробоев ускоряющего промежутка. Уменьшение вероятности пробоя ускоряющего промежутка делает возможным внедрение источников электронов в реальный производственный цикл, например, для полировки изделий, созданных методами аддитивного производства или изделий медицинского назначения, таких, как коронарные стенты.

**Перспективы дальнейшего развития** тематики связаны с теоретическими и экспериментальными исследованиями транспортировки пучка электронов в плазме в криволинейной магнитной системе транспортировки.

Работы по тематике диссертации поддержаны: грантом РФФИ № 25-49-10018 (2026-2028) – основной исполнитель; грантом № СП-3423.2019.1 (2019-2020) – руководитель; грантом РФФИ № 20-79-10015, № 20-79-10015П (2020-2025) – основной исполнитель; проектом РФФИ № 20-21-00111 Росатом (2020-2022) – исполнитель; проектом РФФИ № 18-42-703010 р\_мол\_a (2018-2019) – исполнитель; проектом РФФИ № 13-08-00416 А (2018-2019) – исполнитель.

В заключении автор искренне благодарит д.т.н. М.С. Воробьёва, под руководством которого была выполнена диссертационная работа. Автор признателен д.т.н., проф. Н.Н. Ковалю, В.Н. Девяткову, С.В. Григорьеву, А.Д. Тересову, С.С. Ковальскому, к.т.н. И.В. Лопатину за полезные дискуссии и помощь в проведении экспериментов, д.ф.-м.н. Т.В. Коваль за помощь в теоретических оценках. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН за всестороннюю поддержку и рекомендации по теме диссертационной работы.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Koleva, E. G. Experience on electron beam welding / E. G. Koleva, G. M. Mladenov // Practical Aspects and Applications of Electron Beam Irradiation / ed. by M. R. Nemtanu, M. Brasoveanu. — India : Transworld Research Network, 2011. — P. 95–115.
2. Мишигдоржийн, У. Л. Наплавка на сталь 3Х2В8Ф и 5ХНМ пучком электронов в вакууме насыщающих смесей, содержащих В<sub>4</sub>С и Al / У. Л. Мишигдоржийн, А. П. Семенов, Н. С. Улаханов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2022. — № 6. — С. 103–107.
3. Drobiaz, E. A. Synthesis of corrosion-resistant coatings by non-vacuum electron beam surfacing: production, structure, and properties / E. A. Drobiaz, M. G. Golkovsky, V. G. Burov [et al.] // Russian Physics Journal. — 2024. — Vol. 67, No. 5. — P. 542–549.
4. Энгелько, В. И. Установка Геза 4М для электронно пучковой модификации поверхности оболочек твэлов РУ с ТЖМТ / В. И. Энгелько, Е. П. Павлов, К. И. Ткаченко, Н. П. Щеголихин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно реакторные константы. — 2019. — № 1. — С. 67–74.
5. Ротштейн, В. П. Модификация поверхностных слоёв металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками / В. П. Ротштейн, Д. И. Проскуровский, Г. Е. Озур, Ю. Ф. Иванов. — Новосибирск : Новосибирское отделение издательства «Наука», 2019. — 348 с.
6. Загуляев, Д. В. Закономерности эволюции структурно фазового состояния доэвтектического силумина, облучённого интенсивным импульсным электронным пучком, при пластической деформации / Д. В. Загуляев, Ю. А. Шлярова, А. А. Абатурова [и др.]. — Москва : ООО «Русайнс», 2024. — 204 с.
7. Ротштейн, В. П. Источники интенсивных импульсных электронных пучков для поверхностной термообработки материалов / В. П. Ротштейн, Д. И. Проскуровский, Г. Е. Озур, Ю. Ф. Иванов // Модификация поверхностных слоёв металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. — Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 2019. — С. 9–70.
8. Батраков, А. В. Воздействие сильноточного электронного пучка на металлические материалы : методические указания к выполнению работ по курсу «Эмиссионная электроника» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210102 «Микроволновая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» / А. В. Батраков, А. Б. Марков. — Томск : Изд-во ТПУ, 2008. — 24 с.

9. Коваль, Н. Н. Экспериментальные исследования и моделирование импульсного электронно пучкового воздействия на систему «ZrN покрытие/подложка из силумина» / Н. Н. Коваль, Т. В. Коваль, О. В. Крысина [и др.] // Потoki энергии и радиационные эффекты (EFRE 2022) : Congress Proceedings, Tomsk, 02–08 октября 2022 года / ed. by D. Sorokin, A. Grishkov. — Tomsk : TPU Publishing House, 2022. — С. 837–850.

10. Коваль, Т. В. Экспериментальное и численное исследование температуры поверхности титана при импульсном электронно пучковом воздействии / Т. В. Коваль, А. Д. Тересов, П. В. Москвин [и др.] // Взаимодействие излучений с твёрдым телом (ВИТТ 2017) : материалы 12 й Международной конференции, Минск, 19–22 сентября 2017 года. — Минск : Белорусский государственный университет, 2017. — С. 458–460.

11. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов / Ю. Е. Крейнделъ. — М. : Атомиздат, 1977. — 144 с.

12. Источники электронов с плазменным эмиттером / под ред. Ю. Е. Крейнделя. — Новосибирск : Наука, 1983. — 120 с.

13. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / под ред. П. М. Щанина. — Екатеринбург : УИФ «Наука», 1993. — 152 с.

14. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейнделъ, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.

15. Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е. М. Окс ; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. — Томск : Издательство научно технической литературы, 2005. — 212 с.

16. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали / В. А. Гришунин, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Ю. А. Денисова. — Новокузнецк : Полиграфист, 2012. — 307 с. — (Фундаментальные проблемы современного материаловедения).

17. Иванов, Ю. Ф. Поверхностное легирование высокохромистой стали интенсивным импульсным электронным пучком / Ю. Ф. Иванов, А. А. Клопотов, А. Д. Тересов [и др.] // Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс : сб. науч. трудов, посвящённый 70 летию доктора технических наук, профессора А. Н. Смирнова. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, 2017. — С. 277–305.

18. Koval, N. N. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode / N. N. Koval, S. V Grigoriev, V. N. Devyatkov, A. D. Teresov, P. M. Schanin // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2009. — Vol. 37, No. 10. — P. 1890–1896.

19. ТЭТА — российский лидер электроннолучевых технологий // ООО «НПК ТЭТА». — URL: <https://tetacom.ru/> (дата обращения: 02.10.2025).

20. Установки электроннолучевой сварки // АО «НИТИ „Прогресс“». — URL: <https://niti-progress.ru/ustanovki-elektronno-luchevoj-svarki/kamery> (дата обращения: 02.10.2025).

21. Панин, А. В. Микроструктура и механические свойства изделий из титанового сплава Ti 6Al 4V, полученных методом аддитивных технологий / А. В. Панин // Аддитивные технологии: металлы, композиты и биоматериалы : материалы II–V Всероссийских школ и конференций, Москва, 02 октября 2019 года – 29 2023 года. — Москва : НИТУ «МИСИС», 2024. — С. 12–15.

22. Devito, F. Advancing sustainability in electron and laser beam powder bed fusion technologies via innovation: insights from patent analysis / F. Devito, E. Dal Padulo, R. Rotondi [et al.] // *Computers & Industrial Engineering*. — 2025. — Vol. 201. — P. 110794.

23. Патент № 2841698 С1 Российская Федерация, МПК В23К 15/02, H01J 37/305, H01J 37/304. Способ электронно лучевой наплавки : заявл. 04.10.2024 ; опубл. 16.06.2025 / А. В. Никифоров, И. С. Бушмелев, С. А. Веретенников ; заявитель ОАО «Научно исследовательский технологический институт „Прогресс“».

24. Патент № 2804862 С1 Российская Федерация, МПК В23К 15/00, В23К 9/04. Способ электронно лучевой наплавки металла с регулированием тепловложения : № 2022134565 : заявл. 27.12.2022 ; опубл. 06.10.2023 / С. В. Варушкин, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький ; заявители: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО «ИКСВЕЛД».

25. Reinhold, E. Large area electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) and plasma activated electron beam (EB) evaporation — status and prospects / E. Reinhold, J. Faber // *Surface and Coatings Technology*. — 2011. — Vol. 206, No. 7. — P. 1653–1659.

26. Heinß, J. P. Investigation and application of EB-PVD and related processes for high-rate deposition of aluminum alloys / J. P. Heinß // *Surface and Coatings Technology*. — 2024. — Vol. 478. — P. 130313.

27. Ray, A. Г. Электронно лучевая пушка с термокатодом для сварочной установки / А. Г. Ray, М. С. Воробьёв, Е. М. Окс, Н. В. Гаврилов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2017. — Т. 20, № 2. — С. 129–131.

28. Новиков А. А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. — М., 1983.

29. Patent US 2013/0248486 A1 United States. Electron beam polishing of aluminum : appl. Sep. 26, 2012 ; publ. Sep. 26, 2013 / Simon R., Purwadi Raharjo, Kensuke Uemura. — 23 p.

30. Форвакуумные плазменные источники электронов / Е. М. Окс, В. А. Бурдовицин, А. С. Климов [и др.]. — Томск : Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2014. — 288 с.

31. Марков, А. Б. Установка РИТМ СП для формирования поверхностных сплавов / А. Б. Марков, А. В. Миков, Г. Е. Озур, А. Т. Падей // Приборы и техника эксперимента. — 2011. — № 6. — С. 122–126.
32. Проскуровский, Д. И. Эмиссионная электроника : учебное пособие / Д. И. Проскуровский. — 2 е изд., испр. и доп. — Томск : Томский государственный университет, 2010. — 287 с.
33. Эмиссионная электроника / Н. Н. Коваль, Е. М. Окс, Ю. С. Протасов, Н. Н. Семашко ; под ред. Ю. С. Протасова. — Москва : Издательство МГТУ, 2009. — 595 с. — (Электроника. Прикладная электроника).
34. Коваль, Н. Н. Генерирование импульсных электронных пучков с равномерным распределением высокой плотности тока в системах с плазменным сетчатым эмиттером / Н. Н. Коваль, Ю. Е. Крейндель, П. М. Щанин // Журнал технической физики. — 1983. — Т. 53, № 9. — С. 1846–1848.
35. Гаврилов, Н. В. Высокоэффективная эмиссия плазменного катода с сеточной стабилизацией / Н. В. Гаврилов, Д. Р. Емлин, А. С. Каменецких // Журнал технической физики. — 2008. — Т. 78, № 10. — С. 59–64.
36. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда. — М. : Наука, 1987. — 511 с.
37. Пирс, Д. Р. Теория и расчёт электронных пучков / пер. с англ. Л. А. Вайнштейна. — М. : Советское радио, 1956. — 215 с.
38. Smith, L. P. The formation and maintenance of electron and ion beams / L. P. Smith, P. L. Hartman // Journal of Applied Physics. — 1940. — Vol. 11, No. 3. — P. 220–229.
39. Незлин, М. В. Динамика пучков в плазме. — М. : Энергоиздат, 1982.
40. Ozur, G.E. On the Current of the Low-Energy, High-Current Electron Beam Formed in a Plasma-Filled Diode / G. E. Ozur // IEEE Trans. Plasma Science. — 2009. — Vol. 37, No. 10, part 1. — P. 1897–1900.
41. Ivanov, Yu. F. Modification of hard alloys based on tungsten carbide by pulsed electron beam melting of Ti coating/WC–8 % Co substrate system / Yu. F. Ivanov, Yu. A. Denisova, P. V. Moskvina [et al.] // Izvestiya Vuzov. Fizika. — 2012. — Vol. 55, No. 12-2. — P. 121–124.
42. Metel, A. S. A high-current plasma emitter of electrons based on a glow discharge with a multirod electrostatic trap / A. S. Metel, Y. A. Melnik // Instruments and Experimental Techniques. — 2013. — Vol. 56, No. 3. — P. 317–324.
43. Ахмадеев, Ю. Х. Генерация однородной низкотемпературной газовой плазмы в импульсном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом большой площади / Ю. Х. Ахмадеев, В. В. Денисов, Н. Н. Коваль [и др.] // Физика плазмы. — 2017. — Т. 43, № 1. — С. 63–70.

44. Денисов, В. Н. Влияние анода несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом на пространственное распределение концентрации плазмы / В. В. Денисов, Н. Н. Коваль, Ю. А. Денисова [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 7 (739). — С. 47–52.
45. Денисов, В. Н. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом при низких напряжениях горения / В. В. Денисов, Ю. Х. Ахмадеев, Н. Н. Коваль [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 4 (736). — С. 3–8.
46. Воробьёв, М. С. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом / М. С. Воробьёв, П. В. Москвин, В. И. Шин [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — 2021. — Т. 47, № 10. — С. 38–42.
47. Vorobyov, M. S. Electron beam generation with variable current amplitude during its pulse in a source with a grid plasma cathode / M. S. Vorobyov, N. N. Koval, P. V. Moskvin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1393. — P. 012064.
48. Shin, V. I. Latitude and amplitude modulation of the beam current for controlling its power during a submillisecond pulse / V. I. Shin, M. S. Vorobyov, Moskvin P. V. [et al.] // Russian Physics Journal. — 2023. — Vol. 65, No. 11. — P. 1979–1988.
49. Shpanov, D. A. Modeling of the electron beam current during the pulse for alloying the surface of stainless steel with titanium and aluminum / D. A. Shpanov, P. V. Moskvin, E. A. Petricova [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2024. — Vol. 18, No. Suppl. 1. — P. S136–S145.
50. Goebel, D. M. Long pulse, plasma cathode e-gun / D. M. Goebel, R. W. Schumacher, Watkins // Proc. Conf. on High Power Particle Beams. — Washington, 1992. — P. 1093–1098.
51. Kandaurov, I. Submillisecond electron beam for plasma heating in multi-mirror trap GOL 3 / I. Kandaurov, V. Astrelin, A. Avrorov [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2011. — Vol. 59, No. 1. — P. 67–69.
52. Жаринов, А. В. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. I / А. В. Жаринов, М. И. Карин, Ю. Е. Крейндель [и др.] // Журнал технической физики. — 1986. — Т. 56, № 1. — С. 66–71.
53. Жаринов, А. В. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. II / А. В. Жаринов, М. И. Карин, Ю. Е. Крейндель [и др.] // Журнал технической физики. — 1986. — Т. 56, № 4. — С. 687–693.
54. Astrelin, V. T. Generation and transport of submillisecond intense electron beams in plasma cathode vacuum diodes / V. T. Astrelin, A. V. Burdakov, I. A. Ivanov [et al.] // Vacuum. — 2017. — Vol. 143. — P. 495–500.

55. Астрелин, В. Т. Численное моделирование формирования электронных пучков в источниках двух типов с плазменным катодом и их транспортировки в магнитном поле / В. Т. Астрелин, М. С. Воробьев, И. В. Кандауров, В. В. Куркучек // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 11. — С. 1529–1533
56. Гушенец, В. И. Эффект увеличения электрической прочности в плазмонаполненной системе формирования интенсивного электронного пучка / В. И. Гушенец, А. С. Бугаев, Е. М. Окс // Известия вузов. Физика. — 2017. — Т. 60, № 9. — С. 49–53.
57. Емельянов, А. А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме / А. А. Емельянов, Е. А. Емельянова. — М. : Физматлит, 2009. — 192 с. — ISBN 978-5-9221-1088-5.
58. Child, C. D. Discharge from hot CaO / C. D. Child // Physical Review (Series I). — 1911. — Vol. 32, No. 5. — P. 492–511.
59. Langmuir, I. The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum / I. Langmuir // Physical Review. — 1913. — Vol. 2, No. 6. — P. 450–486.
60. Бурдовицин, В. А. Об электрической прочности ускоряющего промежутка плазменного источника электронов в форвакуумном диапазоне давлений / В. А. Бурдовицин, М. Н. Куземченко, Е. М. Окс // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, № 7. — С. 134–136.
61. Хынг Н. Б. Моделирование генерации плазмы и электронного пучка в источниках с плазменным катодом : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.20 / Нгуен Бао Хынг. — Томск, 2016. — 106 с.
62. Devyatkov, V. N. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V. N. Devyatkov, S. V. Grigoriev, N. N. Koval [et al.] // Laser and Particle Beams. — 2003. — Vol. 21, No. 2. — P. 243–248.
63. Koval' N. N. A facility for metal surface treatment with an electron beam / N. N. Koval', P. M. Shchanin, V. N. Devyatkov, [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2005. — Vol. 48. — P. 117–121.
64. Koval, N. N. Automated power complex for pulse surface treatment of materials by electron beam / Koval, N. N., Grigoryev, S. V., Devyatkov, V. N [et al.] // Proc. 8th Int. Conf. Modification Mater. Particle Beams Plasma Flows, Tomsk, Russia. — 2006. — P. 79-85.
65. Teresov, A. D. Investigation of characteristics of sub-millisecond electron source with the plasma cathode and the opened boundary of anode plasma / A. D. Teresov, V. T. Astrelin, V. N. Devyatkov [et al.] // Proc. 16th Intern. Symp. on High Current Electronics. — Tomsk, Russia. — 2010. — P. 92–95.
66. Девятков, В. Н. Импульсный электронный источник с плазменным сеточным катодом и продольным магнитным полем для модификации поверхности материалов и изделий / В. Н.

Девятков, Н. Н. Коваль // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2017. — Т. 60, № 9. — С. 44–48.

67. Девятков, В. Н. Плазменные сеточные катоды на основе контрагированного дугового разряда для генерации импульсного интенсивного низкоэнергетического электронного пучка в плазмонаполненном диоде с продольным магнитным полем / В. Н. Девятков, Н. Н. Коваль // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83, № 11. — С. 1509–1513.

68. Москвин, П. В. Исследование потерь импульсного электронного пучка при транспортировке в газе низкого давления / П. В. Москвин // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. — 2009. — № 11. — С. 104–108.

69. Григорьев, С. В. Исследование генерации и транспортировки субмиллисекундного электронного пучка, формируемого в диоде с плазменным катодом с сеточной стабилизацией плазменной границы и плазменным анодом с открытой подвижной границей / С. В. Григорьев, В. Т. Астрелин, И. В. Кандауров, ... П. В. Москвин [и др.] // Плазменная эмиссионная электроника : труды IV Международного Крейнделевского семинара, Улан Удэ, 25–30 июня 2012 г. — 2012. — С. 81–86.

70. Коваль, Н. Н. Плазменный источник электронов «СОЛО» / Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, С. В. Григорьев, Н. С. Сочугов [и др.] // Труды II Междунар. Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан Удэ, 2006. — С. 79–84.

71. Шин, В. И. Генерация электронного пучка с управляемой в течение импульса субмиллисекундной длительности мощностью / В. И. Шин, М. С. Воробьёв, П. В. Москвин, В. Н. Девятков // Быстрозакалённые материалы и покрытия : материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Москва, 19–20 октября 2021 года. — Litres, 2023. — С. 372.

72. Патент РФ № 2746265. Способ генерации электронного пучка для электронно-пучковой обработки поверхности металлических материалов : опубл. 12.04.2021 / Воробьёв М. С., ..., Москвин П. В. [и др.].

73. Kemp, R. F. Plasma potential measurements by electron emissive probes / R. F. Kemp, J. M. Jr Sellen // Review of Scientific Instruments. — 1966. — Vol. 37, No. 4. — P. 455–461.

74. Schrittwieser, R. Emissive probes, principles and recent developments / R. Schrittwieser, C. Ionita, G. Madar [et al.] // Proceedings of the 2nd German-Polish Conference on Diagnostics of Plasmas. — Cracow, 2004. — P. Inv 12.

75. Семёнов, Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения / Б. Ю. Семёнов. — М. : СОЛОН-Пресс, 2011. — 416 с. — (Серия: Компоненты и технологии). — ISBN 978-5-91359-086-3.

76. Чен, Ф. Электрические зонды / Ф. Чен // Диагностика плазмы / под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. — М. : Мир, 1967. — С. 94–164.

77. Лохте Хольтгрёвен, В. Методы исследования плазмы / В. Лохте Хольтгрёвен / пер. с нем. ; под ред. С. Ю. Лукьянова. — М. : Мир, 1971. — 490 с.
78. Johnson, E. O. A floating double probe method for measurements in gas discharges / E. O. Johnson, L. Malter // *Physical Review*. — 1950. — Vol. 80, No. 1. — P. 58–68.
- 79 Agresti, A. Approximate is better than “exact” for interval estimation of binomial proportions / A. Agresti, B. A. Coull // *The American Statistician*. — 1998. — Т. 52. — №. 2. — С. 119-126.
- 80 Мелник, М. Основы прикладной статистики / М. Мелник. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. — С. 384.
81. Кесаев, И. Г. Катодные процессы электрической дуги / И. Г. Кесаев. — М., 1968.
82. Генкин, С. А. Исследование контракции несамостоятельного объёмного разряда, инициируемого электронным пучком / С. А. Генкин, Ю. Д. Королёв, Г. А. Месяц // *Теплофизика высоких температур*. — 1982. — Т. 20, № 1. — С. 1–5.
83. Щанин, П. М. Дуговой разряд с холодным полым катодом в скрещённых электрическом и магнитном полях / П. М. Щанин, Н. Н. Коваль, Ю. Х. Ахмадеев, С. В. Григорьев // *Журнал технической физики*. — 2004. — Т. 74, № 5. — С. 24–29.
84. Shin, V. I. Energy density distribution of a modulated electron beam in a source with a plasma cathode based on a low pressure arc / V. I. Shin, M. S. Vorobyov, P. V. Moskvina [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 2064, No. 1. — P. 012066.
85. Devyatkov, V. N. Electron beam formation in a grid plasma cathode electron source based on a low-pressure constricted arc in an inhomogeneous magnetic field / V. N. Devyatkov, N. N. Koval, A. D. Teresov // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2016. — Т. 59, № 9-2. — С. 49–52.
86. Тересов, А. Д. Исследование динамики температуры на поверхности мишени при воздействии импульсного электронного пучка субмиллисекундной длительности / А. Д. Тересов, Т. В. Коваль, П. В. Москвин // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2026. — В печати.
87. Koval, T. V. Enhancement of emission currents in plasma electron sources based on a low-pressure arc discharge / T. V. Koval, V. N. Devyatkov, Nguyen Bao Hung // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2015. — Vol. 652, No. 1. — P. 012061.
88. Vorobyov, M. S. 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.
89. Cousinié, P. Variation du coefficient d'émission électronique secondaire de quelques métaux avec l'énergie des ions incidents / P. Cousinié, N. Colombié, C. Fert, R. Simon / communiquée par G. Dupouy // *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. — 1959. — Т. 249, No. 3. — P. 388–390.

90. Патент РФ № 2780805. Способ генерации электронного пучка для источников электронов с плазменными эмиттерами и анодной плазмой : опубл. 04.10.2022 / Воробьев М. С., Москвин П.В. [и др.].

91. Москвин, П. В. Динамика извлечения электронов из сеточного плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления / П. В. Москвин, М. С. Воробьев, А. А. Гришков [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — 2023. — Т. 49, № 11. — С. 43–46.

92. Shin, V. I. Increasing the Electrical Strength of the Accelerating Gap in an Electron Source with a Plasma Cathode / V. I. Shin, P. V. Moskvina, M. S. Vorobyev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2021. – Vol. 64, No. 2. – P. 234-240.

93. Moskvina, P. V. Electron beam generation in an arc plasma source with an auxiliary anode plasma / P. V. Moskvina, V. N. Devyatkov, M. S. Vorobyov [et al.] // Vacuum. — 2021. — Vol. 191. — P. 110338.

94. Moskvina, P. V. Plasma source for auxiliary anode plasma generation in the electron source with grid plasma cathode / P. V. Moskvina, V. N. Devyatkov, I. V. Lopatin, M. S. Vorobyov // Journal of Physics: Conference Series : the proceeding 14th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Tomsk, 15–21 сентября 2019 года / Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2019. — Vol. 1393. — P. 012049.

95. Гончаренко, И. М. Алитирование поверхностей конструкционных среднеуглеродистых сталей в вакууме PVD методами / И. М. Гончаренко, П. В. Москвин, С. В. Работкин [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2023. — Т. 66, № 1 (782). — С. 22–29.

96. Shugurov, V. V. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings / V. V. Shugurov, N. N. Koval, O. V. Krysina, N. A. Prokopenko // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1393, No. 1. — P. 012131.

97. Гуляев, А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

ООО «Ангиолайн Ресерч»

ИНН 5408024670 / КПП 543301001

ОГРН 1195476081285 / ОКПО 41237435

630559, Новосибирская обл., р.п. Кольцово,

ул. Технопарковая, д.6, оф. 336

+7 (383) 363-48-90

angioline.ru / e-mail: info@angiorea.ru

## Акт

использования результатов работы «Разработка и создание компактного источника электронов с плазменным катодом для всесторонней (3D) модификации поверхности изделий сложной формы» в рамках программы СТАРТ

Место проведения испытаний: ООО «Ангиолайн ресерч».

Настоящим актом ООО «Ангиолайн ресерч» подтверждает, что результаты работы по теме «Разработка и создание компактного источника электронов с плазменным катодом для всесторонней (3D) модификации поверхности изделий сложной формы», выполняемой младшим научным сотрудником ИСЭ СО РАН Москвиным Павлом Владимировичем и старшим научным сотрудником ИСЭ СО РАН Воробьевым Максимом Сергеевичем, могут быть использованы для финишной полировки внешней и внутренней поверхности коронарных стентов, которая является альтернативой для «традиционной» электролитической обработки. Эксперименты проводились с использованием модернизированной электронно-пучковой установки «СОЛЮ» при следующих режимах обработки:

Рабочая среда – аргон при давлении  $2,5 \times 10^{-2}$  Па,

Энергия электронов (19 – 22) кэВ,

Ток пучка (200 – 300) А,

Длительность импульса 20 мкс,

Частота следования импульсов 0,3 Гц,

Профиль распределения плотности мощности пучка в области воздействия гауссов шириной (2,6 – 3) см,

Положение стента горизонтальное, вращение стента дискретное по  $30^\circ$ , число полных оборотов от 1 до 3, продольное смещение дискретное по 5 мм и по 6 мм, число продольных проходов – 1, число импульсов воздействия на каждую позицию от 2 до 5,

Заключение: Проведенные эксперименты по электронно-пучковой модификации поверхности коронарных стентов показали, что в результате такого энергетического воздействия возможно удаление крапа на внутренней поверхности стента и удовлетворительное сглаживание внешней и

**ООО «Ангиолайн Ресерч»**  
ИНН 5408024670 / КПП 543301001  
ОГРН 1195476061285 / ОКПО 41237435  
630659, Новосибирская обл., р.п. Кольцово,  
ул. Технопарковая, д.6, оф. 336  
+7 (383) 363-48-90  
angioline.ru / e-mail: info@angiores.ru

внутренней поверхностей стента, однако для внедрения такой электронно-лучевой технологии необходимо устранить дефект, заключающийся в неудовлетворительной полировке поверхности стента в областях геометрической тени электронного пучка.

Руководитель отдела проектирования и разработок  
ООО «Ангиолайн ресерч»



/ Требушат Д.В. /

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2746265**

**СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Воробьев Максим Сергеевич (RU), Коваль Тамара Васильевна (RU), Коваль Николай Николаевич (RU), Тересов Антон Дмитриевич (RU), Шин Владислав Игоревич (RU), Дорошкевич Сергей Юрьевич (RU), Москвин Павел Владимирович (RU), Петрикова Елизавета Алексеевна (RU), Яковлев Владислав Викторович (RU), Ашурова Камилла Тахировна (RU)*

Заявка № **2020137779**

Приоритет изобретения **18 ноября 2020 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **12 апреля 2021 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **18 ноября 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Изrael*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2780805

СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ  
ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМИ  
ЭМИТТЕРАМИ И АНОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Воробьев Максим Сергеевич (RU), Москвин Павел Владимирович (RU), Шин Владислав Игоревич (RU), Девятков Владимир Николаевич (RU), Коваль Николай Николаевич (RU), Коваль Тамара Васильевна (RU), Дорошкевич Сергей Юрьевич (RU), Торба Максим Сергеевич (RU), Ашурова Камилла Тахировна (RU), Леванисов Вадим Андреевич (RU)*

Заявка № 2021138931

Приоритет изобретения 27 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 октября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 декабря 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

