

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



На правах рукописи

Дорошкевич Сергей Юрьевич

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ
УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ЭФФЕКТИВНЫМ
ВЫВОДОМ ПУЧКА В АТМОСФЕРУ

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 – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ	16
1.1. Ускорители электронов на основе термоэлектронной эмиссии	16
1.2. Ускорители электронов на основе взрывной электронной эмиссии	23
1.3. Ускорители электронов на основе эмиссии из газоразрядной плазмы (с плазменным катодом).....	30
1.4. Ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда.....	37
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	47
2.1. Описание макета ускорителя на основе самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда	47
2.2. Измерение плотности тока пучка, выведенного в атмосферу.....	53
2.3. Калориметрические измерения мощности электронного пучка.....	58
2.4. Зондовые измерения параметров плазмы вспомогательного разряда.....	59
2.5. Моделирование ионно-электронной оптической системы.....	63
Выводы:	64
ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ	66
3.1. Непрерывный режим генерации вспомогательного разряда.....	66
3.2. Неоднородность горения вспомогательного разряда на двух проволочных анодах	68
3.3. Измерение параметров плазмы в непрерывном режиме	72
3.4. Импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда... ..	79
3.5. Измерение параметров плазмы в импульсно-периодическом режиме	83
3.6. Релаксационные процессы в плазме вспомогательного разряда	88
3.7. Стабильность генерации вспомогательного разряда	91
Выводы:.....	96
ГЛАВА 4. ВЫВОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРУ	98
4.1. Вывод электронного пучка в непрерывном режиме	98
4.2. Вывод электронного пучка в импульсно-периодическом режиме.....	101

4.3. Моделирование замыкания заряженных частиц в электродной системе ускорителя.....	107
4.4 Определение потерь электронного пучка на электродах ускорителя	114
4.5. Исследование неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка	122
4.6. Калориметрические исследования электронного пучка.....	127
4.7. Управление отбором ионов из эмиссионной плазмы в паузу генерации вспомогательного разряда.....	131
Выводы:.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Патент на изобретение.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Акт об использовании результатов диссертационной работы	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время уже неоднократно продемонстрирована возможность и перспективность использования электронных пучков большого сечения (ПБС) с энергией электронов, достигающей нескольких сотен кэВ, и выводом их в атмосферу для научных и технологических целей [1–7]. К пучкам большого сечения относятся электронные пучки, в которых тепловые скорости электронов не оказывают существенного влияния на распределение плотности тока электронного пучка [8, 9]. Ускорители электронов, генерирующие такие пучки, занимают свою нишу использования не только благодаря сниженным массогабаритам самих установок и упрощенным требованиям к радиационной защите обслуживающего персонала, но и благодаря своим технологическим возможностям, часто недостижимым с помощью высокоэнергетических ускорителей. Так, на сегодняшний день успешно продемонстрирована возможность работы технологий радиационного отверждения лаковых покрытий [10, 11], обработки сточных вод от загрязнений [12, 13], в плазмохимических процессах, инициируемых электронным пучком [14–16], радиационной стерилизации объектов медицинского назначения [17], накачки газовых лазеров [18–20] и др. Также актуальным направлением является радиационная обработка электронными пучками посевного материала с целью его обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы, что повышает урожайность сельскохозяйственных культур [21–24]. Для решения таких задач требуются надежные и долговечные ускорители электронов со стабильными параметрами, к которым в том числе относятся ускорители с несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР), основанные на ионно-электронной эмиссии, когда ионы, извлекаемые из специально генерируемой плазмы, бомбардируют высоковольтный катод, выбивая вторичные электроны, которые ускоряются и выводятся в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Преимуществами ускорителей на основе несамостоятельного ВТР перед ускорителями других типов (термоэмиссионные, взрывоэмиссионные, с

плазменным катодом) являются: относительная простота конструкции, отсутствие нагревательных элементов, высокий срок службы, умеренные требования к насосной группе, возможность управления током пучка без изменения ускоряющего напряжения, генерация эмиссионной плазмы на стороне «земляного» потенциала и др. Однако ускорителям такого типа свойственна существенная зависимость коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу от конфигурации электродной системы, эмиссионной способности высоковольтного катода и сформированной ионно-электронной оптической системы (ИЭОС) [25–27]. Обеспечение коэффициента вывода пучка в атмосферу выше 0,5 в таких системах является непростой задачей и зачастую требует тщательного расчета и моделирования для создания оптимальной ИЭОС. При этом стабильная работа таких ускорителей реализуется в узком диапазоне давлений рабочего газа, которое сверху ограничено пробоем ускоряющего промежутка по закону Пашена, а снизу – стабильностью генерации вспомогательного разряда. Поскольку коэффициент вывода тока пучка напрямую зависит от сформированной ИЭОС, то возникает необходимость управления параметрами эмиссионной плазмы с целью достижения высокой эффективности вывода электронного пучка для разных условий его генерации без изменения конфигурации электродной системы.

Кроме этого, для генерации эмиссионной плазмы зачастую используется орбитронный тлеющий разряд с полым катодом, отличающийся простой и надежностью электродной системой, но имеющий один из главных недостатков, заключающийся в возникновении микровзрывов на стенках полого катода с возможным переходом тлеющего разряда в дуговую форму, что приводит либо к локальным неоднородностям плотности тока пучка, либо к электрическому пробоем ускоряющего промежутка. Поиск новых решений повышения стабильности горения разряда такого типа также является актуальной задачей, поскольку определяет надежность и стабильность работы ускорителя электронов в целом.

В рамках данной работы проведены исследования по возможности повышения коэффициента вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу, а также стабильности работы ускорителя электронов на основе несамостоятельного

ВТР при переходе к импульсно-периодическому режиму генерации эмиссионной плазмы, когда одно и то же значение среднего тока вспомогательного разряда можно получать при его разных амплитудах, регулируя коэффициент заполнения импульсов.

Цель работы:

Повышение эффективности вывода электронного пучка в атмосферу и расширение диапазона регулировки его параметров в широкоапертурном ускорителе электронов на основе самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Создание экспериментального стенда ускорителя на основе самостоятельного ВТР
2. Разработка и создание оригинального диагностического оборудования для исследования параметров эмиссионной плазмы вспомогательного разряда и распределения плотности тока электронного пучка в атмосфере;
3. Определение параметров вспомогательного орбитронного тлеющего разряда с полым катодом и генерируемой в нем эмиссионной плазмы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с диапазоном частот 1–70 кГц и изменением коэффициента заполнения импульса от 0,2 до 0,8;
4. Определение параметров вспомогательного разряда и эмиссионной плазмы при подаче ускоряющего напряжения (до 150 кВ), а также определение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу при генерации вспомогательного разряда в режимах, описанных в п.3.
5. Измерение распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, при генерации вспомогательного разряда в режимах, описанных в п.3.

Научная новизна:

1. Определены параметры орбитронного тлеющего разряда с полым катодом в ранее не используемом импульсно-периодическом режиме генерации с частотой следования импульсов 1–70 кГц, коэффициентом заполнения импульсов 0,2–0,8 и амплитудой тока разряда 50–300 мА;

2. Продемонстрировано влияние генерации электронного пучка на параметры плазмы вспомогательного орбитронного тлеющего разряда как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации, в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР;

3. Разработан способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей на основе несамостоятельного ВТР, характеризующийся частотой следования импульсов тока вспомогательного разряда десятки кГц и управлением коэффициентом заполнения импульсов (Патент RU № 2772817, приоритет от 01.10.2021 г.);

4. Обнаружено, что генерация вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме позволяет снизить неоднородность распределения плотности электронного тока по сечению пучка на 10–30% по сравнению с непрерывным режимом при сохранении средней плотности тока электронного пучка в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР;

Практическая значимость:

1. Создан ускоритель электронов, пригодный для электронно-пучковой обработки различных материалов, с генерацией пучка в атмосфере сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$, энергией до 150 кэВ, плотностью электронного тока пучка в импульсе до 15 мкА/см^2 и его среднего значения за период 6 мкА/см^2 , с коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 при частоте следования импульсов 5–30 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 0,2–0,5.

2. Полученные параметры плазмы орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме могут быть использованы при проведении численных экспериментов с разрядами данного типа;

3. Новые режимы генерации плазмы орбитронного тлеющего разряда могут быть использованы для создания ионных источников нового поколения, отличающиеся более широким диапазоном параметров генерируемого пучка;

4. Определен диапазон частот следования импульсов для генерации вспомогательного разряда, в котором достигается повышение эффективности вывода электронного пучка в атмосферу;

5. Продемонстрировано уменьшение количества микровзрывов, способных перейти в дуговой разряд, на поверхности полого катода вспомогательного разряда при переходе в импульсно-периодический режим, что повышает стабильность работы ускорителя в целом.

Методы исследования

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

1. Измерение вольт-амперных характеристик вспомогательного тлеющего разряда;

2. Регистрация тока электронного пучка в атмосфере и определение коэффициента вывода;

3. Определение параметров плазмы вспомогательного разряда (концентрации плазмы, температуры электронов, потенциала плазмы) с помощью зондового метода и созданной автоматизированной системы измерения;

4. Измерение распределения концентрации плазмы вспомогательного разряда;

5. Измерение распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, с использованием созданной автоматизированной системы измерения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Минимальная частота следования импульсов, при которой реализуется устойчивое горение самостоятельного импульсно-периодического орбитронного тлеющего разряда с полым катодом, обеспечивается наличием остаточной плазмы

с концентрацией не ниже порогового значения, зависящего от конкретных условий генерации в электродной системе, перед каждым последующим импульсом тока разряда. Использование такого разряда позволяет кратно повысить максимальную концентрацию эмиссионной плазмы по сравнению с непрерывным режимом за счет уменьшения коэффициента заполнения импульсов и роста амплитуды тока разряда. Так, например, при переходе от непрерывного к импульсно-периодическому режиму генерации разряда с частотой следования импульсов десятки кГц и коэффициентом их заполнения 0,2–0,5 концентрация плазмы увеличивается до четырех раз при стабилизации среднего тока разряда от 30 до 100 мА в объеме не менее 0,1 м³ и давлении гелия 2–4 Па.

2. Применение в ускорителе электронов на основе самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) импульсно-периодического режима генерации вспомогательного орбитронного тлеющего разряда с частотой следования импульсов десятки кГц позволяет кратно повысить максимальное значение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу. Рост коэффициента вывода связан с уменьшением времени на развитие фонового тока ВТР, и наличия паузы, в течение которой фоновый ток ВТР существенно снижается. Так, например, по сравнению с непрерывным режимом генерации орбитронного разряда переход к импульсно-периодическому режиму позволяет увеличить максимальный коэффициент вывода пучка сечением 2900 см² с 0,2 до 0,6 без внесения изменений в конструкцию ускорителя.

3. Генерация вспомогательного самостоятельного орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме снижает неоднородность распределения плотности тока пучка в атмосфере на 10–30% по сравнению с непрерывным режимом генерации за счет выравнивания распределения концентрации эмиссионной плазмы в объеме, что достигается большей амплитудой тока разряда и наличием паузы его генерации.

4. Создан широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда, отличающийся уникальной совокупностью параметров и генерирующий пучок

сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$ с энергией электронов 100 – 150 кэВ, коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 с плотностью тока в импульсе до 15 мкА/см^2 и ее средним значением до 6 мкА/см^2 с неоднородностью менее $\pm 30\%$ при частоте следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициенте их заполнения 0,2 – 0,5.

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 на применении современного технического и программного обеспечения для экспериментальной, численной и статистической обработки большого массива полученных в диссертации экспериментальных данных.

Достоверность научных положений обусловлена следующим:

1. Достоверность первого научного положения основана на использовании общепринятой стандартной методики определения параметров плазмы с одиночным зондом Ленгмюра с получением большого массива экспериментальных данных (≈ 8000 точек для каждой зондовой вольт-амперной характеристики) с их последующей обработкой и анализом. Проведением расчета параметров прикатодного слоя во вспомогательном разряде, используя общепринятый теоретический подход, основанный на моделях Чайлда-Ленгмюра и Бома;

2. Достоверность второго научного положения подтверждается стандартным способом определения коэффициента вывода через отношение тока пучка к току в ускоряющем промежутке (току нагрузки высоковольтного источника). Наибольшая ошибка возможна при определении тока пучка в атмосфере, в первую очередь связанная с отражением электронов от коллектора, достигающим 20%. Однако, учет данного коэффициента лишь увеличит ток электронного пучка и повысит коэффициент вывода пучка в атмосферу;

3. Достоверность третьего научного положения подтверждается использованием в автоматизированной системе измерения элементной базы, частотные характеристики которой в полной мере соответствуют исследуемому

диапазону частот, а также определением значений плотности тока на каждой секции коллектора путем расчета алгебраического среднего по 200 значениям;

4. Достоверность четвертого научного положения подтверждается использованием стандартных методов измерения параметров электронного пучка, выведенного в атмосферу, описанных в п.2 и п.3.

Апробация результатов работы

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

1. VII Международный Крейнделевский семинар «Плазменная эмиссионная электроника» (31 июля – 6 августа 2023 г.) с. Максимиха, Республика Бурятия, Россия;

2. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (17 – 19 мая, 2023 г.), Томск, Россия;

3. 7-й и 8-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (7th, 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020 (14 – 26 сентября, 2020 г.); EFRE 2022 (2 – 8 октября, 2022 г.)), Томск, Россия;

4. 10-я Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (X International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, PPPT – 10 (12 – 16 сентября, 2022 г.)), Минск, Беларусь;

5. XII Международная конференция «Химия нефти и газа» (26 – 30 сентября, 2022 г.), Томск, Россия;

6. XII Всероссийская конференция по физической электронике, ФЭ – 2022 (19 – 22 октября, 2022 г.), Махачкала, Россия;

7. 15-я Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применения» (15th International Conference on Gas Discharge Plasmas and Their Applications, GDP 2021 (5 – 10 сентября, 2021 г.)), Екатеринбург, Россия;

8. Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук – 2020» (21 – 24 апреля, 2020 г.), Томск, Россия.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 относятся к списку публикаций, в которых излагаются основные результаты диссертации (1 патент [139] и 2 статьи в журналах из перечня ВАК [22, 113]), 10 статей в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus [22, 23, 113, 114, 120, 129, 136, 138, 144, 147], 12 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций [23, 24, 114, 118, 120, 128, 129, 131, 136, 138, 144, 147].

Личный вклад автора

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

Создание автоматизированных систем измерения параметров плазмы и распределения плотности тока электронного пучка проводилось при участии В.А. Леванисова, М.С. Торбы и Р.А. Картавцова.

На основе экспериментальных данных, полученных автором диссертации, сотрудником лаборатории теоретической физики ИСЭ СО РАН А.А. Гришковым было проведено численное моделирование, включающее в себя траекторный анализ заряженных частиц, с обсуждением условий генерации и результатов моделирования совместно с автором диссертации.

Внедрение результатов и предложения по их использованию

Диссертационная работа выполнялась в рамках государственного задания № FWRM-2021-0006 (0291-2021-0006), договора ХД-205/23 на выполнение

НИОКР «Модернизация узлов ускорителя электронов и оптимизация его основных характеристик», а также в рамках плана научных исследований стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Предполагается использовать полученные результаты для повышения энергетической эффективности ускорителей электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу, а также, используя ускоритель данного типа, проводить облучение электронным пучком с энергией до 150 кэВ посевного материала для его обеззараживания и стимулирования роста семян, обработки полимерных материалов и изделий с целью улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 161 страницу. В работе насчитывается 86 рисунков, 7 таблиц и 153 наименования в списке литературы.

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

В **первой главе** проведен сравнительный анализ ускорителей электронов на основе различного типа эмиссии (термоэмиссия, взрывная эмиссия, эмиссия из плазменных катодов, ионно-электронная эмиссия), с выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу. Продемонстрирована конкурентоспособность ускорителей с несамостоятельным ВТР перед остальными типами ускорителей с ПБС, а также их перспективность в электронно-пучковой области применения. Отмечены актуальные задачи по совершенствованию данных ускорителей: снижение потерь электронного пучка на анодной и опорной решетке, снижение неоднородности плотности тока пучка в атмосфере, повышение стабильности

работы ускорителя, а также расширение диапазона параметров получаемого пучка и повышение эффективности генерации и вывода в атмосферу. Выполнение данных задач возможно путем управления параметрами вспомогательного разряда, который определяет ионно-электронную оптическую систему ускорителя.

Во **второй главе** представлено подробное описание макета широкоапертурного ускорителя электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу. Описаны методики и техника эксперимента с представлением принципиальных электрических схем созданных систем измерения. Рассмотрены особенности измерения параметров плазмы зондовым методом, проведения калориметрии выведенного в атмосферу электронного пучка и измерения распределения его плотности тока по сечению.

В **третьей главе** описан используемый способ генерации вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом, который характеризуется частотой следования импульсов в десятки килогерц (1 – 70 кГц) с управлением амплитудой и длительностью импульса тока путем изменения коэффициента заполнения импульсов при стабилизации среднего тока разряда. Данный способ позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы вспомогательного разряда до четырех раз по сравнению с непрерывным режимом при одинаковом среднем значении тока разряда. Особое внимание уделено изменениям параметров эмиссионной плазмы при генерации электронного пучка. Проведены оценки времени релаксационных процессов плазмы вспомогательного разряда, которые влияют на генерацию следующего импульса тока разряда, а также на генерацию электронного пучка в целом, что особенно актуально для генерации плазмы в больших вакуумных объемах ($\geq 0,1 \text{ м}^3$). Отдельно рассматривается стабильность генерации вспомогательного разряда путем измерения количества возникающих катодных пятен на стенках полого катода при генерации вспомогательного разряда в различных режимах.

Четвертая глава посвящена эффективности вывода электронного пучка в атмосферу как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме

генерации вспомогательного разряда. Представлено моделирование ионно-электронной оптической системы при использовании параметров эмиссионной плазмы, полученных в третьей главе диссертации. Проведены оценки потерь электронного пучка на электродной системе ускорителя, а также приведены предложения по снижению данных потерь. Отдельно рассматривается вопрос снижения неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, при использовании предложенного способа генерации вспомогательного разряда. Описаны перспективы использования созданного ускорителя электронов.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований.

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

Изучение возможности применения электронно-пучковых технологий началось в XX столетии, когда стала успешно развиваться вакуумная техника, а также появились задачи по получению и обработке новых материалов. По сегодняшний день проводится работа по поиску новых применений электронных пучков и внедрению их в производственную сферу. Потребности в широком и разнообразном применении электронных пучков стимулируют развитие и использование электронных источников/ускорителей с разными принципами работы, эксплуатационными характеристиками и параметрами генерируемых ими пучков. Отдельной областью ускорительной техники является получение ПБС с выводом пучка в атмосферу, которые позволяют производить обработку мишеней с размерами, превышающими габариты вакуумной камеры с помощью использования конвейеров или специальных систем прокачки жидкости и газа. Поскольку для получения ПБС используются различные типы эмиссии (термоэлектронная, взрывная, вторичная ионно-электронная, эмиссия из газоразрядной плазмы), то каждый тип ускорителя обладает своими достоинствами и недостатками, которые и определяют область их применения. Для понимания вектора развития ускорителей с ПБС, а также усовершенствования их конструкции и параметров для промышленного применения требуется провести анализ данного направления ускорительной техники за последние десятилетия. Поскольку для промышленного применения таких ускорителей кроме надежности и простоты использования требуется высокий коэффициент полезного действия, то в проведенном обзоре сделан акцент на эффективность вывода пучка из вакуума в атмосферу.

1.1. Ускорители электронов на основе термоэлектронной эмиссии

Традиционно для генерации ПБС используются ускорители на основе термоэлектронной эмиссии. Такие ускорители в основном работают в

непрерывном режиме, что обусловлено инерционностью самих эмиттеров. Для генерации импульсного пучка с длительностью десятки-сотни микросекунд требуется дополнительный электрод для модуляции тока по длительности, который в свою очередь усложняет конструкцию катодного узла. В связи с тем, что создание терموкатодов с большой эмиссионной поверхностью технологически затруднено, для формирования широкого пучка используют многоэлементные катоды – отдельные протяженные нити/проволоки. Для обеспечения высокой плотности эмиссионного тока необходимо, чтобы катоды были нагреты до высокой температуры, которая приводит к сокращению их ресурса. Поэтому при создании ускорителей с термокатадами проводится расчет диаметра проволочных термокатодов, оптимизируя его под необходимую мощность накала. Одной из наиболее простых конфигураций электронно-оптической системы катодного узла является триодная конфигурация, которая состоит из проволочных термоэмиттеров, управляющей сетки и отражательного электрода (спредера). В качестве анода основного ускоряющего промежутка используется многоапертурная опорная решетка, перекрытая тонкой металлической фольгой. Один из недостатков триодной системы заключается в росте тока генерируемого пучка с повышением прикладываемого ускоряющего напряжения при фиксированном сеточном потенциале. Данная зависимость обусловлена полем анода, провисающем сквозь управляющую сетку. Кроме этого, при использовании схемы катодного узла с общей сеткой необходимо учитывать автосмещение, которое создается током пучка на ограничительном резисторе источника питания сетки [28].

Более удобной в управлении током пучка является тетродная конфигурация, представленная в работе [29]. Дополнительным электродом в катодном узле выступает еще одна сетка – формирующая. В представленном на Рисунке 1.1. ускорителе управляющая сетка представляет собой ряд параллельных вольфрамовых проволок диаметром 0,35 мм, а формирующая сетка выполнена из стержней диаметром 3 мм с шагом 7,5 мм. В данном случае формирующая сетка

соединена с электростатическим экраном, спредером и с термоэмиттером для упрощения схемы электропитания.

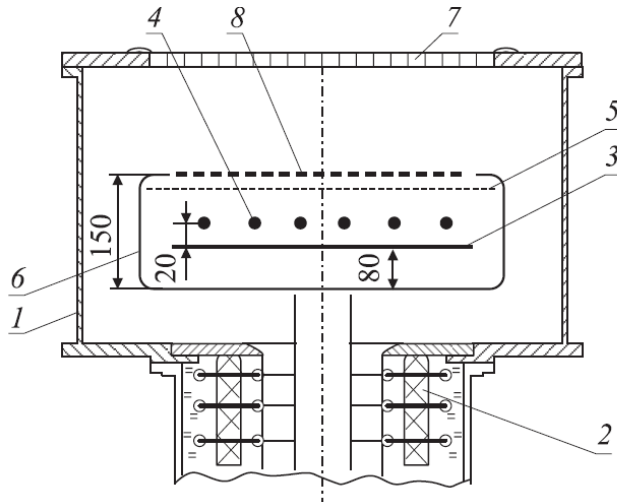


Рисунок 1.1 – Конструктивная схема ускорителя на основе термокатода с тетродной электронно-оптической системой: 1 – вакуумная камера; 2 – высоковольтный изолятор; 3 – спредер; 4 – проволочные термоэмиттеры; 5 – управляющая сетка; 6 – электростатический экран; 7 – опорная решетка; 8 – формирующая сетка

Если в случае триодной системы управление током электронного пучка происходит при отрицательном потенциале управляющей сетки, то при тетродной системе управление осуществляется в области положительных потенциалов. Однако, в этом случае ток катода не совпадает с током нагрузки ускорителя, поскольку часть электронов замыкается на управляющую сетку. Для запираания электронного пучка можно приложить отрицательный потенциал термоэмиттеров к формирующей сетке. В этом случае для управляющей сетки используется униполярное напряжение питания. В тетродной конфигурации, с предлагаемой авторами системой подключения, достигается независимость тока генерируемого электронного пучка от прикладываемого ускоряющего напряжения. При этом, с помощью автоматизированной системы измерения [30], авторами продемонстрировано снижение неоднородности распределения плотности тока пучка, выведенного в атмосферу, по сравнению с триодной конфигурации. Уменьшение неоднородности электронного пучка по сечению до значений не более

$\pm 10\%$ связано с тем, что в тетродной системе вытягивание электронов производится за счет потенциала управляющей сетки, а влияние ускоряющего поля анода значительно слабее через две сетки, поэтому по периметру катодного узла плотность тока пучка выше, чем в триодной конфигурации.

В работе [31] при тетродной конфигурации продемонстрирована генерация электронного пучка длительностью 1–10 мкс с частотой следования импульсов до 1 кГц, плотностью тока пучка в импульсе 100 мА/см^2 , и энергии 130 кэВ. При этом авторы заявляют, что при измерении распределения плотности тока пучка на коллекторных пластинах токи были равны с точностью до 5%.

Кроме достижения однородности распределения тока по сечению электронного пучка важной характеристикой для каждого ускорителя является коэффициент вывода пучка в атмосферу. Данный коэффициент (формула 1.1) определяется как отношение тока пучка за выводной фольгой I_b , к току в ускоряющем промежутке I_0 (току нагрузки высоковольтного источника), который включает в себя как электронную, так и ионную составляющую.

$$\beta = I_b / I_0 \quad (1.1)$$

По своей сути коэффициент β является численным показателем эффективности вывода в атмосферу генерируемого электронного пучка. Если пренебречь ионной составляющей для вакуумного диода, то коэффициент вывода выражается через следующее произведение [32]:

$$\beta = \eta_f \eta_g \eta_{ang} \quad (1.2)$$

где η_f – коэффициент прозрачности фольги, зависящий от материала, толщины фольги и энергии электронов [33, 34]; η_g – геометрическая прозрачность опорной решетки; η_{ang} – угловая прозрачность опорной решетки, определяемая углом влета электронов в апертуру решетки. Кроме данных коэффициентов, в зависимости от конструкции ускорителя в произведение может быть введен коэффициент прозрачности дополнительного электрода (например, сетки или решетки), установленного между катодом и опорной решеткой. Необходимо отметить, что

кроме прозрачности важным фактором для выпускного фольгового окна (ВФО) считается максимальная тепловая нагрузка, для снижения которой осуществляют водяное охлаждение опорной решетки, подбор материала фольги [35], и проводят модификацию конструкции самого ВФО [36].

При использовании многоэлементного катодного узла электронный ПБС представляет собой суперпозицию элементарных пучков, эмитируемых отдельными термоэмиттерами. Поэтому распределение плотности тока электронного пучка и коэффициент вывода зависят от разброса поперечной скорости электронов. Чтобы обеспечить требуемую степень неоднородности распределения тока пучка и получить максимальную эффективность его вывода производятся расчеты пространственных и угловых характеристик пучка. В работах [32, 37] на примере тетродной конфигурации электродной системы предложен численно-аналитический метод исследования, который позволяет оценить влияние электронно-оптических факторов на выходные параметры ускорителя. Из траекторного анализа (Рисунок 1.2), а также фазового и пространственного портрета электронного пучка были определены потери электронного пучка, и предложены способы их снижения. Так для минимизации потерь на ВФО опорная решетка должна иметь щелевую перфорацию в направлении оси Y (Рисунок 1.2) при оптимальном отношении поперечных размеров решетки и апертуры сеток. Снижение углового разброса вдоль оси Y можно добиться за счет уменьшения шага управляющей сетки или шага термоэмиттеров. Рассматриваемая в данной работе геометрия электронной оптической системы (ЭОС) неизбежно приводит к перехлесту элементарных электронных пучков от отдельного термоэмиттера. При этом результирующее распределение плотности тока будет иметь меньшую неоднородность, если края элементарных пучков будут перехватываться экранирующей сеткой, в противном случае распределение будет содержать уплотнения тока, а угловая расходимость вырастет.

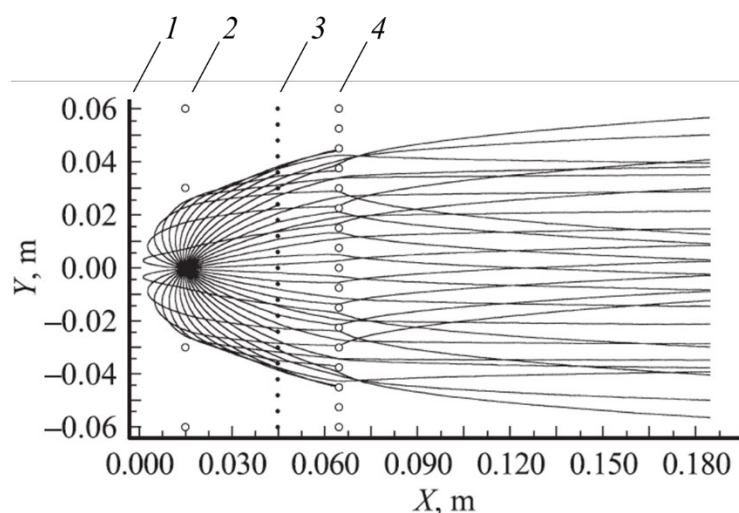


Рисунок 1.2 – Схема ЭОС и расчетные траектории электронов от одного проволочного термоэмиттера: 1 – спредер; 2 – термоэмиттеры; 3 – управляющая сетка; 4 – экранирующая сетка

Еще одним фактором, влияющим на характеристики электронного пучка в ускорителях с термокатодом является магнитное поле, создаваемое протеканием тока накала по термоэмиттеру [37, 38]. Под действием магнитного поля электроны, испускаемые соседними термоэмиттерами, отклоняются в противоположных направлениях. В связи с этим, наличие магнитного поля и его величина может оказывать существенное влияние на пространственное распределение тока по сечению пучка. Для оптимизации влияния магнитного поля, производится встречное протекание тока накала на соседних термоэмиттерах, а также производят синхронизацию момента включения импульса ускоряющего напряжения с фазой синусоиды электропитания накала. Для импульсного режима генерации в работе [31] отбор тока катода осуществляют в момент перехода фазы тока накала через ноль.

Поскольку положение термокатода относительно ЭОС существенным образом влияет на генерацию электронного пучка, для избегания провисания термоэмиттеров под действием высокой температуры используют средства натяжения. При этом, чем длиннее накальные элементы с механизмами натяжения, тем быстрее происходит процесс их разрушения при высоких температурах за счет

протекания процессов высокотемпературной ползучести в материале. Для решения данной проблемы в работе [39] представляется конструкция катодного узла из коротких спиральных элементов без механизма натяжения. Для генерации электронного пучка энергией 180 кэВ, плотностью тока 20 мА/см² и сечением 100×10 см² вместо трех последовательно соединенных секций с длиной проволочного термоэммиттера 320 мм было установлено три ряда спиралей накала длиной 25 мм по 30 элементов в каждом ряду. При такой конструкции обрыв одного из термоэммиттеров не приводит к существенному изменению распределения плотности тока пучка. Неоднородность плотности тока составила не более 3%, что в пять раз лучше по сравнению с катодным узлом из протяженных термоэммиттеров. Кроме этого, авторы работы заявляют о снижении требуемой мощности накала на 15–20% за счет дополнительного нагрева соседних витков самой спирали. Несмотря на достоинства предлагаемого катодного узла его изготовление остается достаточно трудоемким.

Традиционные ускорители для генерации пучков большого сечения на основе термокатодов продолжают занимать определенные производственные ниши, а их исследование и модернизация остается актуальна. Максимальный коэффициент вывода тока пучка β не превышает 0,6 при ускоряющем напряжении до 250 кВ, что является высоким значением для ускорителей этого типа, однако путей дальнейшего повышения коэффициента β не предложено. При этом ускорители с термокатодом обладают рядом недостатков, например, низкая энергетическая эффективность, поскольку энергетические затраты на нагрев катода зачастую сравнимы с мощностью генерируемого электронного пучка, а также существенная доля вкладываемой энергии уходит на излучение [39]. Ускорители с термоэммиттерами в режиме относительно больших плотностей тока обладают очень низким ресурсом катода, не превышающим нескольких десятков часов, вследствие его эрозии за счет высокой температуры и бомбардировки обратным потоком ионов. Температурная инерционность термокатода приводит либо к невозможности работы таких ускорителей на малых длительностях импульса, либо к введению дополнительных электродов, позволяющих

осуществлять регулировку тока пучка путем подачи на эти электроды напряжений смещения. Такой способ регулировки тока пучка не только усложняет конструкцию и управление работой ускорителя, но и может отрицательно повлиять на ЭОС, вследствие чего требуются дополнительные расчеты траекторий электронов.

1.2. Ускорители электронов на основе взрывной электронной эмиссии

На основе взрывной эмиссии электронов (ВЭЭ) в последние десятки лет создано большое число ускорителей, генерирующих электронные ПБС. В качестве катода используются металлические или графитовые острия, лезвия из тонкой фольги, металлические пластины, инкрустированные диэлектриком [8] и др. При высокой напряженности электрического поля порядка 10^6 В/см происходит электрический взрыв микроострий на поверхности металла, который сопровождается эмиссией электронного тока, на порядки превосходящей ток автоэлектронной эмиссии. Согласно механизму, предложенному Г.А. Месяцем [40], ВЭЭ происходит отдельными порциями электронов, получившими название эктоны (Explosive center или Electron cluster). Время существования ВЭЭ определяется временем распространения плазмы от катода до анода разрядного промежутка и обычно не превосходит 10^{-7} – 10^{-6} с. Каждый акт такой эмиссии сопровождается необратимыми изменениями состояния поверхности катода. С каждым новым импульсом ускоряющего напряжения, на катоде появляются новые взрывоэмиссионные центры, и, следовательно, возникают другие конфигурации плазменных сгустков. Поэтому при одном и том же значении ускоряющего напряжения распределение эмиссионного тока по поверхности катода может отличаться от импульса к импульсу. Кроме этого, в ускорителях на основе ВЭЭ в течение импульса генерации пучка может наблюдаться изменение ускоряющего напряжения. Причиной этому является рост проводимости межэлектродного промежутка в процессе его заполнения катодной и образующейся под действием пучка анодной плазмы, и, вследствие этого, разряд высоковольтных конденсаторов источника электропитания. Для получения формы импульса ускоряющего

напряжения близкой к прямоугольной используют формирующие линии и срезающие разрядники [41]. С целью уменьшения влияния катодной плазмы на проводимость ускоряющего промежутка специальным образом предварительно формируют анодную плазму с помощью точечных источников (искр или дуг) либо путем объемной ионизации рабочего газа (отражательный разряд) [42]. После формирования анодной плазмы и подачи импульса ускоряющего напряжения электрическое поле сосредотачивается в тонком прикатодном слое объемного заряда ионов и вызывает возбуждение ВЭЭ. При этом, в отличие от вакуумного диода возникновению ВЭЭ в совокупности с электрическим полем способствует бомбардировка катода ионами анодной плазмы.

В работе [43] представлены результаты по получению электронного пучка круглого и прямоугольного сечения площадью $\sim 100\text{--}200\text{ см}^2$ с током $1\text{--}1,5\text{ кА}$, длительностью 5 мкс при квазипостоянном ускоряющем напряжении до 200 кВ . Использовались круглый и прямоугольный многоострийные катоды из медной проволоки диаметром $0,2\text{ мм}$. Для вывода электронного пучка в атмосферу использовалось ВФО сечением $11,5\times 22,5\text{ см}^2$, геометрической прозрачностью опорной решетки $\approx 80\%$ с алюминий-магниевой фольгой 30 мкм . Авторы работы отмечают, что в случае прямоугольного катода работа источника менее стабильна: увеличивается скорость роста тока коллектора и полного тока, энергия пучка уменьшается с $1,2\text{--}1,3$ до 1 кДж , при запаздывании более $3\text{--}4\text{ мкс}$ срабатывания генератора относительно источника анодной плазмы появляются пробои на стенки вакуумной камеры. В межэлектродном промежутке может гореть дуговой разряд, поскольку при ускоряющем напряжении близком к нулю в конце импульса ток не прекращается. Выведенный за фольгу ток пучка с прямоугольного катода мал и составляет $200\text{--}300\text{ А}$ по сравнению с током нагрузки генератора до $2,5\text{ кА}$. Энергия электронного пучка в атмосфере за импульс составляет до 200 Дж при энергии в ускоряющем промежутке $1,2\text{ кДж}$. Авторы работы связывают низкие коэффициенты вывода тока и энергии пучка с потерями за счет поворота пучка на угол $\approx 20^\circ$ в ведущем магнитном поле, а также потерями в ВФО.

В высоковольтных генераторах ускорителей серии «SINUS» коаксиальная линия совмещена с трансформатором Тесла, благодаря чему КПД всей электрической схемы составляет около 50% [44]. Широкоапертурный ускоритель электронов «SINUS-320» [45] генерирует электронный пучок с выводом в атмосферу сечением $160 \times 270 \text{ мм}^2$, энергией 450 кэВ, током 9 кА, длительностью 12 нс и частотой повторения импульсов до 100 Гц. Для формирования электронного пучка используется металлодиэлектрический катод, ресурс работы которого может достигать 10^8 импульсов при напряженности электрического поля 10^5 В/см [46]. В работе [45] уделено внимание изменению амплитуды тока и ускоряющего напряжения от импульса к импульсу. Так для вакуума $\sim 10^{-5}$ Торр ток пучка снижается с $9,6 \pm 0,3 \text{ кА}$ до $8,2 \pm 0,3 \text{ кА}$ в течение 10–15 импульсов в режиме короткой паузы (0,5 с) между импульсами. Для паузы в несколько минут или часов окончание изменения тока происходит примерно за 100 импульсов, после разгерметизации и откачки – за 1000 импульсов. Эффект стабилизации тока пучка после определенного количества импульсов авторы работы связывают с дегазацией поверхности керамики и медных пластин. Переход к форвакуумному диапазону давлений $\sim 10^{-3}$ Торр приводит к стабилизации тока уже с первых импульсов. Таким образом, адсорбированный газ на катоде, ионизируемый при генерации пучка, выступает дополнительным источником электронов, а газовые условия влияют на параметры генерируемого пучка.

Открытие эффекта наносекундного обрыва сверхплотных токов в полупроводниках (так называемый SOS-эффект [47]) позволило создать новый класс генераторов высоковольтных импульсов для ускорителей на ВЭЭ. Достоинства данных генераторов заключаются в следующем: относительно небольшие потери энергии на коммутацию, высокая стабильность и частота следования импульсов, относительно высокий ресурс и низкая стоимость.

Примером формирования ленточного пучка может послужить ускоритель электронов, описанный в работе [48]. Конструкционная схема сильноточного наносекундного ускорителя электронов с полупроводниковым прерывателем тока представлена на Рисунке 1.3. Катод представляет собой дюралюминиевый

стержень длиной 80 см, в котором закреплены два ряда керамических пластин и два ряда металлических острий, находящихся в упругом контакте с этими пластинами. Ускоритель способен формировать импульсный электронный пучок сечением $80 \times 8 \text{ см}^2$ с энергией до 400 кэВ, током пучка до 1,1 кА, длительностью 35 нс и частотой следования импульсов до 200 Гц. Неоднородность распределения плотности тока выведенного пучка составляет не хуже $\pm 30\%$ при среднем значении $0,4 \text{ А/см}^2$.

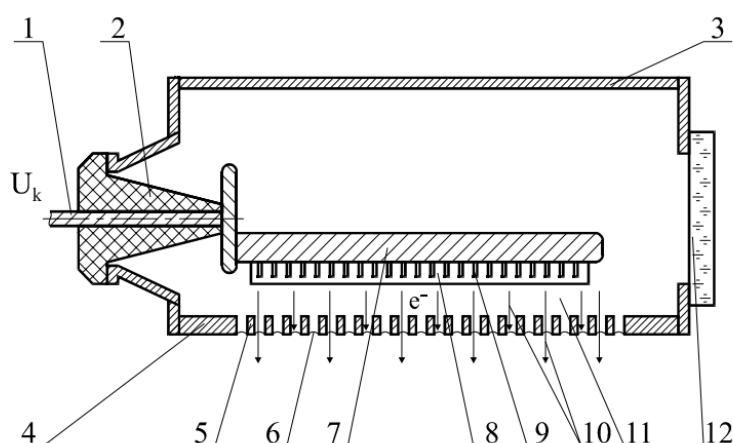


Рисунок 1.3 – Устройство вакуумного диода для генерации ленточного пучка.

1 – высоковольтный токоввод; 2 – проходной изолятор; 3 – вакуумная камера;
 4 – опорная плита; 5 – водоохлаждаемая решетка; 6 – фольга; 7 – катод;
 8 – керамическая пластина; 9 – металлические острия; 10 – поток электронов;
 11 – ускоряющий промежуток; 12 – окно из оргстекла

На данном ускорителе проводились работы для очистки атмосферного воздуха и дымов газов от различных токсичных загрязнений, в том числе по конверсии метана [49, 50]. На ускорителе с конструкцией, идентичной Рисунку 1.3 в работе [14], исследовались процессы конверсии метана под действием импульсного электронного пучка и самостоятельного разряда, инициируемого самим пучком. Наибольшая эффективность преобразования была продемонстрирована в процессе окислительной конверсии метана в электронно-пучковой плазме с использованием катализатора NaOH/CaO. Авторы утверждают, что увеличение степени преобразования и уменьшение времени обработки могут

быть достигнуты за счет увеличения площади поперечного сечения пучка, увеличения частоты следования импульсов, а также установки нескольких ускорителей электронов, которые будут последовательно облучать газовый поток.

Широкоизвестные наносекундные ускорители электронов серии УРТ [2] также являются примерами генерации ПБС с выводом пучка в атмосферу. Схема конструкции ускорителя УРТ-0,5 [51] представлена на Рисунке 1.4. Катодный узел состоит из набора отдельных самостоятельных МДМ-катодов (металл-диэлектрик-металл) [52, 53] или МК-катодов (металлокерамические) [54, 55]. В [2] приведено описание каждого катода с их достоинствами и недостатками, из чего можно сделать вывод, что выбор типа катода зависит от многих факторов, индивидуальных для каждой радиационной технологии.

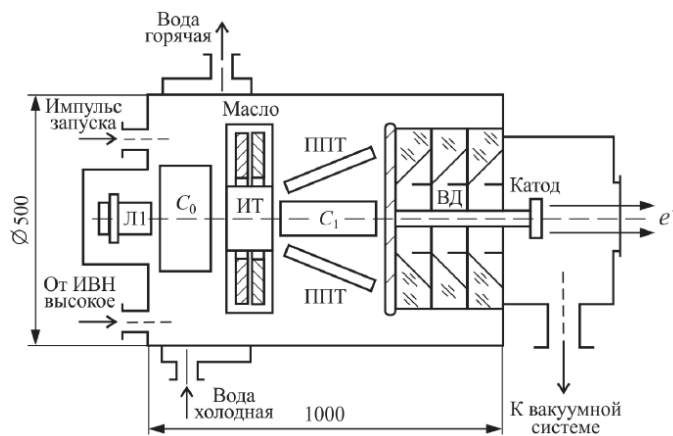


Рисунок 1.4 – Схема конструкции ускорителя УРТ-0,5: C_0 и C_1 – конденсаторы прямой и обратной накачки, ИТ – импульсный трансформатор, ППТ – полупроводниковый прерыватель тока, ВД – вакуумный диод, ИВН – источник высокого напряжения, Л1 – тиратрон

Ускоритель УРТ-0,5 генерирует импульсный электронный пучок длительностью на полувысоте 50 нс и частотой следования импульсов до 200 Гц, с энергией электронов до 500 кэВ. Средняя мощность пучка атмосфере составляет до 1 кВт при энергии в импульсе 6,25 Дж. Электронный пучок выводится в атмосферу через окно диаметром 10 см с прозрачностью опорной решетки 85%, перекрытое двойным слоем алюминиевой фольги толщиной 15 мкм.

Для повышения толщины облучаемого изделия и уменьшения неоднородности распределения поглощенной дозы по толщине на ускорителе УРТ-0,5 была реализована двусторонняя обработка электронным пучком с помощью вакуумного диода с двумя промежутками катод-анод (Рисунок 1.5). Использование такого диода приводит к некоторому снижению ускоряющего напряжения, однако существенным образом улучшается распределение поглощенной дозы в материале и увеличивается производительность работы ускорителя.

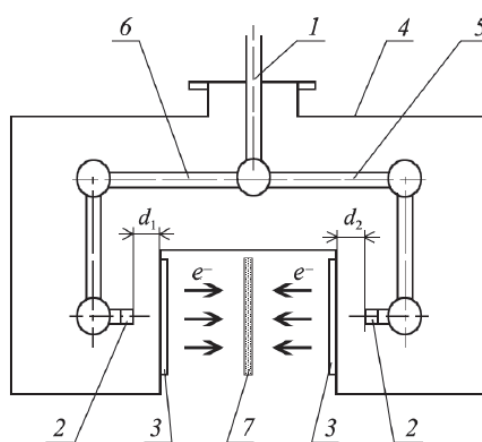


Рисунок 1.5 – Схема вакуумного диода для двусторонней обработки: 1 – общий катододержатель; 2 – катоды; 3 – окна для вывода пучка; 4 – корпус; 5 – левое и 6 – правое плечи катододержателя; 7 – облучаемый объект

При генерации электронного пучка сечением менее 100 см^2 становится возможным использовать ВФО без опорной решетки, например, в ускорителе Астра [56] и Астра-М [57] с диаметром выводного окна 65 мм. Так в работе [58] продемонстрирована возможность вывода пучка в атмосферу с энергией электронов до 350 кэВ, током пучка до 0,6 кА, длительностью $\approx 120 \text{ нс}$ и частотой следования импульсов до 50 Гц. При данных параметрах пучка с использованием титановой фольги толщиной 50 мкм, которая охлаждалась водовоздушной смесью, было сделано 10^5 импульсов со средней мощностью выведенного пучка 250 Вт. Отсутствие опорной решетки, однако, не приводит к высокой эффективности вывода пучка в атмосферу. Так при работе ускорителя на внутреннюю мишень

энергия электронного пучка составляет 19 Дж, а при выводе в атмосферу 4,5 Дж, что связано с отсечкой низкоэнергетической части электронного пучка фольгой выводного окна [56].

При этом продолжают работы по повышению ресурса работы катодного узла ускорителей с ВЭЭ. В работе [59] авторы привели исследования по испытанию системы с внешней подачей жидкости на катод вакуумного диода. В системе использовался криогенный насос, однако при подаче воды с расходом 3 мг/с давление изменялось от 10^{-6} до 10^{-3} Торр. Тем не менее, было сгенерировано 10^3 импульсов; дальнейшая генерация ограничивалась обледенением форсунки для подачи воды.

В работе [60] продемонстрировано повышение эффективности вывода энергии электронного пучка с 47 до 62% путем перехода от сплошного катода к секционированному ленточному, состоящего из 24 эмиттеров. Так ускоритель имел два выводных окна размером 30×100 см², для накачки газового лазера KrF встречными пучками с параметрами: энергией электронов до 500 кэВ, током пучка до 105 кА, длительностью импульса 100 нс и частотой следования до 5 Гц [61]. За счет ведущего и собственного магнитного поля пучка наблюдался поворот траекторий электронов на 4° относительно опорной решетки. Также наблюдались потери на краях катодного узла, вызванные искажением силовых линий электрического поля.

Электронные пучки, сгенерированные за счет ВЭЭ, обладают наибольшей плотностью тока и плотностью энергии пучка. С другой стороны, столь высокие токи создают собственное магнитное поле пучка, которое в совокупности с ведущим магнитным полем и полем от токоведущих частей, требуется учитывать для уменьшения потерь при транспортировке пучка и выводе его в атмосферу. Поскольку длительность импульса зачастую составляет от 1 нс до 10 мкс с частотой следования импульсов до нескольких сотен импульсов в секунду, за счет ограничения схем электропитания, то обеспечение средней мощности пучка в 5–10 кВт является трудоемкой, а в некоторых случаях и невозможной технической задачей. Кроме этого, необходимость использования импульсного генератора

высокого напряжения приводит к потерям электронного пучка на фронте и спаде импульса напряжения, за счет уменьшения коэффициента прозрачности фольги при низких энергиях пучка. Благодаря созданию многоэлементного катодного узла удается генерировать пучки сечением $\sim 1000 \text{ см}^2$, однако при таком подходе происходит разброс срабатывания эмиссионных центров, и чем больше площадь пучка, тем сложнее обеспечить требуемую неоднородность распределения плотности тока. В настоящее время продолжается исследование и разработка новых катодных узлов с высоким ресурсом работы ($\sim 10^8$ импульсов), однако наличие описанных недостатков, взаимозависимость основных параметров пучка, сложность управления этими параметрами и сложно контролируемая эмиссионная способность катода, все равно ограничивают возможности таких ускорителей электронов.

1.3. Ускорители электронов на основе эмиссии из газоразрядной плазмы (с плазменным катодом)

В ускорителях с плазменным катодом генерация пучка происходит при отборе электронов из газоразрядной плазмы, которую также называют эмиссионной. В ускорителях такого типа, при генерации ПБС область эмиссионной плазмы отделена от ускоряющего промежутка с помощью металлической сетки или решетки с размером ячейки, близким к ширине приэлектродного слоя пространственного заряда [62]. Такая конструкция позволяет обеспечить слоевую/сеточную стабилизацию границы эмиссионной плазмы, при которой параметры генерируемого пучка (энергия и ток пучка, длительность и частота следования импульсов) слабо зависят друг от друга [63, 64]. Данная особенность плазменного эмиттера позволяет генерировать электронные пучки с широким диапазоном параметров и использовать их для огромного количества применений [65]. В отличие от ускорителей с ВЭЭ плазменный эмиттер позволяет применять схему с источником постоянного высокого напряжения. Такая схема позволяет сделать электронный пучок в ускоряющем промежутке моноэнергетичным и

снизить, таким образом, потери в выводной фольге, подвергая ее меньшему нагреву.

Распространенной схемой позволяющей генерировать плазму с высокой концентрацией является дуговой разряд с полым анодом. При этом дуговой разряд может быть инициирован как пробоем по поверхности диэлектрика (открытая дуга) [66, 67], так и электрическим пробоем в газе в системах с контрагированной дугой [68, 69]. В системах с полым анодом зачастую эмиссионная плазма имеет положительный потенциал относительно анода разряда, поэтому отбор электронов из плазмы осуществляется через потенциальный барьер [62–71]. Например, в работах [72, 73] представлен ускоритель «Дуэт», генерирующий электронный пучок сечением $15 \times 75 \text{ см}^2$ с энергией до 200 кэВ, током пучка до 30 А, длительностью до 100 мкс и частотой следования импульсов до 50 Гц (Рисунок 1.6).

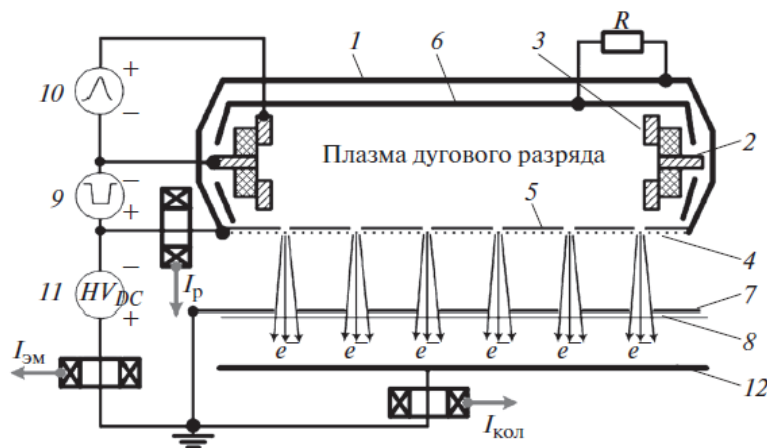


Рисунок 1.6 – Схема ускорителя «Дуэт» с плазменным катодом: 1 – полый анод; 2 – катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – эмиссионная сетка; 5 – маска; 6 – экран (полый анод); 7 – опорная решетка; 8 – выпускная фольга; 9 – источник питания разряда; 10 – источник питания поджига; 11 – источник высокого напряжения; 12 – коллектор

Через ВФО с гексагональной упаковкой отверстий и геометрической прозрачностью 56 % был выведен электронный пучок со средней мощностью до 5 кВт, что составило более 60 % от мощности в ускоряющем промежутке. Для

снижения потерь на ВФО использовалась маска, которая имела соосные с опорной решеткой отверстия и укладывалась поверх мелкоструктурной эмиссионной сетки. Таким образом, ПБС представлял собой суперпозицию отдельных элементарных пучков, сформированных отдельными элементарными структурами. Это позволило добиться коэффициента вывода пучка в атмосферу более 0,75 и неоднородности распределения плотности тока не хуже $\pm 15\%$ за счет использования переменной эмиссионной структуры [74].

В работе [75] представлен ускоритель электронов, в котором для двух катодных узлов, расположенных на торцах общего полого анода, имеется возможность изменять угол их наклона относительно оси полого анода. Угол наклона определяет распределение концентрации эмиссионной плазмы и распределение плотности тока выведенного пучка. Так при угле наклона 8° получена неоднородность плотности тока $\pm 10\%$ на сечении $15 \times 60 \text{ см}^2$. В такой конструкции при ускоряющем напряжении 250 кВ, длительности импульсов 30 мкс и частоте их следования 20 Гц получен пучок с током 35 А при коэффициенте вывода тока пучка 0,5.

В ускорителях с плазменным эмиттером для изменения распределения плотности тока имеется возможность изменения условий отбора электронов из плазменного катода за счет варьирования отношения ширины пристеночного слоя к размеру эмиссионного канала. Так, например, в местах повышенной концентрации плазмы размещают каналы меньших размеров [76]. Для формирования цилиндрического электронного пучка и управления распределением его плотности тока по радиусу и полярному углу предложено решение в работе [77]. Авторы предлагают двуступенчатую разрядную систему, в которой в роли вспомогательного разряда выступает отражательный разряд с полым катодом, а в качестве основного разряда выступает объемный разряд с секционированным анодом. Анод основного разряда представляет собой полый усеченный конус, разбитый на четыре изолированных электрода, который обращен торцом меньшего диаметра в сторону вспомогательного разряда. От угла наклона секционированного анода зависит радиальное распределение плотности плазмы и

величина эмиссионного тока. Управление по полярному углу возможно при изменении распределения тока основного разряда по секциям анода.

Кроме дугового разряда для генерации эмиссионной плазмы может выступать тлеющий разряд. Так в работе [78] представлена конструкция плазменного эмиттера (Рисунок 1.7) на основе контрагированного протяженной щелью тлеющего разряда низкого давления с полым анодом. Вначале зажигается разряд с полым катодом 1 и тонкопроволочным анодом 4, после чего разряд переключается на полый анод 2 за время 20–30 мкс и происходит эмиссия электронов из так называемой анодной плазмы. Разность потенциалов между анодной и катодной плазмой составляет 10–40 В в установившемся состоянии разряда. Авторами работы в данной конфигурации был получен электронный пучок сечением $100 \times 18 \text{ см}^2$ с энергией 160 кэВ, током в несколько ампер, длительностью до 1 мс и частотой следования импульсов до 10 Гц. Коэффициент эффективности извлечения электронов в исследуемых режимах равен 0,5 (определялся как отношение тока пучка к току тлеющего разряда), при этом в работе отсутствуют данные о коэффициенте вывода в атмосферу.

В работе [79] для возбуждения газового лазера использовался ускоритель, генерирующий пучок сечением $5 \times 125 \text{ см}^2$, энергией 150 кэВ и плотности тока до $0,2 \text{ мА/см}^2$. Для генерации эмиссионной плазмы использовался тлеющий разряд с полым катодом. Для возможности модуляции тока и длительности генерируемого пучка использовалась мелкоструктурная сетка, к которой прикладывалось отрицательное напряжение относительно сеточного анода разряда величиной до 100 В.

Возможность генерации электронного пучка с током уровня сотен ампер, используя тлеющий разряд, продемонстрирована в работе [80]. Удалось получить электронный пучок диаметром до 17 см, током до 700 А, энергии электронов до 300 кэВ, и длительности импульса $\sim 200 \text{ мкс}$. Для получения высокой концентрации эмиссионной плазмы использовался полый катод с электростатической ловушкой, образованной множеством катодных стержней и дисков.

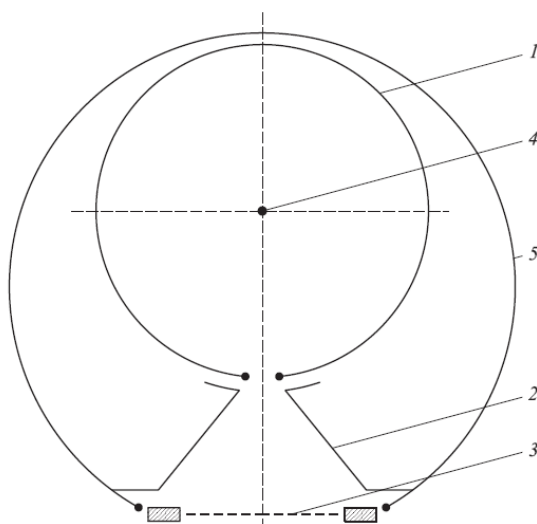


Рисунок 1.7 – Схема электродной системы плазменного эмиттера с тлеющим разрядом: 1 – катод; 2 – анод; 3 – сетка; 4 – вольфрамовая нить; 5 – корпус

Подводя промежуточный итог к этой части обзора, можно сделать вывод, что удобство использования плазменных эмиттеров заключается в возможности как амплитудной, так и широтной модуляции пучка. Достаточно распространенным способом модуляции является управление током плазмообразующего разряда. При этом возможно реализовать схему электропитания, позволяющую проводить амплитудно-широтную модуляцию электронного пучка в течение одного импульса, как показано в [81]. Другим способом модуляции является сеточное управление [82], когда отрицательное напряжение на сеточном электроде препятствует эмиссии электронов из плазмы в ускоряющий промежуток. При этом положительное напряжение уменьшает потенциальный барьер и определяет как амплитуду тока пучка, так и его длительность. Так в работе [83] рассмотрены конструкции источников электронов и физические процессы сеточного управления для генерации электронных пучков субмикросекундной длительности.

Используя плазменный эмиттер с цилиндрической симметрией возможно создавать радиально расходящийся электронный пучок. Такая конфигурация позволяет генерировать пучок с площадью обработки более 1 м^2 , что может быть необходимым для инициирования плазмохимических реакций в газе [84] или как указано в [85] для создания инжекционного тиратрона для коммутации больших токов. Ускоритель, описанный в [85] генерировал в режиме одиночных импульсов

электронный пучок сечением $1,2 \text{ м}^2$ с энергией до 300 кэВ, током до 20 А и длительностью импульса 100 мкс. Плазменный эмиттер состоял из двух катодных узлов на торцах цилиндрического полого анода, боковая поверхность которого выполнена из сетки. Для выравнивания распределения плотности тока пучка поверх основной сетки с ячейкой $0,8 \times 0,8 \text{ мм}$ были уложены сетки с размером ячейки 3×3 и $5 \times 5 \text{ мм}$ в области плазмогенераторов. Таким способом ограничивалась плотность электронного тока в области повышенной концентрации плазмы.

Радиально сходящийся электронный пучок, представленный в [76, 86, 87], служил для накачки газового лазера (Рисунок 1.8). Такая конструкция позволяет при одинаковых габаритах камеры более чем в два раза увеличить площадь ВФО, что позволяет снизить тепловую нагрузку на фольгу или повысить ток пучка при допустимой плотности тока на фольге. Также радиально сходящийся пучок позволяет более равномерно вкладывать энергию в газовую среду лазера. Так как напряженность электрического поля на катоде в данной геометрии электродов меньше чем на аноде, то повышается электрическая прочность ускоряющего промежутка. Внешняя и внутренняя цилиндрические поверхности плазменного эмиттера имеют диаметры 50 и 35 см, причем внутренний цилиндр изготовлен из сетки с ячейкой $1 \times 1 \text{ мм}$. Лазерная камера, часть которой является одновременно анодом ускорителя и опорной решеткой фольгового окна, представляет собой цилиндр длиной 70 см с внутренним диаметром 19,5 см и внешним – 24,5 см. На длине 60 см по азимуту в ВФО имеются отверстия диаметром 2 см; геометрическая прозрачность опорной решетки составляет 85%. Созданный ускоритель позволял генерировать электронный пучок с энергией до 200 кэВ, током до 1 кА, длительностью 10–50 мкс и частотой следования импульсов до 10 Гц. При напряжении 160 кВ, токе пучка 62 А и длительности 50 мкс энергия пучка, измеренная калориметром, составила 160 Дж [86].

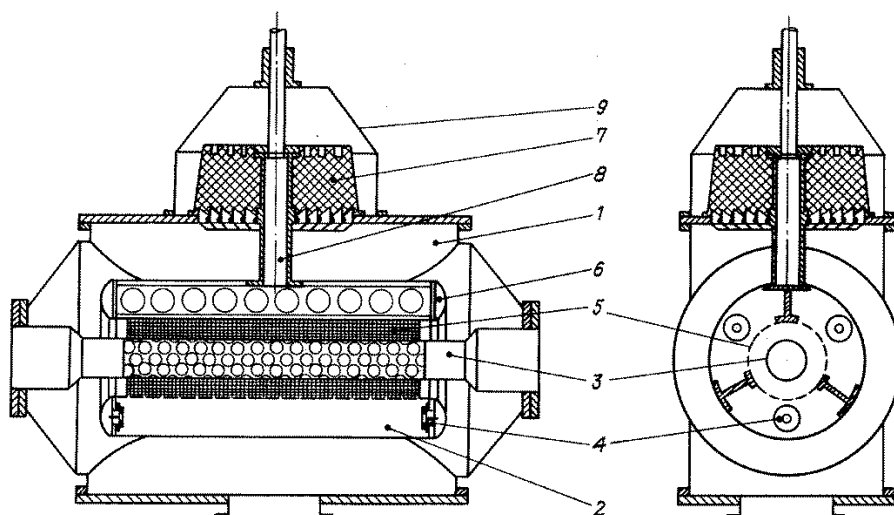


Рисунок 1.8 – Схема конструкции ускорителя электронов с радиально сходящимся пучком: 1 – вакуумная камера; 2 – полый анод разряда; 3 – анод (выводное фольговое окно); 4 – катодные узлы разряда; 5 – эмиссионная сетка; 6 – плазменный катод; 7 – проходной изолятор; 8 – штанга крепления эмиттера; 9 – колпак изолятора

Использование в ускорителях с плазменным катодом различных форм горения разряда позволяет генерировать электронные пучки с широким диапазоном токов пучка (1–1000 А) и слабой зависимостью параметров пучка друг от друга. При этом вне зависимости от типа разряда электропитание плазменного катода находится на стороне высокого потенциала, что существенно усложняет схему электропитания ускорителя. Использование дугового разряда, который является нестационарным особенно в импульсном режиме, может приводить к неустойчивостям работы плазменного катода. Также нужно отметить, что в импульсном режиме генерации с токами пучка десятки-сотни ампер приходится использовать высоковольтную конденсаторную батарею, которая является достаточно массогабаритным узлом установки. Существенный недостаток, который относится ко всем описанным выше ускорителям, заключается в вероятности электрического пробоя ускоряющего промежутка, когда пучок представляет собой плотный энергетический поток, замыкающийся на выводную

фольгу, что неизбежно приводит к разгерметизации вакуумной камеры и аварии (например, [75]).

1.4. Ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда

Явление вторичной ионно-электронной эмиссии подразумевает под собой эмиссию электронов с поверхности твердого тела при его бомбардировке потоком ионов [65, 88]. Принцип действия ускорителей с ионно-электронной эмиссией основан на формировании потока ускоренных ионов, которые бомбардируют поверхность высоковольтного катода, зачастую представляющего собой металлическую пластину. В результате образуются вторичные электроны, формирующие электронный пучок с энергией, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. При разности потенциалов между высоковольтным катодом и полым/плоским анодом, когда соблюдаются условия в соответствии с кривыми Пашена, зажигается высоковольтный тлеющий разряд (ВТР). При этом ионная бомбардировка поверхности катода происходит либо ионами, рожденными в плазме ВТР, либо ионами плазменного анода, который специально создается вспомогательным разрядом с отдельным источником электропитания. Ускорители с ионно-электронной эмиссией разделяются на две группы – с самостоятельным и несамостоятельным ВТР.

Ускорители с самостоятельным ВТР отличаются простотой конструкции, обусловленной возможностью образования плазмы, необходимой для возбуждения ионно-электронной эмиссии, и генерации электронного пучка в одном межэлектродном промежутке без использования дополнительных источников электропитания [1, 9]. В работе [89] проводилось исследование самостоятельного ВТР (Рисунок 1.9) с ускоряющим напряжением до 150 кВ, плотностью тока до 1 А/см^2 и длительностью импульса 20 мкс. Катод и анод выполнены из алюминиевых пластин и помещены в стеклянный цилиндр диаметром 15 см. В работе отмечено, что при напряжении более 120 кВ и токе более 200 А при давлении азота 1 Па происходит переход ВТР в дуговой разряд через 30 мкс. С помощью плоских зондов как контактирующих с плазмой, так и закрытых от нее

алюминиевой фольгой толщиной 25 мкм, показано, что доля высокоэнергетических электронов с энергией порядка ускоряющего напряжения значительно больше, чем плазменных электронов со средней энергией в несколько электронвольт.

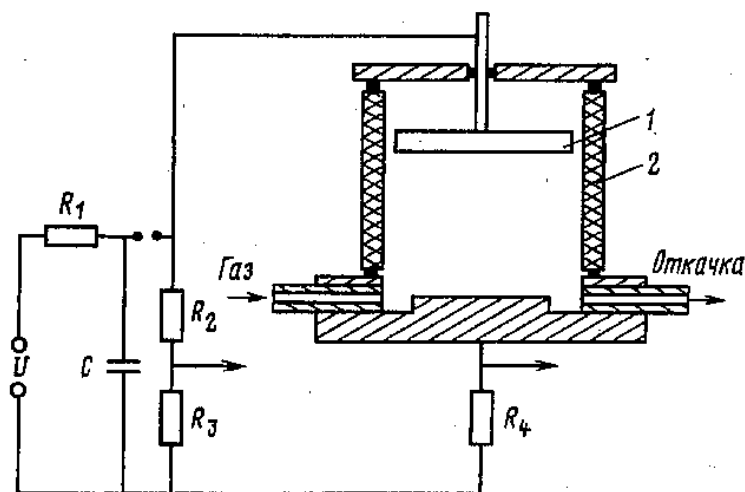


Рисунок 1.9 – Схема ускорителя с самостоятельным ВТР: 1 – высоковольтный катод; 2 – изолятор

Для генерации самостоятельного ВТР зачастую стенки вакуумной камеры выполнены из диэлектрического материала (стекло, оргстекло), что может приводить к некоторым дестабилизирующим факторам. Так в работах [90, 91] показано, что в импульсном ВТР в дейтерии между плоскими электродами из нержавеющей стали в стеклянной трубке диаметром 9 см при межэлектродном расстоянии 20 см анодная плазма расширяется вдоль стенок трубки, в результате чего граница плазмы приобретает вогнутую форму. При этом ионный поток, эмитируемый данной плазмой, фокусируется в приосевую часть катода, что приводит к осевому сжатию разряда. Увеличение диаметра трубки снижает влияние стенок, и распределение тока становится более равномерным. Кроме этого, переход ВТР в дуговой разряд провоцируется искрениями между диэлектриком и катодом, где из-за вогнутой формы плазменной границы напряженность электрического поля значительно выше, чем на оси трубки.

В работе [92] для электроионизационного лазера CO_2 использовался ускоритель с полым цилиндрическим катодом и анодом ВТР. При этом на расстоянии 20 мм от катода проходила латунная сетка, имеющая потенциал катода. Генерация электронного пучка сечением $\sim 200 \text{ см}^2$, плотностью тока 10 мА/см^2 и длительностью до 50 мкс происходила при напряжении 120 – 150 кВ. При прозрачности опорной решетки 67% коэффициент вывода β составил около 0,5. Повышение давления для увеличения амплитуды тока пучка приводит к значительному повышению неоднородности распределения тока по сечению с локализацией разряда в центральной области.

При выполнении условия зажигания разряда по Пашену $pd > (pd)_{\text{зж}}$ в плоскопараллельной системе электродов с анодным отверстием благодаря провисанию электрического поля возможно зажигание ВТР по длинному пути вдоль оси отверстия. Данным способом возможно получить электронный пучок произвольной формы (ленточный, кольцевой) [93]. Получение ПБС таким образом возможно, как совокупности многих пучков малого сечения.

В [94] представлена коаксиальная конструкция для генерации радиально сходящего электронного пучка. Внешний цилиндр из нержавеющей стали диаметром 22 см являлся катодом ВТР, а в роли анода выступал сеточный цилиндр диаметром 6,3 см, перекрытый титановой фольгой толщиной 10 мкм. При давлении гелия 1,2 Па и ускоряющем напряжении 120 кВ удалось получить ток пучка за фольгой 6 А и плотность тока 5 мА/см^2 , при этом в работе отсутствуют данные о распределении тока.

Ускорители с самостоятельным ВТР зачастую работают в импульсном режиме с длительностью, не превышающей нескольких сотен микросекунд, что ограничено переходом ВТР в дуговую форму разряда с резким снижением напряжения на ускоряющей промежутке. Помимо этого, управление током электронного пучка и распределением плотности тока по сечению пучка возможно лишь с помощью изменения давления рабочего газа, повышение которого приводит также к сокращению высоковольтной стадии генерации разряда.

Более гибкое управление током электронного пучка реализуется в ускорителях с несамостоятельным ВТР, в которых ионный поток для бомбардировки поверхности высоковольтного катода формируется не самим ВТР, а специально созданным с помощью вспомогательного разряда плазменным эмиттером. Для разделения области генерации вспомогательного разряда и ускоряющего промежутка с несамостоятельным ВТР используют металлическую сетку или перфорированный электрод. Это позволяет обеспечить слабую зависимость положения границы эмиссионной плазмы и характеристик вспомогательного разряда от величины ускоряющего напряжения. Таким образом, в ускорителях с несамостоятельным ВТР управление параметрами пучка (амплитуда и распределение тока, длительность и частота следования импульсов) при постоянном ускоряющем напряжении, как и в случае плазменных катодов, осуществляется с помощью образующего эмиссионную плазму вспомогательного разряда. Кроме этого, наличие вспомогательного разряда позволяет осуществлять генерацию ВТР при пониженном рабочем давлении (до 10^{-2} Па), тем самым, снижая вероятность перехода ВТР в низковольтную форму и обеспечивая возможность генерации непрерывного электронного пучка.

В роли вспомогательного разряда может использоваться разряд с термоэмиттером [95, 96]. Использование термокатада для генерации эмиссионной плазмы позволяет снизить рабочее давление в ускорителе и тем самым повышает электрическую прочность ускоряющего промежутка. В [96] продемонстрирована конструкция ускорителя с эмиттером ионов, в котором анодом выступали вертикально расположенные пластины 20×2 см², закрытые сверху и снизу мелкоструктурной сеткой. Между анодными пластинами натянуты накаливаемые катоды диаметром 0,5 и длиной 200 мм. Для устранения паразитного тока в области ускоряющего промежутка использовалась дополнительная сетка с отрицательным потенциалом, превышающим по амплитуде напряжение накала. Управление длительностью генерации в диапазоне от 50 до 1000 мкс осуществлялось положительными импульсами (300 – 400 В) на анод разряда. Ток пучка регулировался током накала и давлением гелия от 0,15 до 1,5 Па. Ускоритель

генерировал электронный пучок сечением $20 \times 100 \text{ см}^2$, энергией 130 кэВ и плотностью тока до 5 мА/см^2 . При токе вспомогательного разряда 7 А ток пучка составлял 1,5 А, однако в работе отсутствуют данные о токе в ускоряющей промежутке и эффективности вывода в атмосферу. Хотя авторы и утверждают о достижении неоднородности плотности тока $\pm 15\%$, однако предложенная конструкция достаточно сложная, а использование термоэмиттеров приводит к недостаткам, характерным для ускорителей с термокатодом, описанным в разделе 1.1.

В работах [26, 97, 98] показано, что, используя дуговой разряд в роли вспомогательного, возможно получить плотность электронного тока 1 А/см^2 при сечении до 150 см^2 , напряжении до 250 кВ и длительности импульса 20–35 мкс. Для повышения эффективности генерации плазмы использовалось пристеночное магнитное поле в области анода дугового разряда [98] или устанавливались дополнительные проволоки в центральной части эмиттера, которые также являлись частью анода дугового разряда [97]. Дуговой разряд обеспечивал ток до 600 А с током эмиссии ионов азота 15 А при давлении 0,1 Па. Ток генерируемого электронного пучка составлял 25–50% от тока в ускоряющей промежутке, без вывода в атмосферу. При этом эффективность генерации электронного пучка увеличивалась с ростом ускоряющего напряжения и была тем выше, чем меньше ток вспомогательного разряда. При использовании контрагированного дугового разряда имеется ограничение по амплитуде тока и длительности пучка, которое связано с электронной откачкой газа из канала контрагирования и уходом ионов в катодную область разряда, что приводит к обрыву тока разряда [99]. Кроме этого, представленный в [26] генератор эмиссионной плазмы обеспечивал неоднородность распределения тока выведенного в атмосферу пучка $\pm 20\text{--}25\%$. При токах дугового разряда десятки и сотни ампер требуются дополнительные способы снижения неоднородности распределения концентрации плазмы (введение дополнительного анода или магнитного поля), что технически усложняет электродную систему вспомогательного разряда.

Известны работы, когда для генерации эмиссионной плазмы используются отдельные вспомогательные источники электронов на основе ВТР, работающие встречно [100, 101]. Так в работе [100] (Рисунок 1.10) данным способом генерировался непрерывный электронный пучок сечением $18 \times 60 \text{ см}^2$, энергией 150 кэВ и током 50 мА. Коэффициент вывода β составил 0,53. Распределение плотности тока пучка было не хуже $\pm 10\%$.

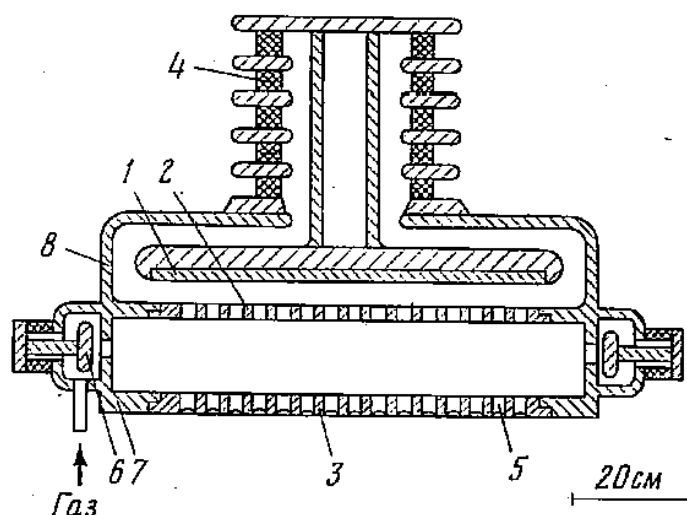


Рисунок 1.10 – Конструкция ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР:

1 – катод; 2 – анод; 3 – опорная решетка; 4 – проходной изолятор; 5 – фольга; 6 – вспомогательный катод; 7 – вспомогательный анод; 8 – вакуумная камера

Управление током ускорителя осуществлялось в данном случае током вспомогательных источников, который превышает ток в ускоряющем промежутке примерно в три раза. Затраты мощности на генерацию вспомогательных источников электронов составляет $\sim 100 \text{ Вт}$ при мощности в ускоряющем промежутке более 7 кВт. Данный способ генерации вспомогательного разряда хоть и сложен в своей реализации за счет настройки режима работы отдельных источников электронов в совокупности с оптимизацией работы ускорителя в целом, но позволяет обеспечить высокий ресурс работы, определяемый скоростью распыления материала катода и запылением поверхности изолятора.

Авторами работы [102] было предложено вместо плоского высоковольтного катода ВТР использовать полый катод, в котором сторона, обращенная к аноду

перекрыта сеткой. При такой конструкции генерация электронного пучка осуществляется как за счет ионно-электронной эмиссии, так и из плазмы, создаваемой внутри катодной полости. Использование полого высоковольтного катода позволило повысить ток пучка в два раза по сравнению с плоским катодом. В данной работе вспомогательным являлся разряд с замкнутым дрейфом электронов, позволяющий создавать интенсивный ионный пучок током 2 А, что составляет около 7% от общего тока разряда. Отсутствие анодной решетки/сетки позволило снизить потери электронного пучка примерно на 30%, однако авторы отмечают, что потери электронного пучка при прохождении плазмы вспомогательного разряда повышаются (от 15 до 30%) с ростом тока разряда (от 16 до 25 А). Малое количество экспериментальных результатов не позволило установить причину данных потерь. Созданная конструкция имеет диаметр 6,2 см рабочей части высоковольтного катода ВТР и соответствующего размера область эмиссии ионов, однако генерация ПБС сечением $\sim 1000 \text{ см}^2$ и энергий 100–150 кэВ не позволит обойтись без использования анодной решетки/сетки за счет сильного электрического поля, которое будет отодвигать границу плазмы за пределы эмиссионной апертуры. Все же идея по использованию полого высоковольтного катода кажется весьма перспективной, исходя из полученных результатов.

Наиболее распространенным разрядом для создания эмиттера ионов в ускорителях с ВТР является тлеющий разряд с полым катодом [5, 103–105] благодаря временной стабильности и пространственной однородности параметров плазмы [62]. Эффективным с точки зрения генерации плазмы и простым по конфигурации электродной системы является тлеющий разряд с полым катодом и тонкопроволочным анодом, так называемый орбитронный разряд (в англоязычной литературе известный как *wire discharge* [106–108]). В данном разряде анодом выступает тонкая проволока диаметром 0,1–1 мм. За счет малого диаметра анода электроны осциллируют вокруг него и нарабатывают плазму, дополняя электростатическое удержание эффекта полого катода. Расположение анодных проволок определяет конфигурацию распределения эмиссионной плазмы. Так в работе [109] вспомогательный разряд включал в себя 17 проволочных анодов.

Ускоритель работал в режиме коротких импульсов 2–5 мкс и длинных импульсов 5–150 мс. Максимальная плотность тока электронного пучка составила 2 А/см² при токе вспомогательного разряда 300 А.

Таким образом, в ускорителях с несамостоятельным ВТР возможна малоинерционная регулировка тока электронного пучка путем изменения концентрации анодной плазмы и ее распределения при постоянном ускоряющем напряжении. Простота и надежность конструкции в совокупности с высоким ресурсом работы являются несомненным преимуществом данного типа ускорителей. Катоды ВТР не чувствительны к аварийным прорывам атмосферы, в отличие от термоэмиттеров, при этом вся конструкция имеет более высокую виброустойчивость. Важнейшим преимуществом является то, что катод ВТР находится под высоким (~200 кВ) ускоряющим напряжением, а все остальные схемы и элементы помещаются под потенциал “земли”, что в свою очередь, значительно упрощает как схему электропитания и управления ускорителя, так и диагностику его систем. Отсутствует высоковольтный разделительный трансформатор на полное ускоряющее напряжение, необходимый для ускорителей с эмиттерами, требующими электропитание на высоковольтной стороне. То есть для ускорителей ВТР единственным источником высокого (ускоряющего) напряжения является либо высоковольтный импульсный трансформатор (для импульсного или импульсно-периодического режимов), либо простейший высоковольтный выпрямитель для непрерывного режима работы. При этом второй способ генерации электронного пучка является более перспективным с точки зрения меньшей дороговизны систем электропитания. Рабочее давление в ускорителях ВТР составляет 0,01–1 Па, что позволяет существенно упростить систему вакуумной откачки с суммарной производительностью до 2000 л/с при использовании арматуры с диаметром не более 15–20 см, что существенно уменьшает массогабариты вакуумной системы и рабочей камеры ускорителя [110]. Важно отметить, что принцип действия ускорителя с ВТР позволяет формировать не только плоские потоки электронов, но и, в случае необходимости, делать их радиально сходящимися/расходящимися (например, в случае всесторонней

стерилизации медицинского инструмента и др.) [111]. Для этого катод ускорителя (и, соответственно, анод) выполняются в виде цилиндра с внешней или внутренней рабочей поверхностью. Использование ускорителей электронов на основе ионно-электронной эмиссии [19, 26, 95, 100, 112] позволяет получать относительно высокую среднюю мощность пучка, выведенного в атмосферу, используя опорную решетку выпускного фольгового окна дырочного или щелевого типов. Настройка и оптимизация геометрии ускоряющего промежутка и параметров разрядной системы позволяют достигать высокой эффективности вывода пучка из вакуума в атмосферу ($\beta \approx 0,6$ при ускоряющем напряжении 200 кВ).

Основным недостатком ускорителей такого типа в данном случае является то, что высокая эффективность вывода тока пучка достигается только при определенной конфигурации ИЭОС и в достаточно узком диапазоне параметров, то есть практически в одном режиме работы. Данная проблема носит глобальный характер и присуща всем источникам и ускорителям электронов данного типа. Так, например, при изменении ускоряющего напряжения, тока вспомогательного разряда или геометрии ускоряющего промежутка происходит расфокусировка ионного пучка, бомбардирующего катод, что неизбежно приводит к потерям тока электронного пучка на ребрах опорной решетки ВФО и, как следствие, к снижению энергетической эффективности ускорителя, что существенно усложняет поиск оптимального режима облучения в эксперименте, а также ограничивает сферу применений ускорителей в промышленности. Кроме этого, вспомогательный разряд зачастую обладает электродной системой с полым катодом, что приводит к возникновению микровзрывов и катодных пятен на его стенках. Данный фактор не только отрицательным образом влияет на стабильность самого разряда, но и локально повышает концентрацию эмиссионной плазмы, создавая неоднородности плотности тока электронного пучка и повышая вероятность перехода несамостоятельного ВТР в низковольтную стадию горения.

Проведенный анализ литературы демонстрирует конкурентоспособность ускорителей с несамостоятельным ВТР перед остальными типами ускорителей с ПБС, а также перспективность их применения. Актуальной задачей по

совершенствованию данных ускорителей является снижение потерь электронного пучка на анодной и опорной решетке, повышение стабильности работы ускорителя такого типа, а также расширение диапазона параметров получаемого пучка при сохранении эффективности генерации и вывода в атмосферу. Выполнение данных задач возможно путем управления параметрами вспомогательного разряда, которые определяют ИЭОС ускорителя. При этом управление параметрами плазменного эмиттера позволит получать оптимальную ИЭОС без изменения геометрии и конструкции электродной системы ускорителя.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Описание макета ускорителя на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда

С учетом анализа существующих на данный момент ускорителей с выводом электронного пучка в атмосферу, приведенный в главе 1, в качестве основного объекта исследования выбран широкоапертурный ускоритель электронов на основе несамостоятельного ВТР с плазменным эмиттером ионов (Рисунок 2.1).

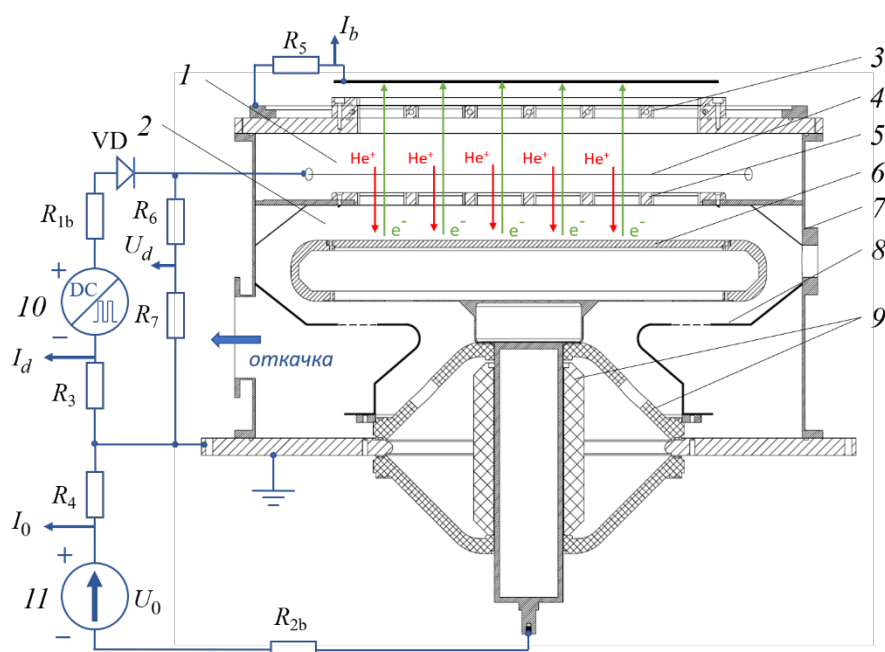


Рисунок 2.1 – Схема ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР:
 1 – область анодной плазмы; 2 – ускоряющий промежуток; 3 – выводное фольговое окно; 4 – тонкопроволочный анод; 5 – анодная решетка;
 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера; 8 – экран; 9 – изоляторы;
 10 – источник питания вспомогательного разряда; 11 – высоковольтный источник питания

Конструкция ускорителя, представленная в работах [113, 114], включает в себя две основные области: область генерации эмиссионной/анодной плазмы с помощью вспомогательного разряда 1, и область ускорения заряженных частиц 2 (ускоряющий промежуток), в которой горит несамостоятельный ВТР, и

заряженные частицы приобретают энергию, соответствующую ускоряющему напряжению U_0 .

Граница между этими промежутками установлена с помощью медной анодной решетки 5, имеющей щелевую конфигурацию отверстий шириной 8 мм и длиной 95 мм, повторяющих конфигурацию отверстий в водоохлаждаемой опорной решетке выводного фольгового окна 3, перекрытого алюминий-магниевой фольгой марки АМГ-2н толщиной 30 мкм. Анодная и опорная решетки имеют размер 45×65 см и толщину 2,4 см, выполнены из меди марки М1 и имеют геометрическую прозрачность 68%. Опорная решетка идентична анодной, внешний вид которой вместе с характерными размерами представлена на Рисунке 2.2.

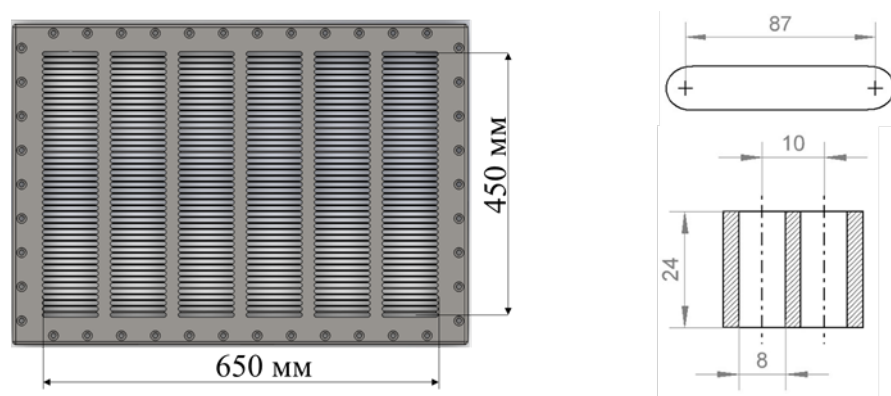


Рисунок 2.2 – Модель анодной решетки с характерными размерами апертуры

Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный орбитронный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами. Полый катод диаметром 103 см и высотой 13 см с общей площадью $\approx 2,1 \text{ м}^2$ представляет собой часть цилиндрической вакуумной камеры 7, ограниченную анодной решеткой 5 и ВФО 3 (Рисунок 2.1 и Рисунок 2.3). Анодом выступают две вольфрамовые проволоки 4 диаметром 0,35 мм и длиной 85 см с суммарной площадью $\approx 18 \text{ см}^2$, натянутые вдоль длинной стороны анодной решетки и находящиеся в геометрической тени для электронного пучка. Ионы, эмитированные с границы эмиссионной/анодной плазмы и прошедшие через отверстия анодной решетки набирают энергию в ускоряющем промежутке длиной

6,8 см и бомбардируют поверхность высоковольтного катода, выполненного из нержавеющей стали и находящегося под потенциалом до -150 кВ относительно «земли», что приводит к вторичной ионно-электронной эмиссии. Вследствие перезарядки ускоренных ионов, в высоковольтном промежутке возникает поток нейтралов с широким энергетическим спектром, которые также бомбардируют поверхность катода [9]. В результате возникают вторичные электроны, которые ускоряются по направлению к анодной решетке до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Проходя щелевые каналы анодной решетки, пучок электронов инжектируется в область генерации эмиссионной/анодной плазмы, через которую он проходит с минимальными взаимодействиями с рабочим газом в силу малости сечения столкновений ($<10^{-22}$ м⁻³, [115]) и большой длины свободного пробега ~ 10 м, существенно превышающей расстояние между анодной решеткой и ВФО, которое составляет 14,5 см.

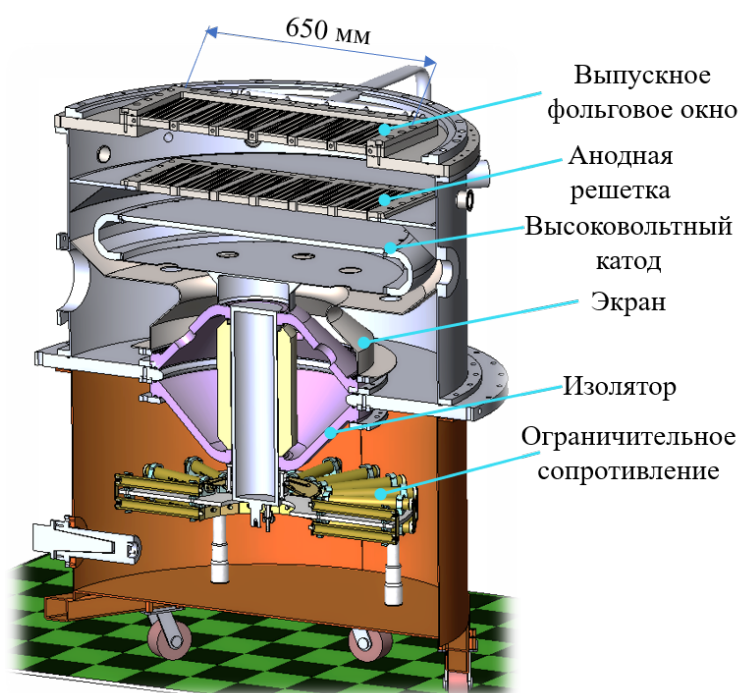


Рисунок 2.3 – Разрез модели ускорителя с основными узлами

Высоковольтный катод диаметром 82 см, установлен на изолятор 9, состоящий из двух конусных частей. Для обеспечения электрической прочности

промежутка между тыльной стороной высоковольтного катода, не подверженной ионной бомбардировке, и вакуумной камерой установлен специальный металлический экран 8, задающий межэлектродное расстояние 4,5 см. Изолирование цилиндрического токоввода высоковольтного катода от горизонтального фланца вакуумной камеры обеспечено с помощью капролоновой вставки 9.

Насосная группа вакуумной откачки состоит из турбомолекулярного насоса ТМН-500 и пластинчато-роторного форвакуумного насоса 2НВР-60Д (Рисунок 2.4). Предельное давление в вакуумной камере составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Па при оттренированной электродной системе ускорителя. Поскольку условия генерации электронного пучка соответствуют левой ветви кривых Пашена, то для обеспечения электрической прочности ускоряющего промежутка в роли рабочего газа используется гелий, а его напуск осуществляется в область вспомогательного разряда через натекатель игольчатого типа до рабочего давления $p = 1-5$ Па.

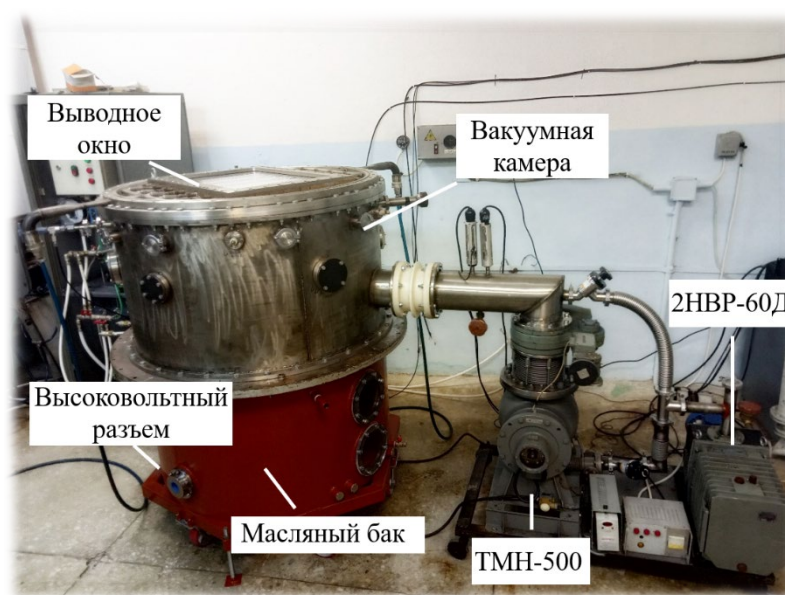


Рисунок 2.4 – Фотография исследуемого ускорителя на основе несамостоятельного ВТР

Рабочее давление измеряется вакуумметром ZDF-III-LED 52T/27 с пересчетом на гелий $p_{He} = p_{вак}/0,19$ и с поправкой на коэффициент, учитывающий разницу давления в области генерации вспомогательного разряда и области

расположения измерительных вакуумных ламп. Достижение рабочего давления в вакуумной камере осуществляется при помощи регулятора расхода газа РРГ-12 с дистанционным управлением по интерфейсу RS-485. Разработанный алгоритм позволяет регулировать напуск рабочего газа в систему в различных условиях генерации электронного пучка. Показания вакуумметра выводятся на персональный компьютер (ПК). Наличие такой автоматизации является важным условием для обеспечения стабильности работы ускорителя, поскольку по мере генерирования электронного пучка электроды системы нагреваются, давление растет и повышается вероятность зажигания самостоятельного тлеющего разряда в высоковольтном ускоряющем промежутке. По мере дегазации электродов напуск рабочего газа изменяется таким образом, что давление газа в системе остается постоянным.

Электропитание вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника APPEL-SB-1,5PDC-3000-1. Данный источник имеет как непрерывный, так и импульсно-периодический режим работы с частотой f от 1 до 100 кГц с возможностью изменения коэффициента заполнения импульсов D в диапазоне $(0,1-0,8)$, а также позволяющий стабилизировать и управлять средним выходным током I_d в диапазоне от 10 до 500 мА. Напряжение холостого хода, составляющее 3 кВ, позволяет зажигать тлеющий разряд с полым катодом при давлении 2 Па. В случае невозможности инициирования вспомогательного разряда, например, при низком давлении, принудительно повышается давление рабочего газа путем кратковременного повышения напуска рабочего газа через РРГ-12. Подача напряжения к аноду разряда осуществляется от одного выходного канала источника питания при параллельном подключении анодных проволок. Для предотвращения перехода тлеющего разряда в дуговую форму и обеспечения однородности горения вспомогательного разряда на два проволочных анода в цепь каждого из них установлено балластное сопротивление R_{bl} (Рисунок 2.1) номиналом 7,5 кОм. Так, при использовании источника электропитания разряда в качестве источника тока, снижение тока разряда через одну проволоку (вплоть до нулевого значения) приводит к росту тока через вторую проволоку, а,

следовательно, к росту напряжения на выходе источника тока. Рост выходного напряжения источника тока приводит к росту напряжения в цепи первого анода, что позволяет самосогласованно уравнивать величину тока через оба анода и снизить неоднородность концентрации эмиссионной плазмы. Измерение общего тока разряда осуществляется через низкоиндуктивный шунт R_3 сопротивлением 50 Ом. Напряжение горения разряда U_d измеряется на одном проволочном аноде с помощью резистивного делителя, состоящего из сопротивления R_6 номиналом 1 МОм и R_7 номиналом 10 кОм. Делитель откалиброван по высоковольтному щупу АКТАКОМ АСА-0639 с внутренним резистивным делителем 1:1000. Для измерения амплитудных и временных параметров сигналов использовался осциллограф Tektronix TDS 2014C и Agilent Technologies DSO1014A.

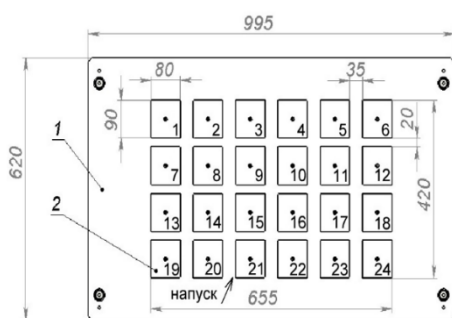
Для подачи на высоковольтный катод ускоряющего напряжения U_0 используется источник высокого напряжения, созданный в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Источник представляет собой высоковольтный выпрямитель и имеет выходное постоянное напряжение до 250 кВ, максимальный ток 200 мА и максимальную мощность 50 кВт. Система питания и управления высоковольтным источником находится в отдельном силовом шкафу и обеспечивает коммутацию электропитания высоковольтного выпрямителя, поддержание заданных параметров, а также автоматически проверяет работоспособность и техническое состояние источника. Удаленное управление работой источником происходит через интерфейс RS-232 от ПК, который расположен в отдельной пультовой комнате. Подача напряжения к ускоряющему промежутку осуществляется через высоковольтный кабель с разъемами (Claymount P3, CA18). Для ограничения тока и снижения вероятности перехода ВТР в самостоятельную форму горения в высоковольтной цепи установлено ограничительное сопротивление R_{2b} (Рисунок 2.1 и Рисунок 2.3). Данное сопротивление представляет собой сборку из сопротивлений КЭВ-20-1, которые помещены в маслонеполненный бак (Рисунок 2.4), что обеспечивает достаточную электрическую прочность высоковольтных зазоров в баке и удовлетворительный отвод тепла от резисторов. Измерение тока нагрузки

высоковольтного источника, который является током в ускоряющем промежутке I_0 , осуществляется через низкоиндуктивный шунт R_4 (Рисунок 2.1).

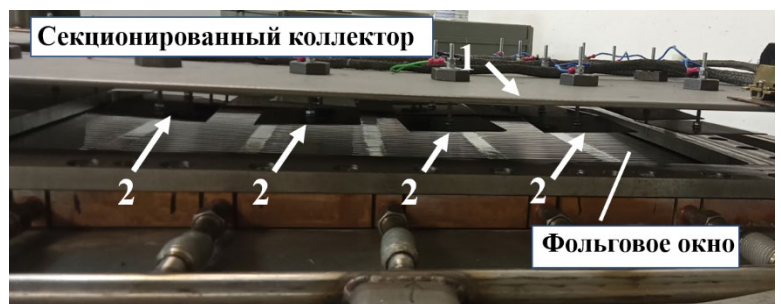
2.2. Измерение плотности тока пучка, выведенного в атмосферу

Для измерения тока электронного пучка, выведенного в атмосферу, использовался коллектор из нержавеющей стали толщиной 3 мм. Коллектор изолирован от ВФО и расположен на расстоянии 20 мм от него. Регистрация тока на коллекторе осуществлялась через сопротивление R_5 (Рисунок 2.1). Измеряя ток пучка и зная площадь коллектора, рассчитывалась средняя плотность тока выведенного пучка электронов. Учет отраженных от коллектора электронов не проводился, однако из данных [116, 117] следует, что их количество не превышает 20% от всего выводимого тока пучка для исследуемого диапазона энергий.

Для измерения распределения плотности тока по сечению пучка был создан секционированный коллектор (Рисунок 2.5) [118]. Конструкция коллектора включает в себя пластину из нержавеющей стали 1 , на которой через капролоновые изоляторы закреплены металлические пластины 2 размером 8×9 см и толщиной 1,5 мм в количестве 24 штук. Для измерения тока на каждой коллекторной пластине подключены сопротивления $R_{изм}$ номиналом $10 \text{ кОм} \pm 1\%$ (Рисунок 2.6).



а



б

Рисунок 2.5 – Секционированный коллектор: а – чертеж; б – фотография установленного коллектора напротив фольгового окна; 1 – основание коллектора; 2 – секции коллектора

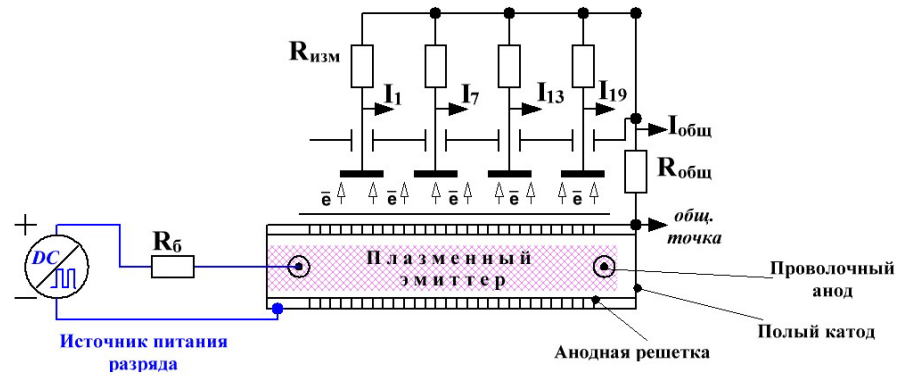


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема подключения секционированного коллектора для измерения распределения плотности тока пучка

Таким образом, в предложенной схеме измерение распределения плотности тока пучка сводится к измерению падения напряжения на каждом $R_{изм}$, создаваемое протекающим током пучка через соответствующую коллекторную пластину, а полный ток пучка регистрируется на $R_{общ}=100$ Ом. В этом случае, очевидно, что измерение падения напряжения должно занимать как можно меньший промежуток времени, особенно при измерении распределения плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме. Наличие множества коллекторных пластин приводит к необходимости использования автоматизированной многоканальной системы измерения плотности тока пучка, обеспечивающей низкую погрешность измерений, отправку, обработку и визуализацию измеренных значений на ПК, используя микроконтроллер.

На сегодняшний день широко распространены печатные платы Arduino, в которых установлены микроконтроллеры серии ATmega. Для создания автоматизированной системы измерения была выбрана плата Arduino mega 2560 R3. Встроенное в ATmega2560 АЦП обеспечивает достаточную разрядность и высокое быстродействие. Увеличение числа входных каналов до 25 обеспечено при помощи двух аналоговых мультиплексов (Рисунок 2.7). Падение напряжения на $R_{изм}$ прикладывается к мультиплексу, который коммутирует поочередно каждый сигнал на повторитель напряжения, делитель и АЦП, что в конечном итоге позволяет измерить уровень сигнала и перевести его в двоичный код для передачи

данных на ПК. Таким образом, измерение распределения плотности тока пучка в непрерывном режиме генерации осуществлялось путем поочередного измерения сигнала с каждого коллектора, а многократное повторение цикла (более 100 раз) с дальнейшим усреднением, позволяло получать интегральную картину выведенного электронного пучка.

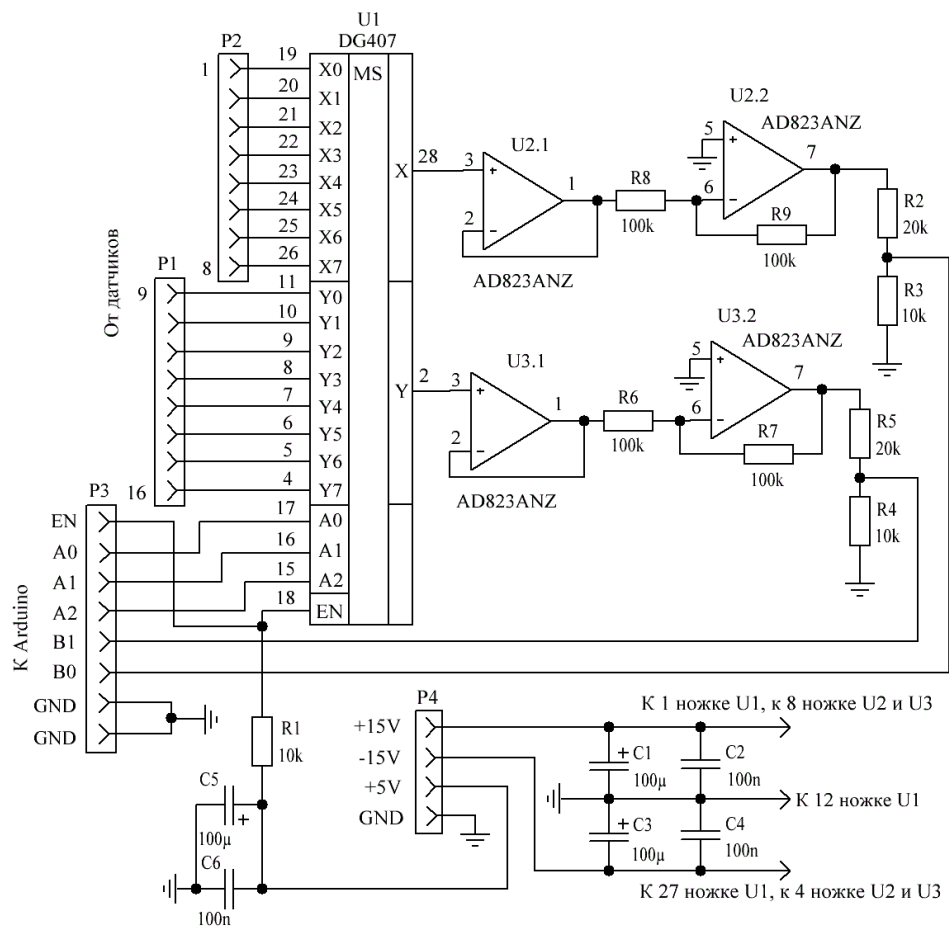


Рисунок 2.7 – Схема блока коммутации каналов

Работа измерительной системы предполагает измерение плотности тока по сечению как непрерывного, так и импульсно-периодического пучка. Если в непрерывном режиме генерации момент измерения не играет существенной роли, то в импульсно-периодическом целесообразным является введение синхронизации системы измерения с генерацией электронного пучка. Момент измерения напряжения на $R_{изм}$ синхронизован с фронтом импульса тока вспомогательного разряда с возможностью введения временной задержки соизмеримой с периодом между импульсами тока разряда. Формирователь синхроимпульсов (Рисунок 2.8)

реагирует на фронт тока разряда с помощью трансформатора тока (разъем P1), включенного в цепь источника питания разряда.

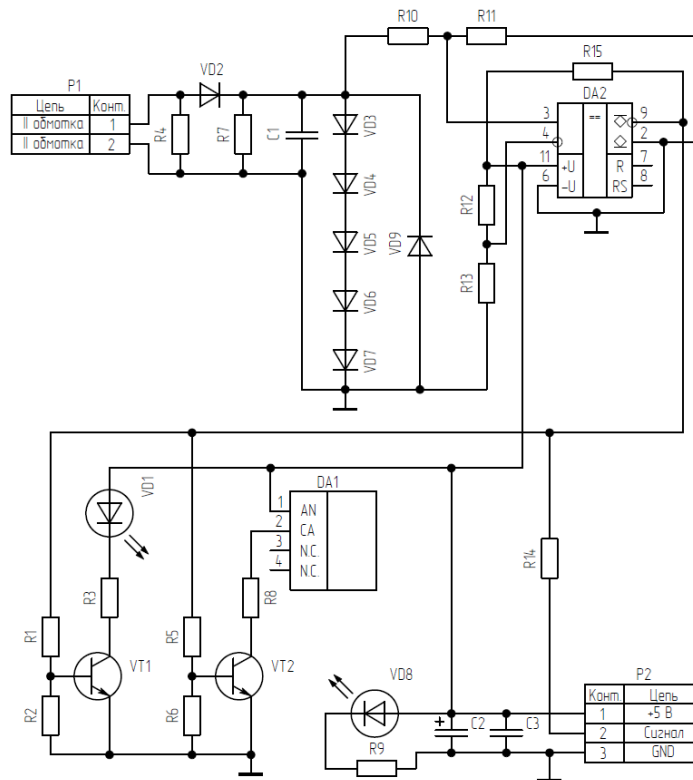


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема формирователя синхрои импульсов

При генерации электронного пучка с частотой десятки килогерц не было задачи измерять распределение для каждого импульса тока, что позволило упростить требования к системе измерения. Как и в непрерывном режиме, за один импульс тока пучка система опрашивает один коллектор, а для определения полной картины распределения происходит последовательное измерение тока на каждом коллекторе с многократным повторением цикла.

Для работы с системой измерения распределения плотности тока по сечению пучка для ПК была написана программа на языке программирования C++, позволяющая запрашивать, сохранять и визуализировать полученные данные. Внешний вид главного окна программы представлен на Рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Внешний вид главного окна программы для системы измерения распределения плотности тока электронного пучка

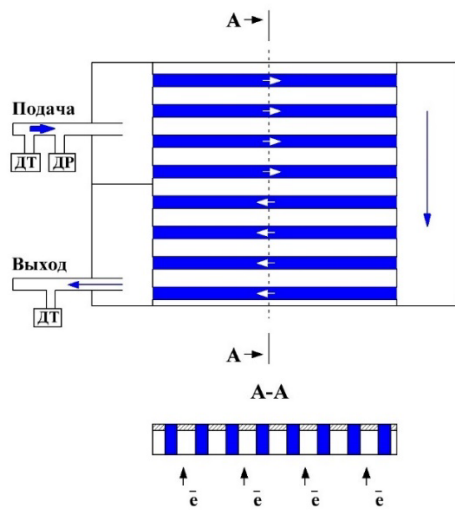
Неоднородность распределения плотности тока пучка по сечению рассчитывалась по формуле:

$$N = \pm \frac{|j_{\max} - j_{\text{ср}}|}{j_{\text{ср}}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

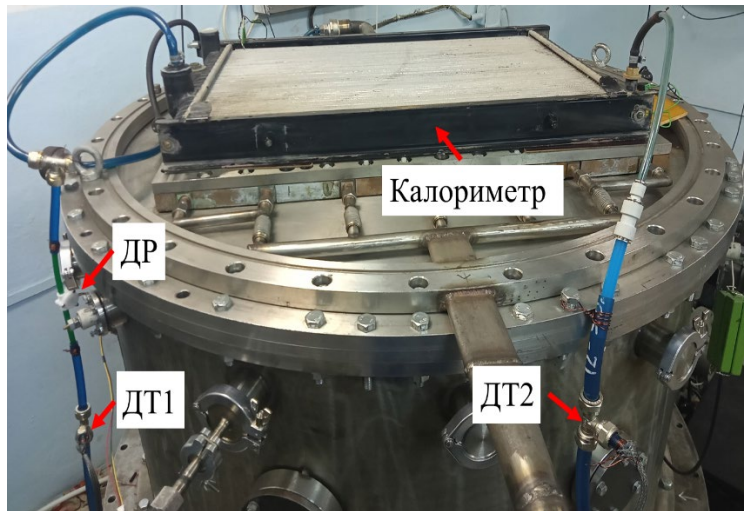
где $j_{\text{ср}}$ и j_{\max} – средняя плотность тока по всем коллекторам и максимальное отклонение плотности тока от среднего значения соответственно. В импульсно-периодическом режиме для сравнения с непрерывным рассчитывалась средняя неоднородность в течение генерации вспомогательного разряда и среднее значение в паузе между импульсами. Например, для частоты $f = 10$ кГц интервал измерений составлял 4 мкс (для 20 кГц – 2 мкс), что позволяло получить 25 измерений за период. Так для режима $f = 10$ кГц и $D = 0,4$ средняя неоднородность в течение генерации определялась по 10 измерениям, а в паузе по 15 измерениям.

2.3. Калориметрические измерения мощности электронного пучка

Для определения мощности электронного пучка, выведенного в атмосферу, разработан и изготовлен проточный водяной калориметр, перекрывающий все выводное окно ускорителя (45×65 см). Калориметр (Рисунок 2.10) представляет собой двухрядную конструкцию, в которой протекание воды осуществляется по множеству тонких металлических каналов. Алюминиевое основание калориметра толщиной 3 см перекрыто с обратной стороны от пучка металлической пластиной, что обеспечивает практически полное поглощение энергии электронного пучка в каналах калориметра, минимизируя влияния отражения от него электронов.



а



б

Рисунок 2.10 – Проточный калориметр: а – принципиальная схема; б – фотография; ДР – датчик расхода; ДТ1 – датчик измерения температуры на входе в калориметр; ДТ2 – датчик температуры на выходе их калориметра

Определение поглощенной калориметром энергии определяется по формуле [119]:

$$W = \frac{1}{e} \int_0^{t_u} E_k(t') I(t') dt' = cm(T_2 - T_1) + \Phi t \quad (2.2)$$

где e – заряд электрона, W – энергия, переносимая пучком, $E_k(t')$ – мгновенная кинетическая энергия частиц, $I(t')$ – мгновенный ток пучка, c и m – теплоемкость и масса поглотителя соответственно, T_1 и T_2 – температура поглотителя в начале и

конце измерения, Φ – тепловой поток, связанный с потерями тепла в элементы конструкции и окружающую среду, t – время измерения. В случае проточного калориметра вместо t используют массовый расход жидкости \dot{m} . В проведенных экспериментах температура калориметра была меньше комнатной температуры, поэтому вместо тепловых потерь Φ учитывался нагрев воды от окружающей среды, который составил примерно 1°C .

Измерение температуры воды на входе и выходе калориметра осуществлялось с использованием двух цифровых датчиков температуры DS18B20 в герметичном металлическом корпусе с диапазоном измерения от -55 до 125°C . Для измерения массового протока воды через калориметр использовался импульсный датчик расхода воды SEN-HZ06N с диапазоном измерения $0,25$ – 3 л/мин. Опрос датчиков осуществлялся с помощью печатной платы Arduino mega 2560 R3. Получение данных в цифровом виде позволяло выводить их на ПК, находясь в пультовой комнате, и наблюдать за изменением температуры.

2.4. Зондовые измерения параметров плазмы вспомогательного разряда

Измерение параметров плазмы вспомогательного разряда в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации осуществлялось с помощью созданной автоматизированной системы измерения. Ранее подобная система измерения использовалась для измерения параметров плазмы дугового разряда в работе [120]. Автоматизированная система измерения зондовых характеристик позволяет не только обеспечить требуемую статистическую достоверность, но и проводить измерение в нужный момент генерации, тем самым измерять параметры плазмы в разные моменты генерации разряда и наблюдать их динамику. Система измерения фиксирует мгновенное значение как тока зонда, так и напряжения смещения на нем. В качестве зонда использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра длиной 5 мм и диаметром $0,5$ мм (Рисунок 2.11). Перемещение зонда в области горения разряда осуществлялось с помощью ввода Вильсона, что позволяло определить распределение параметров плазмы.

Структурная схема системы измерения представлена на Рисунке 2.12 и состоит из трех блоков: измерительный блок, микроконтроллер и формирователь синхроимпульсов. Измерительный блок включает в себя аналого-цифровой преобразователь (АЦП), делитель напряжения для измерения напряжения смещения и шунт для измерения тока зонда. Для одновременного измерения напряжения смещения и тока зонда требуется либо один двухканальный АЦП, либо два одноканальных.

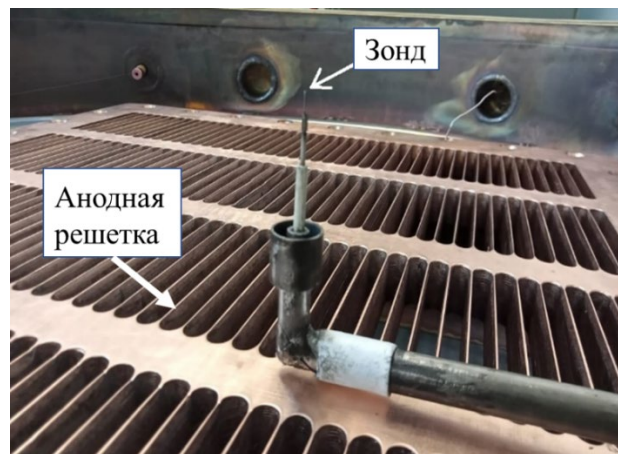


Рисунок 2.11 – Фотография цилиндрического зонда

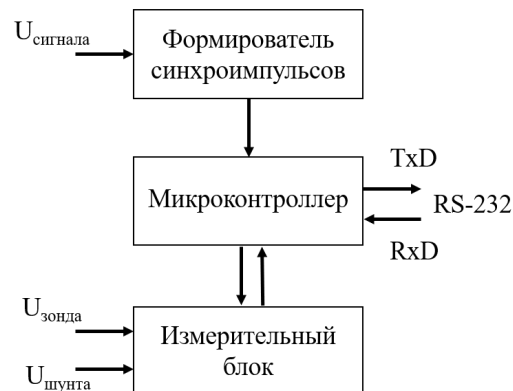


Рисунок 2.12 – Структурная схема системы измерения

Поскольку рабочий диапазон частот генерации плазмы лежит в диапазоне частот до 50 кГц, то требуется АЦП с временем преобразования, лежащим в микросекундном диапазоне, поэтому в качестве АЦП была выбрана микросхема AD7892. Для хранения и передачи данных использовался микроконтроллер ATmega2560, расположенный на отладочной плате Arduino mega 2560 R3. В

импульсно-периодическом режиме генерации плазмы возникает необходимость синхронизации начала момента измерения относительно импульсов питания разряда, поэтому отдельным блоком выступает формирователь синхроимпульсов (Рисунок 2.8). К разъему *PI* подключается трансформатор тока, который включен в цепь питания разряда.

Предложенная система измерения параметров плазмы с использованием зонда Ленгмюра позволяет фиксировать точки зондовой характеристики с периодом 20 мкс в непрерывном режиме генерации. Максимальное количество точек, хранящихся в памяти за однократное измерение, составляет 1000. При количестве измерений более 1000 система передает данные на ПК и снова проводит измерения до тех пор, пока не достигнет заданного количества измерений. После передачи данных на ПК в окне программы отображается измеренная зондовая характеристика. При импульсно-периодическом режиме генерации в системе измерения задается время задержки измерения от фронта импульса тока разряда, что позволяет измерять параметры эмиссионной плазмы в течение импульса тока разряда и проследить динамику ее параметров. За один импульс генерации система измеряет одну точку вольт-амперной характеристики. Поскольку в данном случае рассматривается генерация разряда с частотой килогерцового диапазона, то измерение нескольких тысяч точек занимает несколько минут с учетом времени передачи данных и вывода их на экран. Схема измерения зондовых характеристик представлена на Рисунке 2.13.

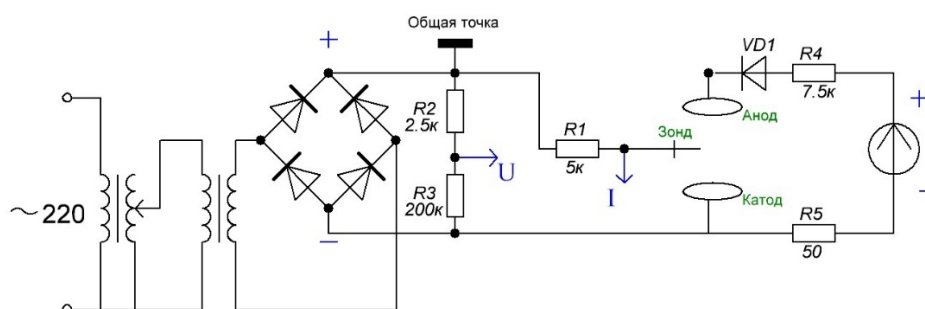


Рисунок 2.13 – Схема измерения зондовой характеристики относительно катода тлеющего разряда

Зонд подключался относительно катода вспомогательного разряда, имеющего гораздо большую площадь в сравнении с анодом, чтобы вносить минимальные искажения в генерируемую плазму. Поскольку неизвестна зарядность ионов и состав остаточного газа, то измерение параметров плазмы проводилось с использованием только электронной ветви зондовой характеристики. Электронная ветвь позволяет определить следующие локальные параметры плазмы: потенциал плазмы, температуру и концентрацию электронов. Напряжение смещения на зонд подавалось от лабораторного автотрансформатора через разделительный повышающий трансформатор. Электропитание системы измерения было гальванически отвязано от общей сети напряжения. Общей точкой, относительно которой проводилось измерение напряжения смещения и тока зонда, являлась «земля» системы измерения.

Пример полученной зондовой характеристики представлен на Рисунке 2.14а при токе разряда 120 мА и давлении гелия в вакуумной камере 3,8 Па.

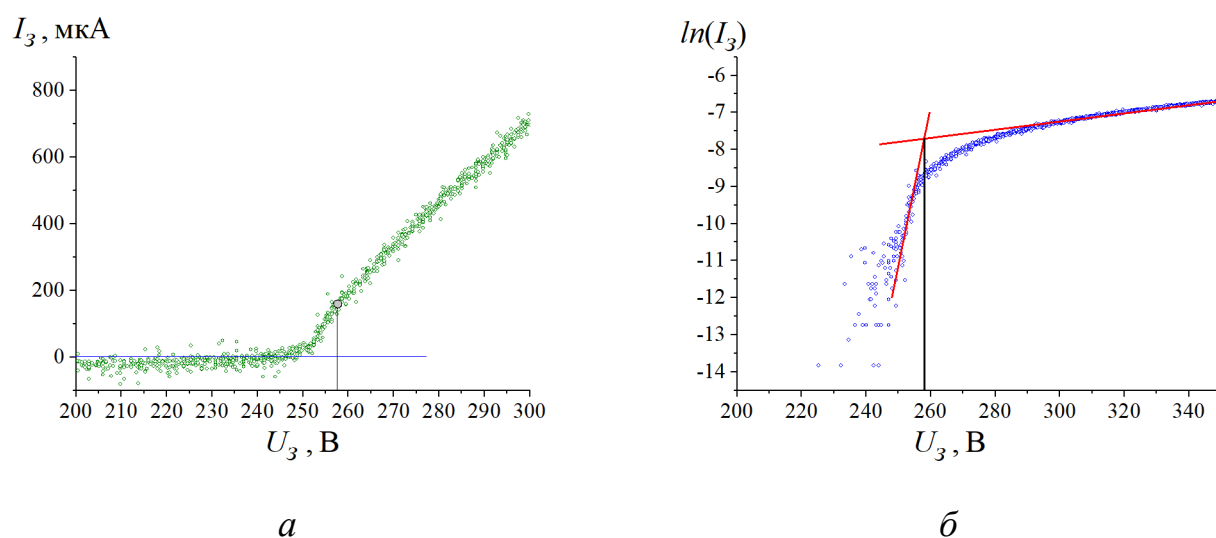


Рисунок 2.14 – Зондовые характеристики: *а* – ВАХ зонда при токе разряда 120 мА и давлении гелия 3,8 Па; *б* – логарифм тока зонда от напряжения смещения

Для определения потенциала плазмы и температуры электронов, строилась зависимость логарифма тока зонда от напряжения смещения (Рисунок 2.14б), и определялись потенциал плазмы и температура электронов. Электронный ток

насыщения определялся по зондовой характеристике в точке потенциала плазмы, который ранее определялся через полулогарифмическую зависимость тока зонда от напряжения. Логарифм электронного тока от потенциала зонда описывается прямолинейной зависимостью вплоть до точки, которая определяет потенциал плазмы. Пересечение касательной к линейному нарастанию логарифма тока и касательной к значениям в области насыщения тока соответствует потенциалу плазмы φ_{pl} тлеющего разряда. В данном случае потенциал плазмы равен 260 В, а электронный ток насыщения $I_{e,n.}=140$ мкА. Наклон прямолинейной зависимости $\ln I_3(U_3)$ отражает величину температуры электронов:

$$T_e = \frac{d(U_3)}{d(\ln I_3)} \quad (2.3)$$

Средняя скорость электронов v_e рассчитывалась по формуле:

$$v_e = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi \cdot m_e}} \quad (2.4)$$

Зная электронный ток насыщения $I_{n.e.}$, скорость электронов v_e и площадь зонда S_3 , определялась концентрация электронов:

$$n_e = \frac{4I_{n.e.}}{ev_e S_3} \quad (2.5)$$

2.5. Моделирование ионно-электронной оптической системы

Для формирования оптимальной ионно-электронной оптической системы целесообразно проводить численное моделирование, отражающее изменения в траекториях заряженных частиц при изменении параметров эмиссионной плазмы. Формирование ионного и электронного пучков в ускоряющей промежулке и их потери на ребрах анодной и опорной решетки могут быть рассмотрены с использованием метода крупных частиц (PIC коды КАРАТ, хооріс, ООРІС pro, программное обеспечение для траекторного анализа и т.д.), которые позволяют исследовать самосогласованную динамику заряженных частиц в собственных и внешних полях, процессы ионизации и ионно-электронной эмиссии. Следует отметить, что определение характера фокусировки ионного и электронного пучков

в одиночной щели (даже произвольной осесимметричной формы) не представляет серьёзной проблемы, а программы для траекторного анализа были доступны ещё десятилетия назад [121]. В нашем случае, мы имеем дело с многоапертурной системой, в которой необходимо отслеживать одновременно ионный и электронный пучки, свойства которых сильно зависят от управляющих параметров и положения плазменной границы. В таком случае, часть пучка может попадать в соседние ячейки анодной и соответственно опорной решётки. Поэтому требования к масштабам расчётной области и точности вычислений существенно выше, чем в «классическом» моделировании по траекторному анализу в приближении одной щели.

Моделирование проводилось с использованием коммерческой программы KOBRA3-IMP [122]. Этот код хорошо известен как инструмент для трехмерного моделирования систем генерации заряженных частиц. Для моделирования процесса генерации ионного пучка из эмиссионной плазмы в программу включен самосогласованный алгоритм расчета плазменной границы.

Для моделирования динамики частиц использовался open-source код `хоорис` и его коммерческая версия код `ООРІС Pro` [123]. Эти программные продукты – РС + Монте-Карло коды хорошо известны как эффективные инструменты для расчета динамики частиц во времени. В основном используемый код `ООРІС Pro` позволил смоделировать эмиссию и транспортировку электронов и ионов, определить потери потоков частиц на решетки.

Выводы:

1. Создан макет широкоапертурного ускорителя электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$ и энергией до 150 кэВ. Используемый источник электропитания вспомогательного разряда позволяет генерировать разряд как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с регулировкой коэффициента заполнения импульса при сохранении среднего значения тока, что

позволяет в широком диапазоне изменять как параметры разряда, так и параметры плазменного эмиттера ионов ускорителя.

2. Созданы автоматизированные системы измерения на основе современной элементной базы, позволяющие определять параметры эмиссионной плазмы вспомогательного разряда и распределения плотности тока пучка, выведенного в атмосферу, как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме вспомогательного разряда.

3. Выбраны программные продукты, включающие в себя PIC+Монте Карло коды, которые позволят смоделировать ионно-электронную оптическую систему, используя полученные параметры эмиссионной плазмы, и сделать выводы по эффективности генерации электронного пучка.

ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Эмиссионная плазма, создаваемая вспомогательным разрядом, в ускорителях с несамостоятельным ВТР определяет плотность тока и длительность электронного пучка. В роли вспомогательного разряда используют: тлеющий разряд с полым катодом [103, 104], тонкопроволочный разряд орбитронного типа [5, 109], дуговой разряд [26, 97], разряд с термокатодом [95, 96], магнетронный разряд [124]. Также в качестве эмиссионной плазмы может использоваться пучковая плазма, созданная отдельными ленточными электронными пучками [100, 101]. В импульсно-периодическом режиме с частотой следования десятки килогерц каждый новый импульс тока начинается в условиях остаточной плазмы от прошлого импульса, оказывая влияние как на параметры эмиссионной плазмы и ее распределения, так и на генерируемый электронный пучок.

В данной работе вместо непрерывного орбитронного разряда предлагается использование импульсно-периодического режима с частотой следования импульсов единицы и десятки килогерц при коэффициенте заполнения импульса не менее 0,2. В главе, посвященной генерации эмиссионной плазмы, производится сравнение непрерывного и импульсно-периодического режима по параметрам генерируемой плазмы, однородности и стабильности горения разряда с двумя проволочными анодами.

3.1. Непрерывный режим генерации вспомогательного разряда

Как было отмечено в Главе 2, генерация эмиссионной плазмы осуществляется самостоятельным тлеющим разрядом с полым цилиндрическим катодом и двумя тонкопроволочными анодами. Данный тип разряда встречается в литературе под названием: орбитронный разряд [106–108]. Такой тип разряда отличается простотой электродной системы и находит применение в качестве плазменного эмиттера ионов для ускорителей электронов на основе несамостоятельного ВТР [5, 36]. Конфигурация электродной системы вспомогательного разряда вместе с

размещенным зондом представлена на Рисунке 3.1. Объем области генерации плазмы тлеющего разряда составляет $\sim 0,1 \text{ м}^3$.

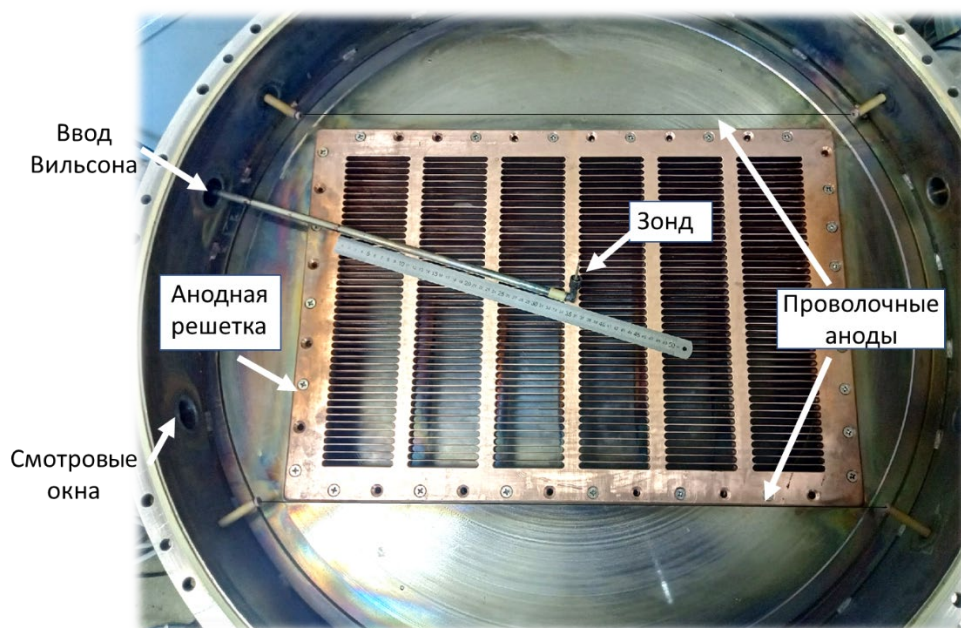


Рисунок 3.1 – Фотография электродной системы самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и тонкопроволочными анодами

Для тлеющего разряда орбитронного типа характерно значительное превышение площади катода S_c над площадью анода S_a ($S_a \ll S_c$), что обеспечивает осцилляции электронов с длиной свободного пробега, превышающей характерные размеры вакуумной камеры, и, в итоге, эффективную ионизацию рабочего газа электронным ударом [106, 125]. При этом площадь анода S_a должна быть достаточной для отведения тепловой нагрузки, определяемой плотностью электронного тока в соответствии с отношением масс электрона m_e и иона рабочего газа M_i : $(m_e/M_i)^{1/2}$ [126, 127]. В нашем случае $S_a/S_c \approx 8 \cdot 10^{-4}$, что отличается более чем на порядок от отношения масс для атомарного гелия $(m_e/M_i)^{1/2} \approx 11 \cdot 10^{-3}$.

Поскольку напряжение разряда измерялось на одном проволочном аноде, а сравнение вольт-амперных характеристик (ВАХ) для разных режимов генерации (включая импульсно-периодический) происходило по средним значениям тока, то представленные далее зависимости построены относительно среднего тока I_{dcp} в виде:

$$I_{dcp} = NI_m D \quad (3.1)$$

где I_m – амплитуда тока разряда на одном проволочном аноде, D – коэффициент заполнения импульса, N – количество проволочных анодов (в данном случае $N = 2$). Для непрерывного режима I_{dcp} является установленным значением постоянного тока нагрузки источника электропитания разряда.

Полученные ВАХ (Рисунок 3.2) являются растущими, а при повышении давления рабочего газа происходит снижение напряжения горения разряда, связанное с увеличением частоты ионизации рабочего газа [128].

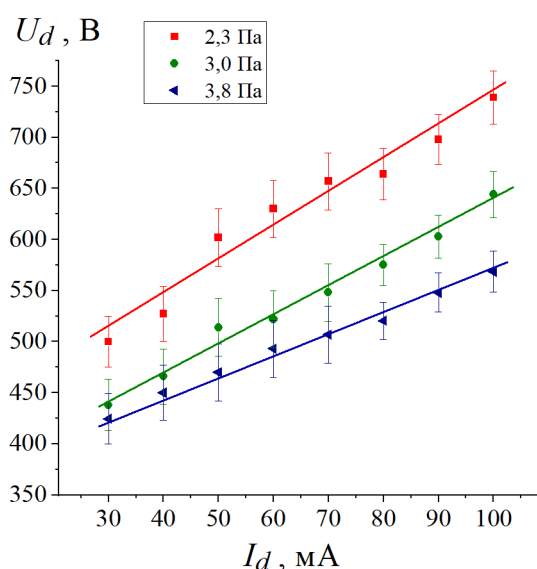


Рисунок 3.2 – ВАХ разряда в непрерывном режиме при различных значениях давления гелия

3.2. Неоднородность горения вспомогательного разряда на двух проволочных анодах

Разряд с полым катодом характеризуется осцилляцией быстрых электронов, которые многократно отражаются в области катодного падения потенциала. В таком типе разряда, когда длина свободного пробега электронов превышает характерный размер катодной полости, наблюдается резкое понижение напряжения горения разряда и увеличение его тока. В литературе такое поведение

характеристик разряда за счет электростатического удержания электронов в катодной полости называют эффектом полого катода [62, 125].

В нашем случае ток разряда стабилизировался, а однородность горения разряда оценивалась по измеренным ВАХ и фотографиям свечения плазмы вспомогательного разряда. Вначале была подключена одна проволока и постепенно повышался ток разряда (Рисунок 3.3). Видно, как свечение плазмы расширяется и в диапазоне тока 30–35 мА переходит в центр проволочного анода. Фотографии свечения были сделаны через смотровые окна, часть из которых видна на Рисунке 3.1.

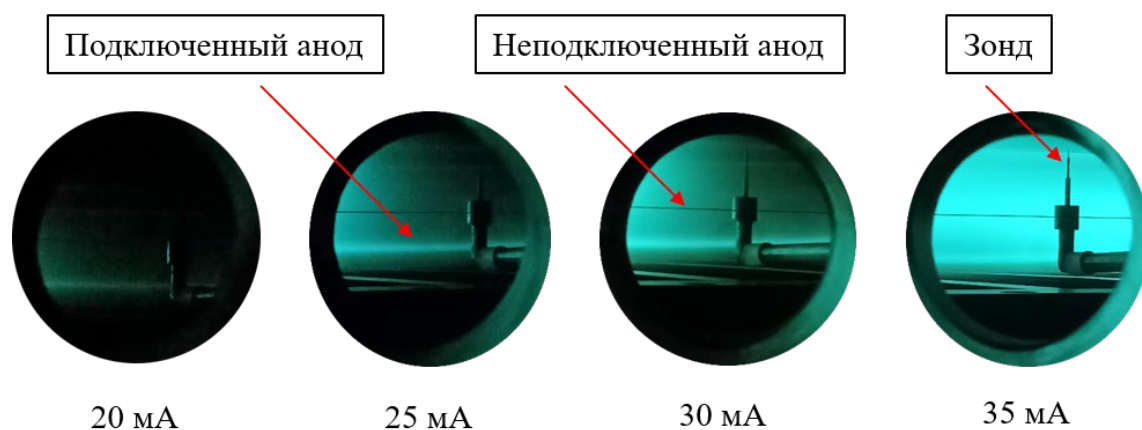


Рисунок 3.3 – Фотографии свечения плазмы вспомогательного разряда с одним проволочным анодом и разным токе разряда ($p = 3,8$ Па)

Измеренная ВАХ разряда с одним проволочным анодом (Рисунок 3.4) имеет снижение напряжения разряда на ≈ 50 В после непродолжительной растущей зависимости, что характерно при проявлении эффекта полого катода. С повышением давления наблюдается уменьшение напряжения разряда при меньшем токе.

Сравним ВАХ в непрерывном режиме для двух подключенных анодов, представленных на Рисунке 3.2 с удвоенным током с одного проволочного анода. На Рисунке 3.5 представлена полученная зависимость. На токах менее 70 мА напряжение горения разряда для одиночного проволочного анода выше, чем с двумя анодами при том же полном токе, а при повышении тока ВАХ начинают

совпадать в пределах небольшой погрешности. Из этого можно сделать вывод, что при малых токах разряд организуется таким образом, что плазма вспомогательного разряда формируется независимо вблизи каждого проволочного анода, а при повышении тока происходит перестроение разряда с формированием единой плазменной структуры в центральной части цилиндрического полого катода как для одного проволочного анода с удвоенным током, так и для двух проволочных анодов с аналогичным значением полного тока.

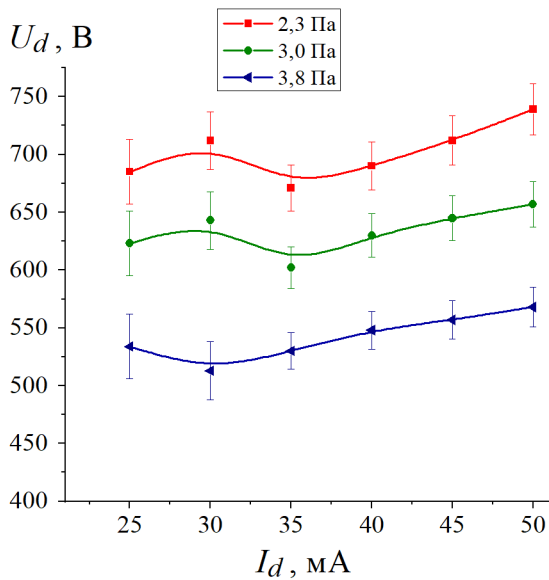


Рисунок 3.4 – ВАХ разряда с одним проволочным анодом в непрерывном режиме в зависимости от давления рабочего газа гелия

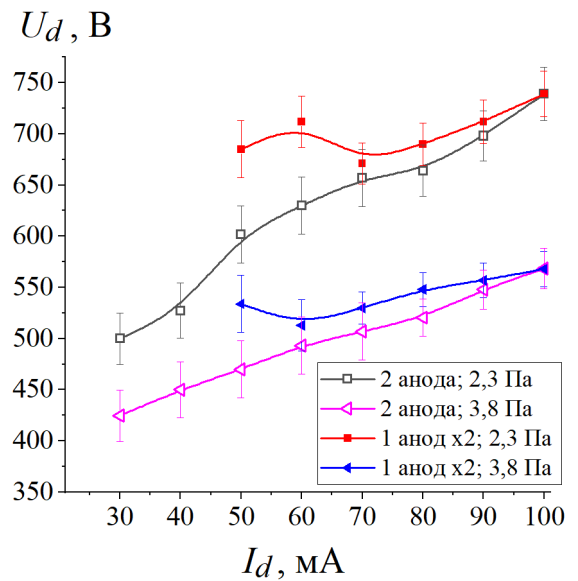


Рисунок 3.5 – Сравнение ВАХ разряда в непрерывном режиме при удвоении тока с одного проволочного анода

При включении двух проволочных анодов сохранялся общий ток разряда, и измерялось напряжение на каждом аноде отдельно. Из Рисунка 3.6 видно, как свечение плазмы занимает бóльший объем при одинаковых значениях тока разряда. ВАХ на двух анодах в зависимости от давления рабочего газа представлены на Рисунке 3.7. Разница напряжений на анодах обусловлена двумя причинами: смещением напуска рабочего газа ближе к одной из проволок (анод 1), а также наличием в разрядной области зонда, шток которого проходил вблизи анода 2 (зонд и его шток находились под плавающим потенциалом во время измерений).

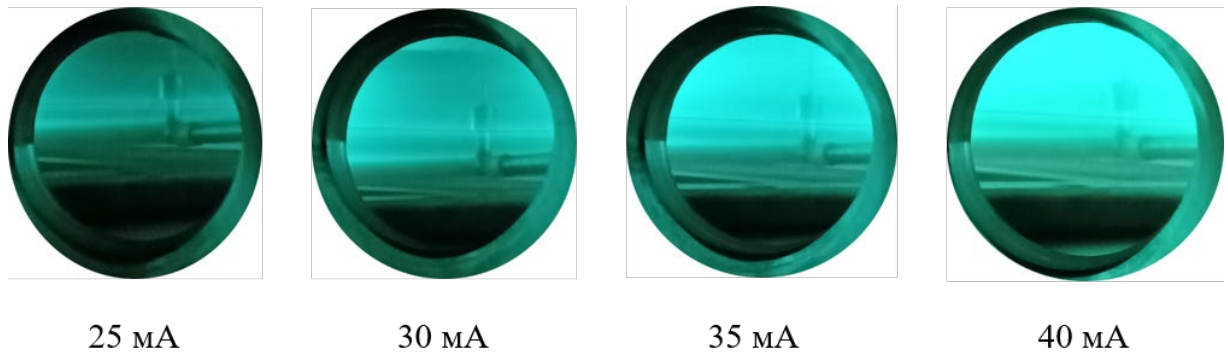


Рисунок 3.6 – Фотографии свечения плазмы вспомогательного разряда с двумя проволочными анодами при разном токе разряда ($p = 3,8$ Па)

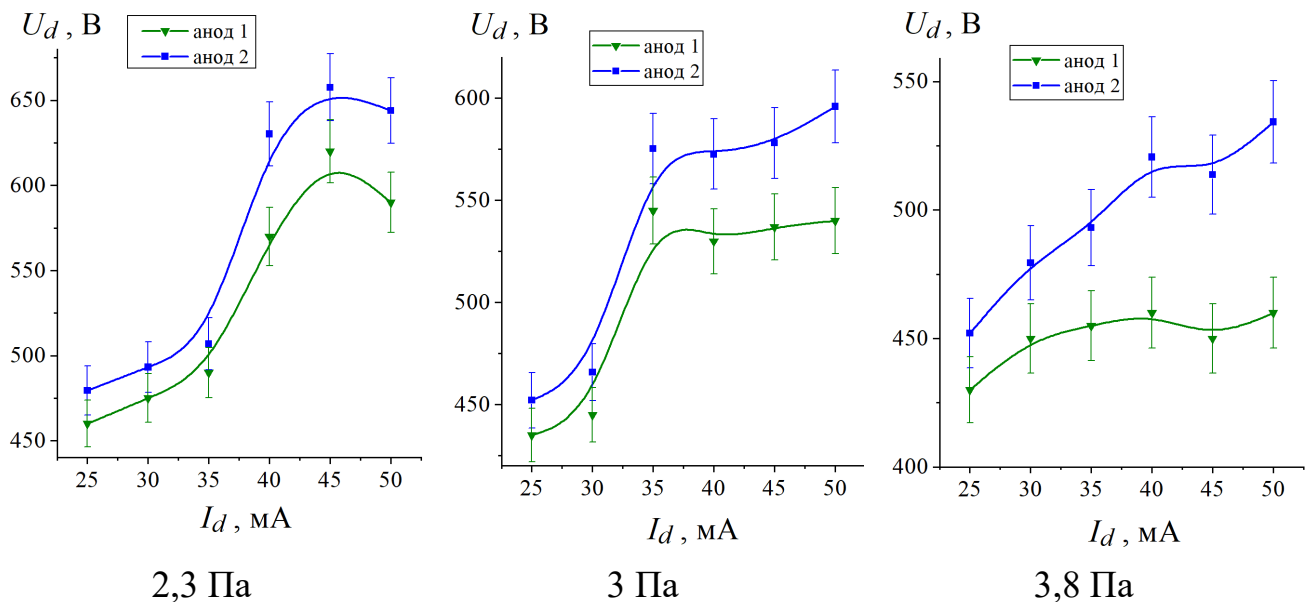


Рисунок 3.7 – ВАХ разряда с двумя проволочными анодами в непрерывном режиме при разном давлении гелия

Оба анода имеют схожий вид вольт-амперной характеристики. Резкое повышение напряжения в диапазоне токов 30–40 мА может быть связано с переключением разряда в центральную область цилиндрического полого катода и, как следствие, изменением распределения концентрации плазмы. При малых токах разряд локализуется возле проволочных анодов, когда наработка плазмы в большей степени осуществляется осцилляциями электронов вокруг проволочного анода малой площади (орбитронный разряд), а не отражением от ближайших стенок полого катода. С повышением тока разряда и концентрации плазмы разряд

преимущественно горит в центральной части цилиндрической вакуумной камеры и эффект полого катода превалирует над свойством орбитронного разряда по наработке плазмы, смещая максимум ее концентрации к оси системы. Повышение рабочего давления приводит к снижению напряжения горения и к достижению эффекта полого катода при меньших значениях тока разряда. Из Рисунка 3.7 видно, что с ростом тока разряда увеличивается разница в напряжениях горения разряда относительно проволочных анодов, которая тем выше, чем выше давление рабочего газа. Вероятнее всего, данное явление также связано с локальным расположением напуска рабочего газа.

3.3. Измерение параметров плазмы в непрерывном режиме

После определения ВАХ разряда проводились измерения параметров плазмы вспомогательного разряда в непрерывном режиме. В разделе 2.4 описана методика определения температуры электронов, концентрации и потенциала плазмы. Измерение параметров плазмы вспомогательного разряда в зависимости от тока разряда (Рисунок 3.8а) и давления рабочего газа (Рисунок 3.8б) проводилось при расположении зонда в центре плазменного эмиттера. На графиках показаны точки, соответствующие потенциалу плазмы, найденному из логарифмической зависимости тока зонда согласно описанной методике (раздел 2.4). Повышение тока разряда приводит к росту концентрации плазмы в рассматриваемом диапазоне давления рабочего газа (Таблица 3.1). Так при $p=3$ Па увеличение тока I_d с 60 мА до 120 мА приводит к росту концентрации плазмы n_e с $1,3 \cdot 10^8$ см⁻³ до $3,1 \cdot 10^8$ см⁻³. Поскольку при данных токах тлеющий разряд является аномальным, то повышение плотности тока разряда происходит за счет повышения напряжения, а именно прикатодного падения φ_{pl} , которое позволяет ионам выбить с поверхности катода больше вторичных электронов. Повышение давления с $p = 2,3$ Па до $p = 3,8$ Па приводит к росту концентрации плазмы (на десятки процентов) и снижению температуры электронов за счет увеличения частоты столкновений электронов с атомами газа.

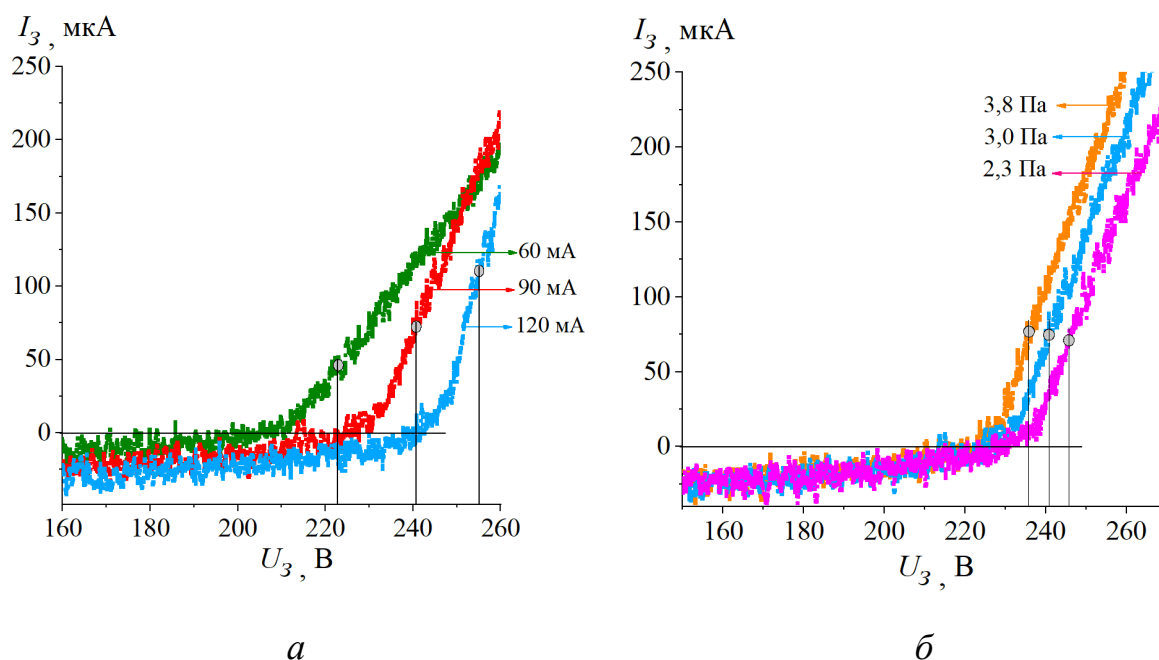


Рисунок 3.8 – Зондовые характеристики в непрерывном режиме горения разряда: *a* – при разной амплитуде тока разряда; *б* – при разном давлении гелия

Таблица 3.1 – Параметры плазмы вспомогательного разряда в непрерывном режиме

p (Па)	60 мА			90 мА			120 мА		
	$n_e \times 10^8$ (см^{-3})	T_e (эВ)	φ_{pl} (В)	$n_e \times 10^8$ (см^{-3})	T_e (эВ)	φ_{pl} (В)	$n_e \times 10^8$ (см^{-3})	T_e (эВ)	φ_{pl} (В)
3,8	1,8	2,1	220	2,5	2	235	3,3	2,1	240
3	1,3	2,4	225	2,3	2,2	240	3,1	2,2	255
2,3	0,9	3,1	230	2	2,8	245	3	2,4	260

При этом разница в концентрациях плазмы при разном давлении газа снижается с ростом тока разряда. Несущественное уменьшение потенциала плазмы с ростом давления согласуется с повышением концентрации заряженных частиц, поскольку для сохранения баланса токов теперь требуется меньшая энергия частиц.

Если принять, что плазма эквипотенциальна, то, зная напряжение горения разряда и потенциал плазмы относительно катода, можно вычислить потенциал

плазмы относительно анода. На Рисунке 3.9а представлены зависимости потенциала плазмы относительно катода и анода от напряжения вспомогательного разряда при разной величине его тока. На Рисунке 3.9б представлено схематическое распределение потенциала в орбитронном разряде.

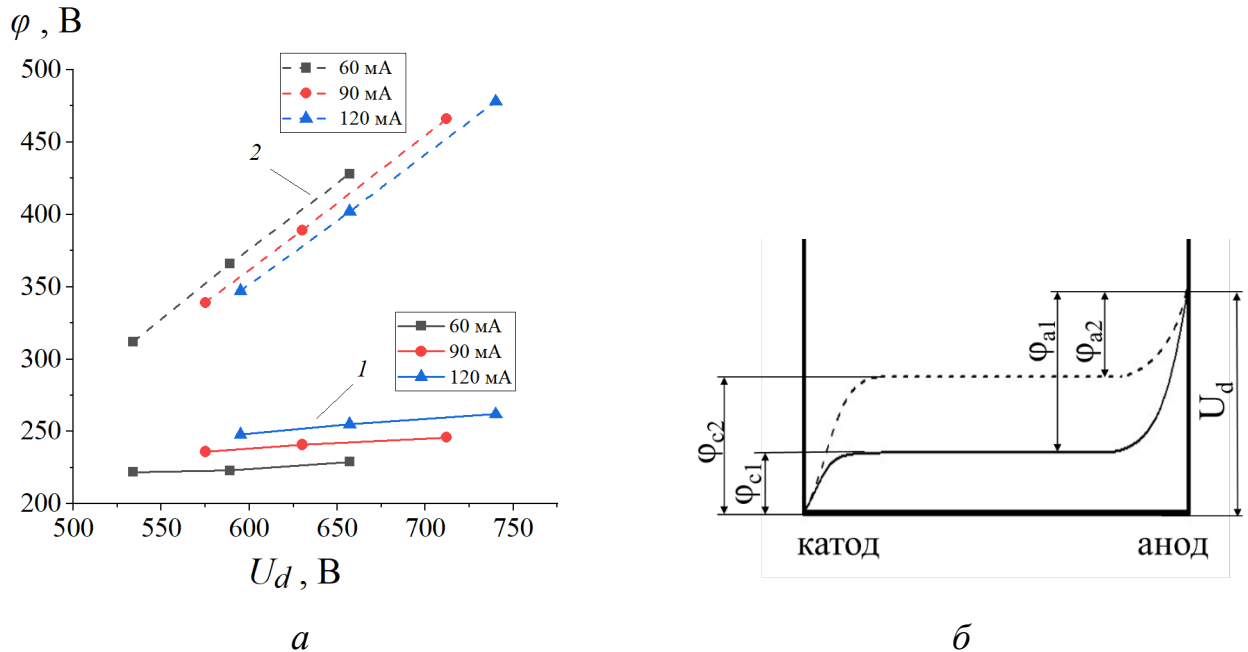


Рисунок 3.9 – Потенциал плазмы вспомогательного разряда: *а* – в зависимости от напряжения разряда; *1* – относительно катода; *2* – относительно анода; *б* – схематическое распределение потенциалов разряда

Ток разряда стабилизировался источником питания, а изменение напряжения происходило за счет варьирования давления рабочего газа. Из Рисунка 3.9а видно, что анодное падение потенциала превышает катодное, при этом с понижением давления и повышением напряжения разряда рост анодного падения существенно выше катодного. Распределение потенциалов в газоразрядной системе определяется отношением площадей электродов, а также отношением масс ионов рабочего газа и электронов [127]. Если рассматривать потенциалы относительно катода и анода разряда (Рисунок 3.9б) при одинаковом напряжении горения разряда, то с повышением тока разряда катодное падение увеличивается $\varphi_{c2} > \varphi_{c1}$, а анодное соответствующим образом снижается $\varphi_{a2} < \varphi_{a1}$, что также свидетельствует о запуске эффекта полого катода и расширением плазмы к оси системы [129].

При подаче ускоряющего напряжения на высоковольтный катод несамостоятельного ВТР происходит снижение напряжения горения вспомогательного разряда на 40–50 В, при этом данная величина не зависит от прикладываемого ускоряющего напряжения в диапазоне $U_0 = (10–150)$ кВ (Рисунок 3.10). Снижение напряжения вспомогательного разряда, по-видимому, связано с инжекцией электронов несамостоятельного ВТР из ускоряющего промежутка в область плазменного эмиттера. А поскольку анодная решетка, через которую ионы попадают в ускоряющий промежуток, находится под потенциалом катода вспомогательного разряда, и электрическое поле ускоряющего промежутка не проникает в пространство плазменного эмиттера, то зондовые характеристики не зависят от величины ускоряющего напряжения в рассматриваемом диапазоне.

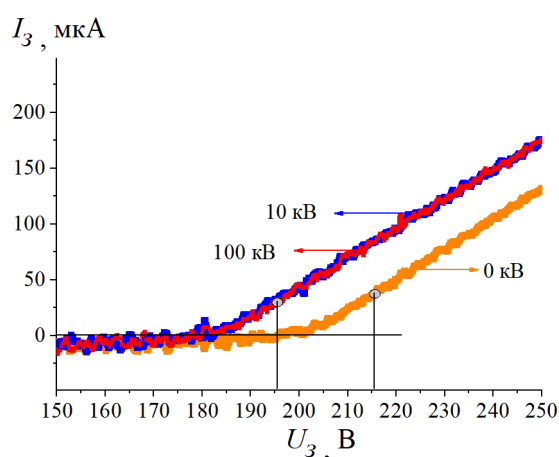


Рисунок 3.10 – Зондовые характеристики в непрерывном режиме генерации вспомогательного разряда при различном ускоряющем напряжении

Таким образом подача ускоряющего напряжения в непрерывном режиме генерации вспомогательного разряда приводит к уменьшению напряжения горения разряда на 40–50 В и снижению прикатодного падения потенциала на величину ~ 20 В (Таблица 3.2). Уменьшение прикатодного падения потенциала приводит к снижению энергии электронов, поступающих в пространство плазменного эмиттера, и уменьшению температуры плазменных электронов. Концентрация плазмы при этом незначительно уменьшается за счет изменения распределения концентрации плазмы в области горения разряда, что продемонстрировано далее.

Таблица 3.2 – Параметры плазмы при наличии ускоряющего напряжения, постоянном токе разряда $I_d = 60$ мА и давлении гелия $p = 2,7$ Па

U_0 , кВ	U_d , В	φ_{pl} , В	T_e , эВ	$n_e \times 10^8$, см ⁻³
0	595	215	4,2	1
100	540	200	3,6	0,9

Перемещение зонда в направлениях плазменного эмиттера близких к диаметральному осуществлялось с помощью ввода Вильсона (Рисунок 3.11).

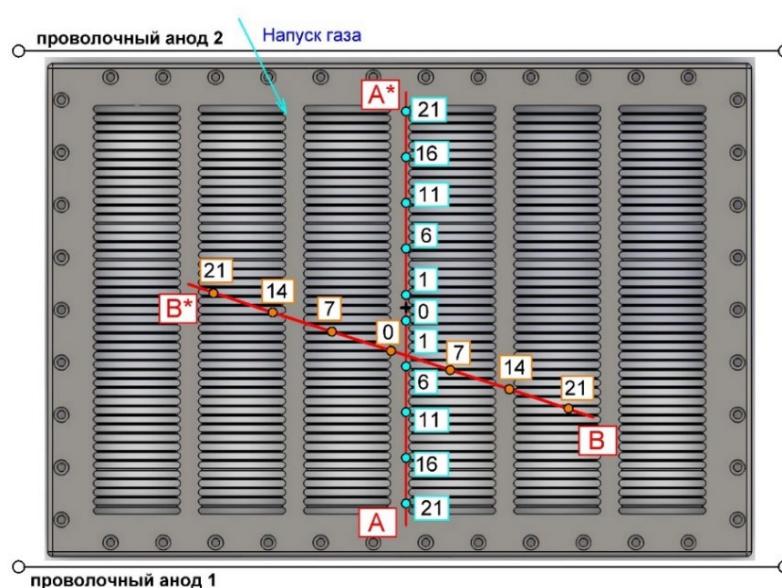


Рисунок 3.11 – Схема перемещения зонда и измерения параметров плазмы в указанных точках; цифры соответствуют расстоянию в сантиметрах до центра – нулевой точки

Полученное распределение концентрации электронов при токах разряда $I_d = 50$ и $I_d = 75$ мА, давлении гелия $p = 3$ Па приведено на Рисунке 3.12. Видно, что наибольшая концентрация плазмы находится в центральной части плазменного эмиттера, что объясняется проявлением эффекта полого катода и наибольшей частотой ионизационных взаимодействий в центральной части цилиндрического полого катода. С приближением к анодной проволоке в поперечном направлении (сечение А–А*) концентрация n_e снижается с $4,2 \cdot 10^8$ см⁻³ до $0,3 \cdot 10^8$ см⁻³ для

$I_d = 50$ мА и с $4,6 \cdot 10^8$ см⁻³ до $0,5 \cdot 10^8$ см⁻³ для $I_d = 75$ мА. Повышение тока разряда способствует увеличению объема, занимаемого плазмой, однако, полученные распределения свидетельствуют о высокой неоднородности эмиссионной плазмы в непрерывном режиме генерации тлеющего разряда при токах $I_d = 50$ мА и 75 мА.

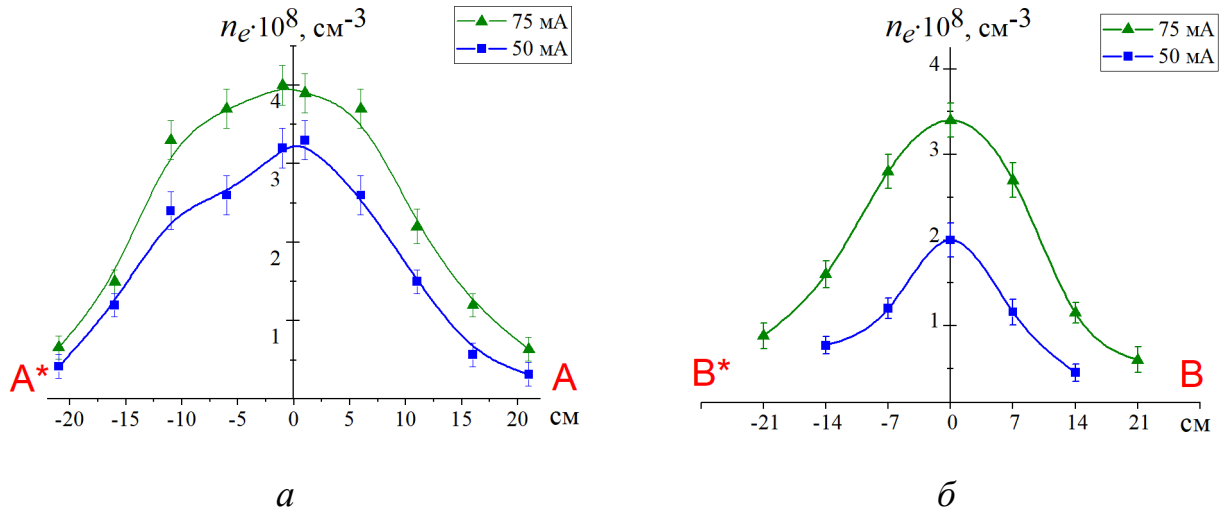


Рисунок 3.12 – Распределение концентрации электронов в непрерывном режиме: *a* – для сечения А-А*; *б* – для сечения В-В*

Для измерения зондовых характеристик при генерации электронного пучка (подаче ускоряющего напряжения) под зонд и его шток на анодную решетку укладывалась фольга из нержавеющей стали шириной 10 см по сечению 0 – В* (Рисунок 3.13), чтобы ограничить попадание ускоренных электронов на зонд. При генерации электронного пучка происходит изменение распределения концентрации плазмы в сторону снижения неоднородности, как показано на Рисунке 3.14. Инжекция ускоренных электронов способствует улучшению условий генерации плазмы на периферии анодной решетки, что в итоге приводит к увеличению концентрации плазмы в этой области и снижению неоднородности ее распределения.

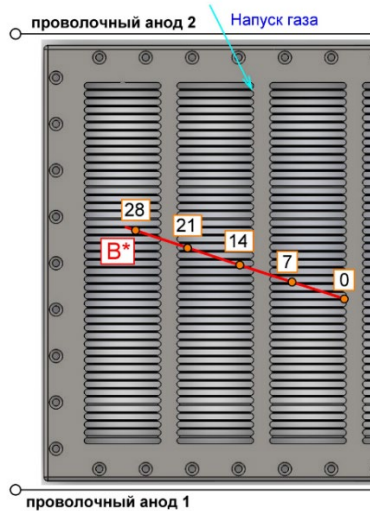


Рисунок 3.13 – Схема перемещения зонда для измерения распределения концентрации плазмы

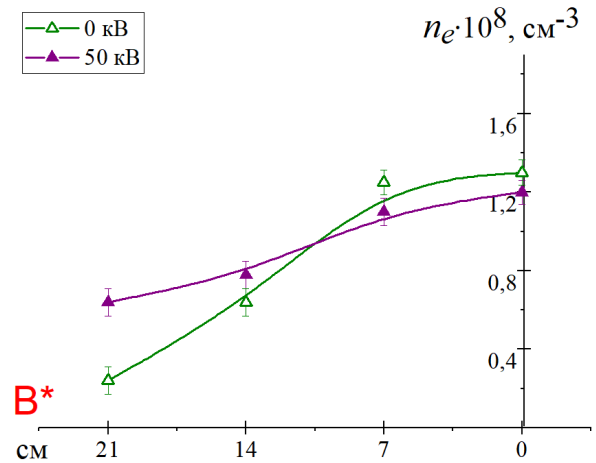


Рисунок 3.14 – Распределение концентрации плазмы в отсутствие и при генерации электронного пучка; условия генерации:

$$I_d = 60 \text{ мА}, p = 2,7 \text{ Па}$$

После измерения потенциала плазмы относительно катода, концентрации и температуры электронов становится возможным оценить эмиссионную способность плазменного эмиттера. Для этого воспользуемся формулой Бома для плотности ионного тока из плазмы [126]:

$$j_i = 0,4en \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \quad (7)$$

Принимая значения концентрации плазмы $n = 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, температуры электронов $T_e = 3 \text{ эВ}$, массу ионов гелия $M_i = 6,65 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, получаем плотность ионного тока $j_i = 15 \text{ мкА/см}^2$. Зная площадь анодной решетки ($45 \times 65 \text{ см}^2$) и ее прозрачность (68 %), можно оценить ток ионов, который поступает с границы эмиссионной плазмы в щели анодной решетки: $I_a = 0,68 \cdot S_a \cdot j_i \approx 30 \text{ мА}$. Если принять, что весь ток ионов, поступающий с границы плазмы вспомогательного разряда в щели анодной решетки, протекает в ускоряющем промежутке, то ток вторичных электронов с поверхности высоковольтного катода составляет $I_{e\gamma} \approx 240 \text{ мА}$ при

коэффициенте вторичной эмиссии $\gamma = 8$ для напряжения $U_0 = 150$ кВ. Тогда суммарный ток в ускоряющем промежутке при данном ускоряющем напряжении должен составить $I_0 \approx 270$ мА. Однако в эксперименте такой величины не наблюдается, а ток в ускоряющем промежутке составляет $I_0 \approx 60$ мА. Различие в 4,5 раза, возможно, связано со следующими причинами:

1) Концентрация плазмы, как получено из зондовых измерений, распределена неравномерно в области горения разряда. Более того, в крайних точках сечения В – В* дальше 21 см от центра (Рисунок 3.13) не удалось измерить параметры плазмы ввиду малого тока на зонд и значительной погрешности, что в итоге приводит к ошибке при принятом среднем значении концентрации $n = 2 \cdot 10^8$ см⁻³ по всей площади анодной решетки.

2) Если предположить, что большая часть тока разряда является ионной компонентой и оценить ее плотность тока как отношение тока разряда I_d ко всей площади полого катода S_c при учете приэлектродного слоя, то получается $j_i \approx 3$ мкА/см², что в 5 раз меньше плотности тока по формуле Бома. Вероятнее всего, площадь катода, участвующая в протекании тока разряда, существенно меньше.

3) Величина тока ионов, поступающих в ускоряющий промежуток, должна быть меньше, чем взятый в расчетах ток ионов, поступающих с границы плазмы в щели анодной решетки, поскольку часть ионного потока попадает на боковые стенки ребер анодной решетки, что обусловлено существенной толщиной решетки, составляющей 24 мм.

3.4. Импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда

Из представленных в прошлом параграфе результатов измерений видно, что непрерывный режим генерации сопровождается высокой неоднородностью распределения плазмы вспомогательного разряда. При этом проявляется влияние расположения напуска рабочего газа. Управление амплитудой тока разряда ограничено, с одной стороны, малой концентрацией плазмы и горением разряда

отдельно на каждом проволочном аноде. С другой стороны, превышение амплитуды тока более 100 мА приводит к нагреву анодов и их провисанию, что отрицательно сказывается как на ресурсе самих анодов, так и на стабильности горения разряда.

Для снижения влияния описанных выше факторов и расширения диапазона параметров разряда было предложено перейти в импульсно-периодический режим его генерации. Предлагаемый режим характеризуется частотой следования импульсов $f = 1\text{--}70$ кГц, управлением амплитудой и длительностью импульса путем изменения коэффициента заполнения импульсов D от 0,2 до 0,8 при стабилизации среднего тока разряда [113, 114]. Изменение частоты следования импульсов позволяет управлять длительностью импульса тока разряда и паузой между импульсами, которая в случае рассматриваемой высокочастотной генерации разряда находится в диапазоне $t_p = 5\text{--}800$ мкс. Путем уменьшения коэффициента заполнения импульса при стабилизации среднего значения тока разряда происходит повышение его амплитуды (Рисунок 3.15), способное увеличить концентрацию эмиссионной плазмы и изменить условия поступления ионов в ускоряющий промежуток и ионно-электронную оптику ускорителя в целом. Ранее подобная регулировка, но при меньшей частоте следования импульсов была продемонстрирована при использовании источника электронов с сеточным плазменным катодом [130].

Важно отметить, что импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда при сохранении среднего значения тока позволяет снизить тепловую нагрузку на тонкопроволочные аноды с возможностью достижения большей амплитуды тока разряда в отличие от непрерывного режима генерации, в котором может наблюдаться перегрев и выход из строя анодных проволок при превышении тока разряда более сотен миллиампер. Характерные осциллограммы и ВАХ разряда в непрерывном ($D = 1$) и импульсно-периодическом режимах генерации для разных значений коэффициента заполнения импульсов D при стабилизации среднего тока представлены на Рисунке 3.16 и Рисунке 3.17 соответственно.

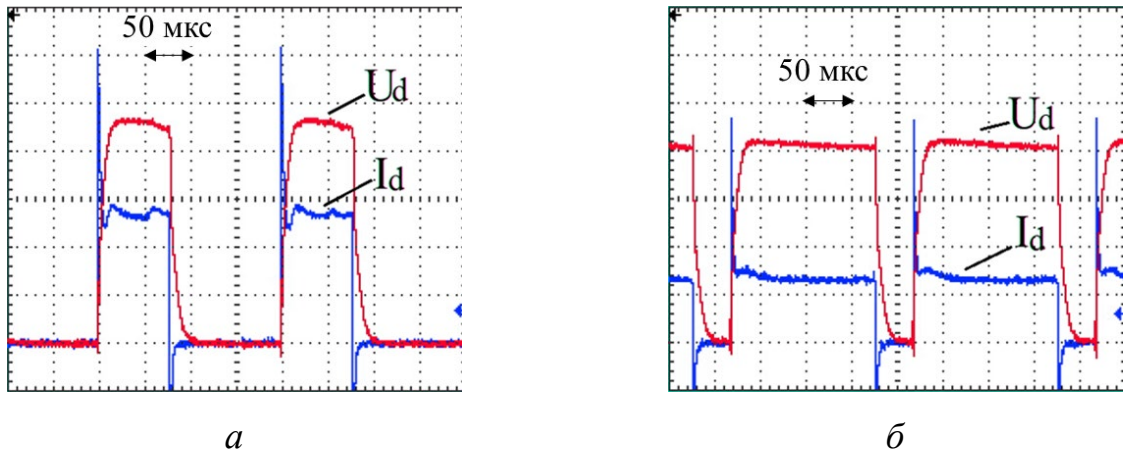


Рисунок 3.15 – Осциллограммы тока I_d (50 мА/дел) и напряжения разряда U_d (140 В/дел) в импульсно-периодическом режиме: *a* – при $D = 0,4$; *б* – при $D = 0,8$; условия генерации разряда: $f = 5$ кГц; $I_{dcp} = 50$ мА

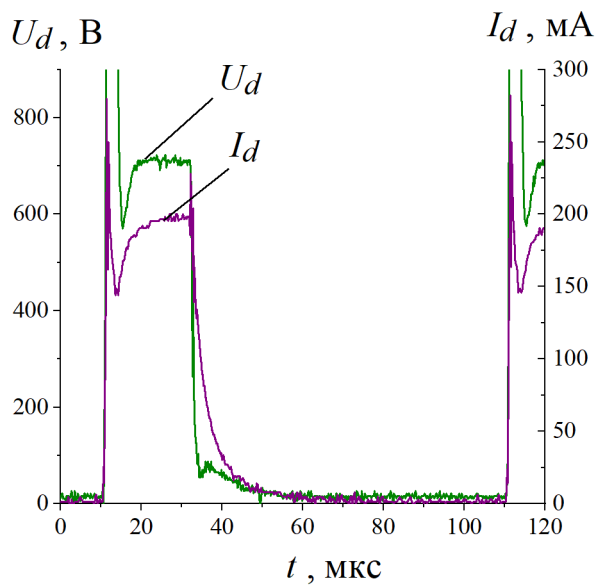


Рисунок 3.16 – Осциллограммы тока и напряжения вспомогательного разряда: $f = 10$ кГц; $p = 3$ Па; $I_{dcp} = 55$ мА; $D = 0,2$

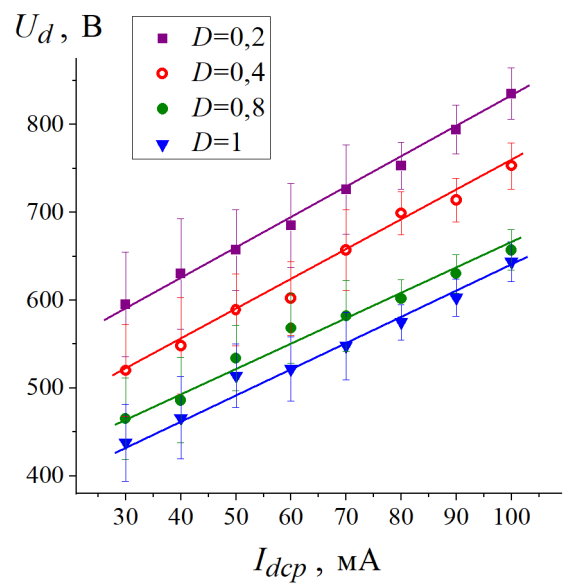


Рисунок 3.17 – ВАХ вспомогательного разряда при разном коэффициенте заполнения импульсов D : $p = 3$ Па; $f = 20$ кГц

Наибольшее напряжение разряда соответствует наименьшему коэффициенту заполнения импульсов D за счет большей амплитуды тока разряда и растущей ВАХ. Поэтому напряжение горения разряда в непрерывном режиме всегда меньше, чем в импульсно-периодическом при одинаковом среднем токе разряда.

С повышением давления рабочего газа, как и в случае непрерывного режима, напряжение горения разряда снижается, однако абсолютная величина напряжения U_d в импульсно-периодическом режиме генерации больше на 50–100 В при одинаковых значениях среднего тока разряда (Рисунок 3.18).

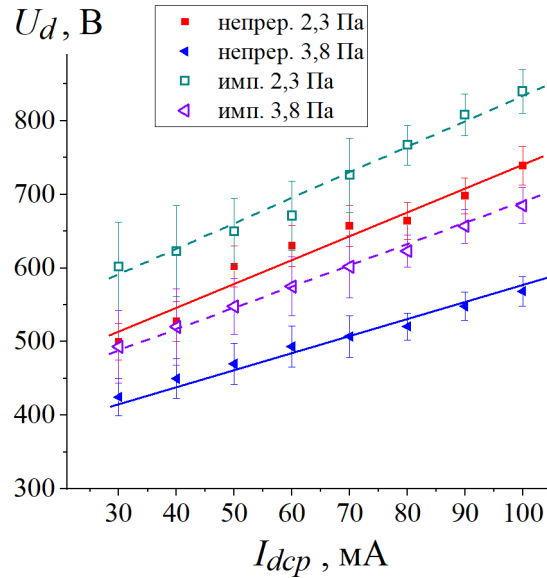


Рисунок 3.18 – ВАХ вспомогательного разряда для разного давления в непрерывном (сплошные линии) и импульсно-периодическом режиме (пунктирные линии); условия генерации: $f = 20$ кГц, $D = 0,4$

Увеличение частоты следования импульсов приводит к постепенному сокращению длительностей как импульса, так и паузы. При высокой частоте и малом коэффициенте заполнения импульса возможна ситуация, когда ток и напряжение разряда не доходят до установившегося значения (так называемой «полки»), однако при повышении частоты f от 1 до 70 кГц напряжение вспомогательного разряда U_d (Рисунок 3.19), которое фиксировалось в конце импульса при одинаковом токе $I_d = 140$ мА, изменялось незначительно (± 25 В, что составило $\pm 4\%$ от 700 В).

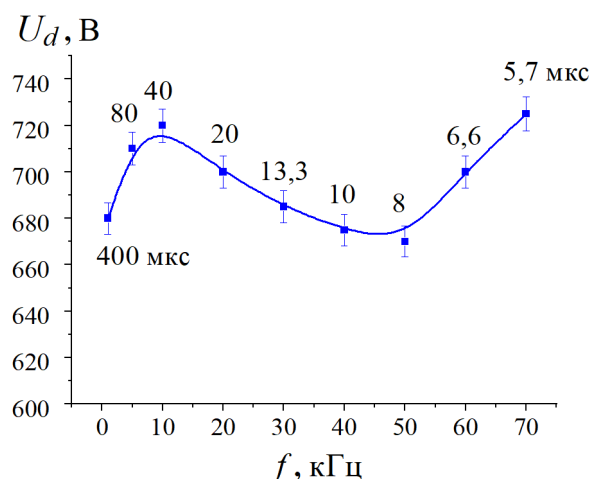


Рисунок 3.19 – Зависимость напряжения вспомогательного разряда от частоты следования импульсов: $I_d = 55$ мА; $D = 0,4$; $p = 3$ Па; числа на графике соответствуют длительности импульса разряда для конкретной частоты

3.5. Измерение параметров плазмы в импульсно-периодическом режиме

Для измерения параметров плазмы вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме его генерации использовался тот же зонд, что и для непрерывного режима. Сигналы тока на зонде и напряжения смещения на нем представлены на Рисунке 3.20 при разном коэффициенте заполнения импульса. Поскольку напряжение смещения U_3 генерируется с частотой 100 Гц, то в масштабе одного импульса тока разряда оно не изменяется. Однако на сигналах тока зонда заметны изменения амплитуды тока в течение одного импульса как при низком напряжении смещения ($U_3 \approx 20$ В), так и при высоком значении ($U_3 \approx 150$ В). Такое поведение сигнала может быть обусловлено динамикой разряда в течение импульса. Наибольшее изменение тока зонда сосредоточено в первые 30 мкс, после чего наблюдается выход на некоторую установившуюся величину. Параметры плазмы определялись ближе к концу генерации импульса. В паузу генерации наблюдается резкий скачок электронного тока, поскольку зонд остается под положительным смещением, а анодные проволоки перестают быть анодом разряда, вследствие запирающего транзистора в источнике питания разряда.

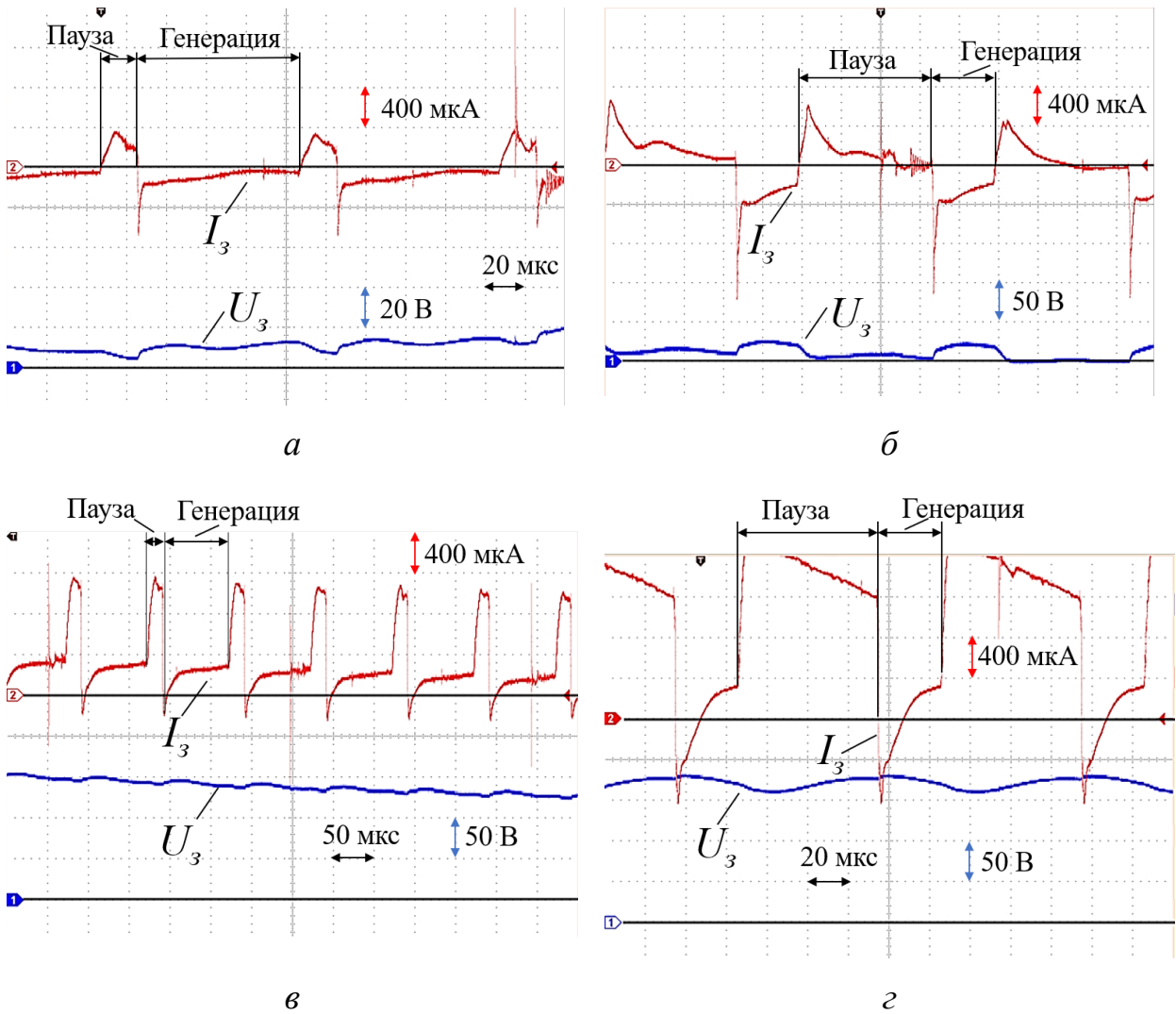


Рисунок 3.20 – Осциллограммы напряжения смещения и тока на зонде для разного коэффициента заполнения импульса при частоте 10 кГц: *a* – $D = 0,8$ и *б* – $D = 0,3$ при $U_3 \approx 20$ В; *в* – $D = 0,8$ и *г* – $D = 0,3$ при $U_3 \approx 150$ В

В Таблице 3.3 представлены параметры плазмы исследуемого тлеющего разряда в разных режимах генерации. В импульсно-периодическом режиме при уменьшении D проводилось соответствующее изменение времени измерения зондовой характеристики t_m с 30 на 15 мкс. Повышение амплитуды тока разряда приводит к повышению напряжения горения разряда и потенциала плазмы относительно катода, росту температуры электронов и увеличению концентрации плазмы. При одинаковом среднем значении тока разряда $I_{dcp} = 60$ мА, в импульсно-периодическом режиме концентрация плазмы тем выше, чем меньше коэффициент D , что напрямую связано с повышением амплитуды тока разряда [131].

Таблица 3.3 – Параметры плазмы тлеющего разряда орбитронного типа в разных режимах генерации

Режим генерации	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)
Непрерывный $I_d = 60$ мА	220	4,9	1,5
Непрерывный $I_d = 90$ мА	230	3,1	4,1
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 60$ мА $D = 0,4$ ($t_m = 30$ мкс)	270	6,2	2,6
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 60$ мА $D = 0,2$ ($t_m = 15$ мкс)	315	7,7	5,5

Если сравнивать режимы генерации плазмы при одинаковой амплитуде тока разряда $I_{damm} = 120$ мА, то в импульсно-периодическом режиме концентрация плазмы ниже, однако наблюдается меньшая неоднородность распределения концентрации по сравнению с непрерывным (Рисунок 3.21а). Снижение концентрации плазмы связано с недостаточным временем для полного перестроения разряда с периферийной части полого катода в центр. Благодаря короткому времени генерации разряд не успевают перейти в стационарную стадию, характерную для непрерывного режима. Кроме этого, в паузе генерации происходит снижение потенциального барьера и расширение плазмы в имеющемся объеме. Таким образом, в импульсно-периодическом режиме плазма имеет меньшую неоднородность. При отдалении от центра (координата 0 на Рисунке 3.21б) потенциал плазмы φ_{pl} в непрерывном режиме уменьшается на 10 В, а в импульсно-периодическом φ_{pl} увеличивается на 20 В (Таблица 3.4), однако ширина прикатодного слоя d_k увеличивается в обоих случаях.

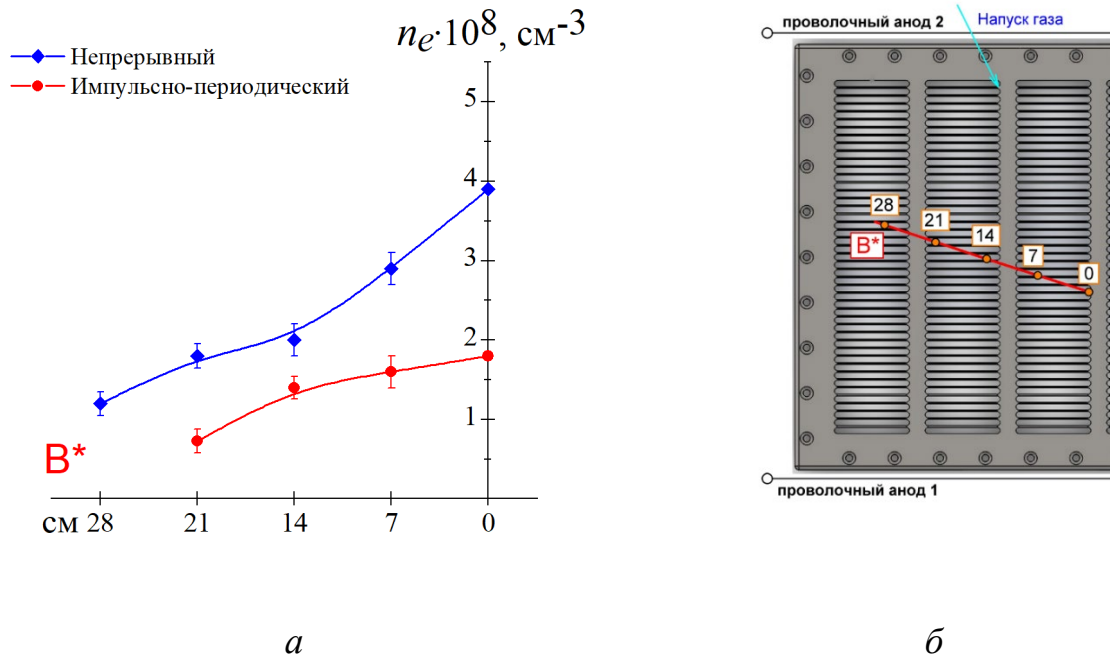


Рисунок 3.21 – Измерение концентрации плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме с одинаковой амплитудой тока разряда:
 а – распределение концентрации плазмы; б – схема перемещения зонда; условия генерации: $I_{damm} = 120$ мА, $p = 3,8$ Па, $f = 10$ кГц, $D = 0,4$

Таблица 3.4 – Распределение параметров плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме с одинаковой амплитудой тока разряда

Расстояние	Непрерывный режим $I_d = 120$ мА				Импульсно-периодический режим $I_{dcp} = 48$ мА, $I_{damm} = 120$ мА, $D = 0,4$ (30 мкс), $f = 10$ кГц			
	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)	d_k (см)	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)	d_k (см)
0	260	2,3	4	1,7	290	3,1	2,6	2,5
7	250	2,4	3,1	2,1	290	2,7	2,3	2,7
14	250	1,8	3	2,3	295	2,9	1,4	3,3
21	247	2	2,2	2,6	310	3	0,7	4,8
28	245	2,1	1,2	3,5	-	-	-	-

При подаче ускоряющего напряжения и генерации электронного пучка наблюдается снижение напряжения разряда U_d на 40 В и уменьшение прикатодного падения φ_{pl} на 20 В (Таблица 3.5). Как и в Таблице 3.4 с током $I_{damn} = 120$ мА, при одинаковой амплитуде тока разряда в импульсно-периодическом режиме концентрация меньше, однако, в условиях одинакового среднего значения тока, импульсно-периодический режим превосходит по величине концентрации плазмы как без ускоряющего напряжения, так и при генерации пучка. В дальнейшем сравниваются режимы с одинаковым средним значением тока вспомогательного разряда I_{dcp} .

Таблица 3.5 – Параметры плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при наличии ускоряющего напряжения

Режим	U_0 (кВ)	U_d (В)	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)	d_k (см)
Непрерывный $I_d = 60$ мА	0	595	215	4,2	1	2,9
	100	540	195	3,6	0,8	3
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 24$ мА, $I_{damn} = 60$ мА, $D = 0,4$ (30 мкс), $f = 10$ кГц	0	560	275	2,3	0,47	5,9
	100	520	260	5,3	0,51	4,4
Импульсно-периодический $I_{dcp} = 60$ мА, $I_{damn} = 150$ мА, $D = 0,4$ (30 мкс), $f = 10$ кГц	0	600	275	4,3	1,58	2,8
	100	580	255	3	1,37	3,1

Подача ускоряющего напряжения в импульсно-периодическом режиме, также как и в непрерывном, выравнивает распределение концентрации плазмы (Рисунок 3.22а), при этом становится возможным измерить параметры плазмы в тех точках (точка 28 на Рисунке 3.21б), в которых без ускоряющего напряжения, зондовая характеристика не поддавалась анализу из-за малого тока на зонд и большого разброса значений. Если рассчитать ширину прикатодного слоя d_k в каждой точке измерения параметров плазмы, то можно графически представить

границу плазмы вспомогательного разряда со стороны анодной решетки (горизонтальная ось представляет собой границу анодной решетки), поскольку электрическое поле в ускоряющем промежутке не проникает в область генерации вспомогательного разряда (Рисунок 3.22б). По мере удаления от центра ширина прикатодного слоя растет, при этом генерация электронного пучка способствует выравниванию границы эмиссионной плазмы.

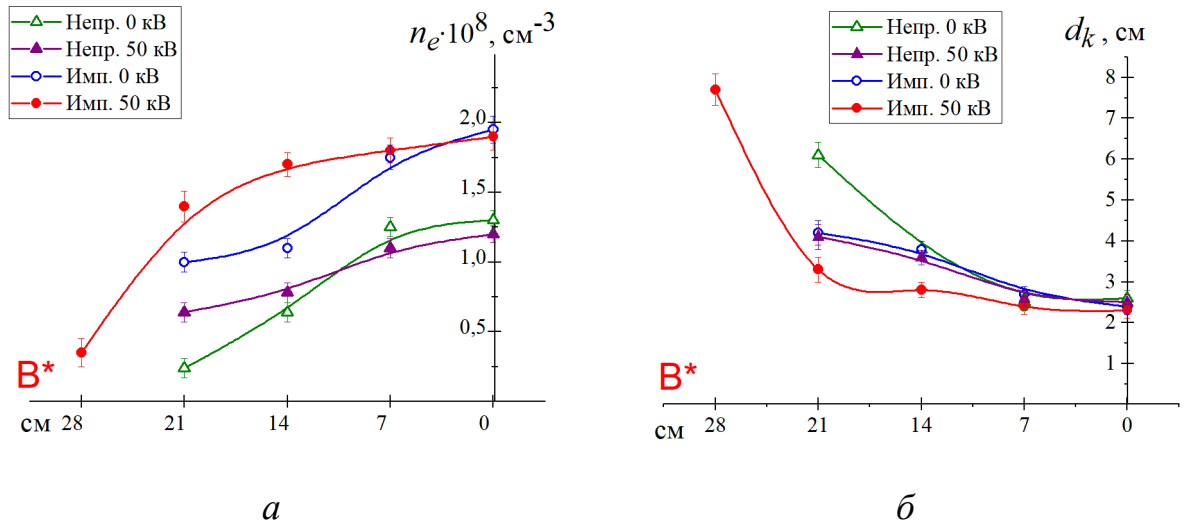


Рисунок 3.22 – Распределение параметров эмиссионной плазмы в импульсно-периодическом и непрерывном режиме при наличии ускоряющего напряжения: a – концентрации плазмы; b – ширина прикатодного слоя; условия генерации:

$$I_{dcp} = 60 \text{ мА}, f = 10 \text{ кГц}, p = 2,7 \text{ Па}, D = 0,4$$

3.6. Релаксационные процессы в плазме вспомогательного разряда

Как отмечалось выше, особенность импульсно-периодического режима, заключается в том, что разряд развивается в условиях остаточной плазмы, наработанной предыдущим импульсом. Данный факт может существенным образом повлиять на момент зажигания разряда, и как итог на распределение концентрации плазмы и генерацию электронного пучка в целом. Для оценки длительности релаксационных процессов в эмиссионной плазме после окончания импульса генерации разряда использовался цилиндрический коллектор площадью $S \approx 130 \text{ см}^2$, на который было подано постоянное отрицательное напряжение

смещения уровня 50 В относительно полого катода (Рисунок 3.23а) [113]. Это позволило измерить ток ионов из плазмы в паузе генерации, а время, за которое ток коллектора спадает до нуля соответствует длительности релаксационных процессов в плазме. На представленных осциллограммах ток разряда I_d был подключен через емкостной фильтр для сглаживания выбросов напряжения, I_c – без фильтра. Согласно Рисунку 3.23б максимальный ток коллектора I_c составляет ≈ 500 мкА в течение импульса тока разряда I_d , после окончания импульса разряда ток коллектора спадает, но за время паузы $t_p \approx 130$ мкс не достигает нуля, а остается на уровне $I_c \approx 100$ мкА.

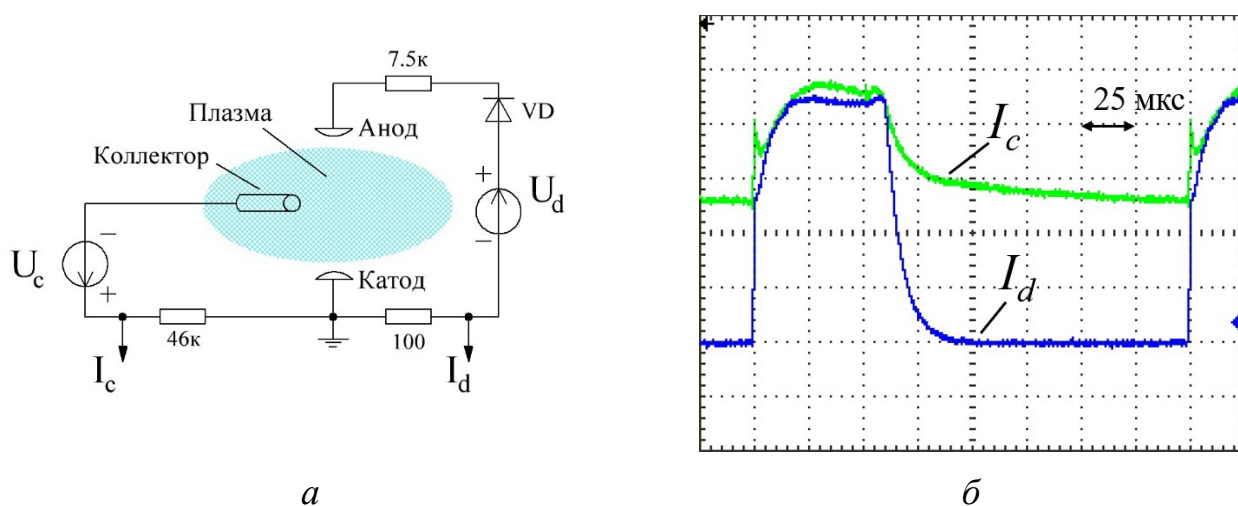
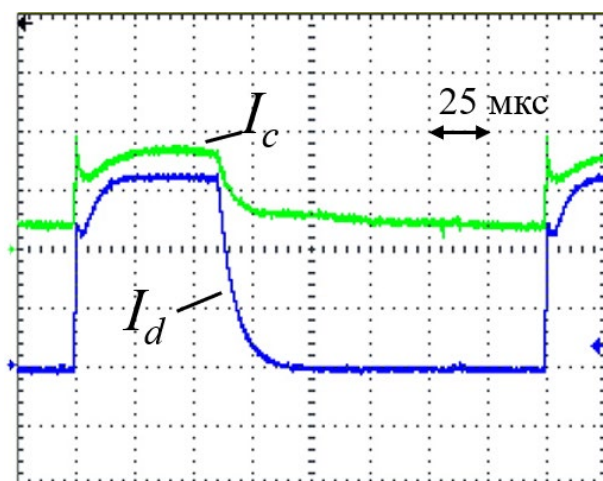


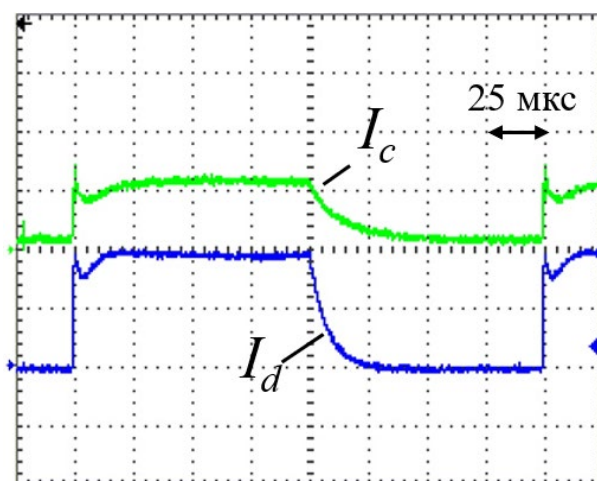
Рисунок 3.23 – Измерение тока ионов на цилиндрическом коллекторе:

а – схема подключения цилиндрического коллектора; *б* – осциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/дел) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0,2 мА/дел); условия генерации: $I_{dcp} = 65$ мА, $f = 5$ кГц, $p = 4,5$ Па, $D = 0,3$

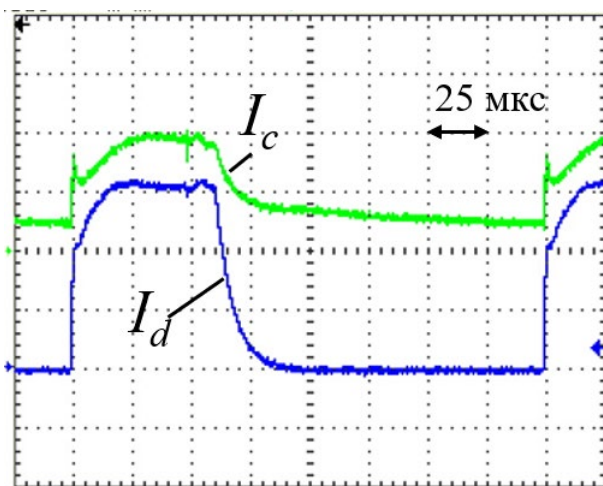
Изменение коэффициента D влечет за собой изменение как концентрации плазмы, так и длительности паузы между импульсами, что отражается на токе ионов (Рисунок 3.24а, б). Уменьшение D способствует повышению тока в момент генерации и бóльшему току в паузе при частоте $f = 5$ кГц. Сравнение частоты следования импульсов (Рисунок 3.24в, г) происходило при увеличенном в два раза давлении для исключения затухания разряда при $f = 1$ кГц. Видно, что за паузу $t_p = 700$ мкс ток на коллекторе по-прежнему не достигает нуля.



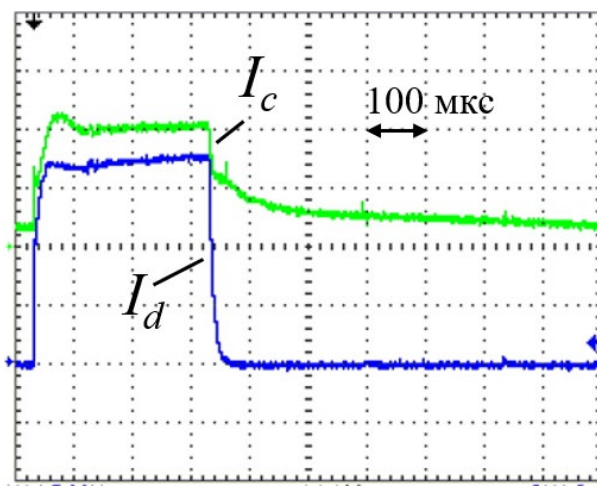
a – $I_{dcp} = 30$; $f = 5$ кГц; $p = 3$ Па;
 $D = 0,3$



б – $I_{dcp} = 30$ мА; $f = 5$ кГц; $p = 3$ Па;
 $D = 0,5$



в – $I_{dcp} = 30$ мА; $D = 0,3$; $p = 6$ Па;
 $f = 5$ кГц



з – $I_{dcp} = 30$ мА; $D = 0,3$; $p = 6$ Па;
 $f = 1$ кГц

Рисунок 3.24 – Осциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/дел) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0,2 мА/дел) при разном коэффициенте заполнения (*a*, *б*) и разной частоте генерации разряда (*в*, *з*)

Таким образом, можно сделать вывод, что длительность релаксационных процессов плазмы вспомогательного разряда существенно превышает длительность паузы между импульсами тока разряда. В результате чего на протяжении всей паузы между импульсами тока разряда происходит инжекция ионов из эмиссионной плазмы в ускоряющий промежуток, которые поддерживают

горение ВТР. Следует учитывать, что данный эксперимент проводился без ускоряющего напряжения, и длительность релаксационных процессов в плазменном эмиттере может быть больше за счет дополнительных электронов из несамостоятельного ВТР, которые, как видно из зондовых измерений, способны снизить напряжение горения разряда на $U_d = 50$ В и потенциал плазмы относительно катода на $\varphi_{pl} = 20$ В. Минимальная частота следования импульсов, при которой реализуется устойчивое горение самостоятельного импульсно-периодического орбитронного тлеющего разряда с полым катодом, обеспечивается наличием остаточной плазмы с концентрацией не ниже порогового значения, зависящего от конкретных условий генерации в электродной системе, перед каждым последующим импульсом тока разряда.

3.7. Стабильность генерации вспомогательного разряда

При использовании разрядов с полым катодом часто возникает вопрос возникновения микровзрывов на поверхности катода, обусловленных высокой напряженностью электрического поля $\sim 10^5$ В/см на микроостриях. [40, 132]. Микровзрывы, которые могут перейти в катодное пятно, приводят к локальному повышению концентрации плазмы разряда. В итоге, происходит локальное повышение эмиссионного тока из плазмы, которое может спровоцировать пробой ускоряющего промежутка или переход от несамостоятельного к самостоятельному ВТР, который в свою очередь сопровождается резким снижением напряжения на ускоряющем промежутке и невозможностью вывести электронный пучок в атмосферу. Кроме этого, возникающие катодные пятна на поверхности полого катода приводят к локальному повышению тока на анод разряда, что для тонких проволок может быть критичным в связи с повышенной температурой $\sim 1000^\circ\text{C}$ и в результате этого изменением механических свойств проволоки [132].

Известно, что использование импульсно-периодических систем электропитания, как в униполярном, так и биполярном режиме способствует снижению частоты возникновения катодных пятен и вероятности развития дугового разряда [133–135]. Такие системы с частотой следования импульсов

десятки и сотни килогерц часто используются в области магнетронного напыления покрытий, в которой важнейшим аспектом является стабильность проводимого процесса напыления. Снижение частоты возникновения катодных пятен в данном случае объясняется наличием паузы генерации, во время которой происходит компенсация заряда, накопленного на поверхности диэлектрических пленок, тем самым ограничивая нарастание напряженности электрического поля, способствующего пробоем диэлектрического слоя.

Для оценки стабильности генерации вспомогательного разряда в разных режимах проведен ряд экспериментов. Ввиду вероятностного возникновения катодного пятна, а также возможности появления нескольких катодных пятен при горении дугового разряда, нельзя с точностью определить частоту их возникновения, но можно определить количество переходов микровзрывов в дуговой разряд в зависимости от времени работы системы. Для такой количественной оценки стабильности работы использовалась установленная в источнике электропитания разряда система защиты по току (так называемая «дугозащита»), срабатывающая при амплитуде тока 12 А и фиксирующая количество срабатываний. Несмотря на значительное превышение микровзрывов на поверхности катода над числом срабатываний «дугозащиты», что обусловлено высоким порогом срабатывания по току системы защиты, данная оценка все же позволяет сравнить стабильность генерации вспомогательного разряда в разных режимах. С целью повышения тока от произошедшего микровзрыва и необходимости улучшить регистрационные свойства схемы, в цепь разряда анод – катод, параллельно источнику питания, был введен внешний конденсатор C ёмкостью 7 нФ и ограничительное сопротивление R номиналом 20 Ом (Рисунок 3.25).

Для используемого рабочего газа гелия не удалось зафиксировать представленным способом возникновение катодных пятен, однако их появление в орбитронном тлеющем разряде подтверждается фотофиксацией в ранее проведенных работах, например, в [132]. Поэтому в качестве рабочего газа для

данных экспериментов использовался азот, обладающий меньшей электрической прочностью в области низкого давления.

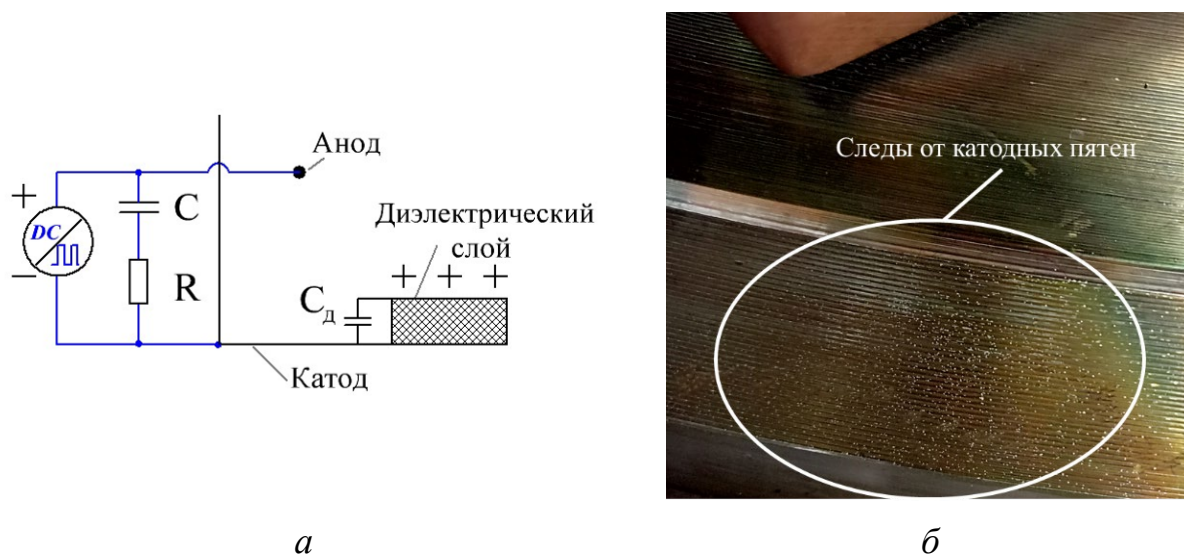


Рисунок 3.25 – Регистрация дугового разряда на стенках полого катода: *а* – схема подключения внешнего конденсатора; *б* – следы от катодных пятен на поверхности катода

Были проведены измерения количества зафиксированных «дугозащитой» источника переходов микровзрывов в дуговой разряд N_c в течение 15 минут в зависимости от промежутка времени между включением вспомогательного разряда при постоянном токе разряда 80 мА и давлении азота 0,4 Па (Рисунок 3.26а). Так после ожидания двух суток наблюдается значительный рост N_c в первые 5 минут генерации разряда, после чего происходит выход на некоторую стационарную стадию. Такое явление называют «тренировкой» электродной системы, когда с течением времени уменьшается количество пробоев межэлектродного промежутка с дальнейшим повышением его электрической прочности. Если промежуток времени между включениями разряда составляет один час, то на зависимости $N_c(t)$ отсутствует участок с высоким dN_c/dt и можно считать, что электродная система «оттренирована». Дальнейшие эксперименты по фиксированию возникающих дуг проводились после работы вспомогательного разряда в течение 15 минут. В непрерывном режиме генерации с повышением тока разряда при давлении 0,4 Па

наблюдается рост числа срабатываний «дугозащиты» как абсолютного значения, так и dN_c/dt , что обусловлено повышением напряжения разряда (Рисунок 3.26б).

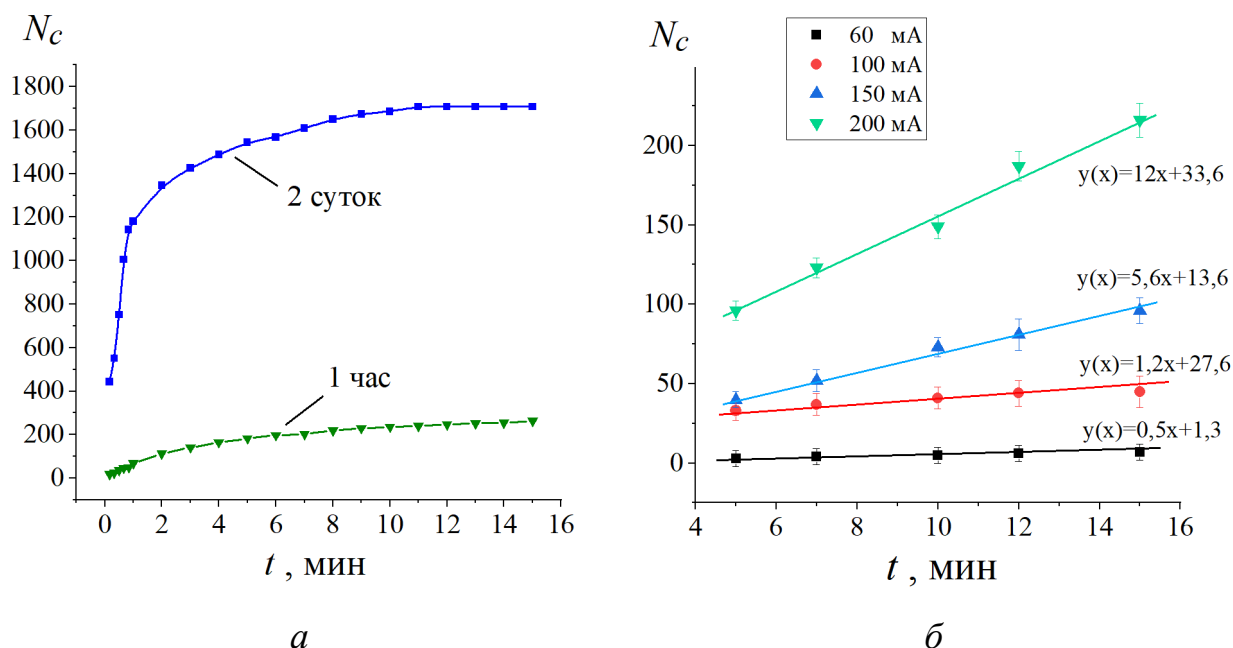


Рисунок 3.26 – Количество зафиксированных дуг: *a* – в зависимости от промежутка времени между запусками вспомогательного разряда; *б* – в зависимости от тока разряда в непрерывном режиме

Переход к импульсно-периодическому режиму показывает снижение числа зафиксированных дуг (Рисунок 3.27) [136]. Видно, что независимо от режима генерации наблюдается «тренировка» электродной системы при повторе эксперимента, однако в импульсно-периодическом режиме число срабатываний «дугозащиты» меньше. При этом повышение давления способствует снижению N_c , что согласуется со снижением напряжения горения разряда. Для полученных данных были построены линии тренда с линейной зависимостью и написаны к ним уравнения вида $y(x) = kx + c$, которые позволяют с помощью коэффициентов сравнить скорость нарастания числа возникающих дуг и их количество с начала генерации разряда.

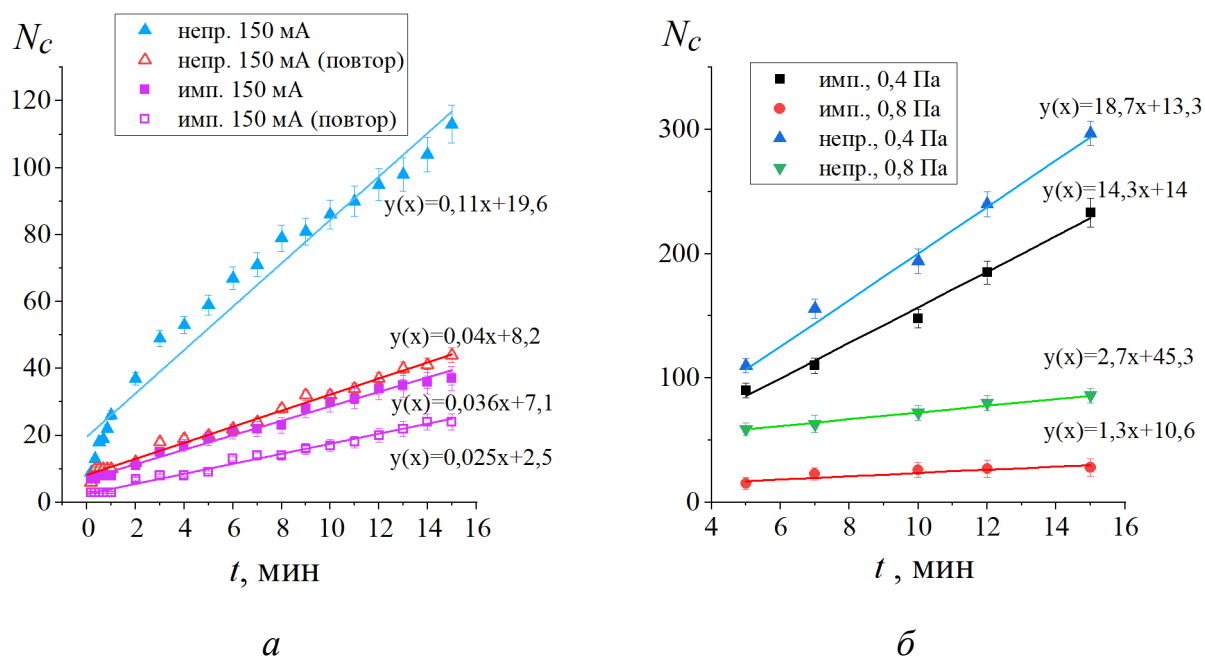


Рисунок 3.27 – Количество зафиксированных дуг в непрерывном и импульсно-периодическом режиме: *a* – при повторе эксперимента через 15 минут ($I_{dcp} = 150$ мА, $f = 20$ кГц, $p = 0,4$ Па, $D = 0,5$); *б* – в зависимости от давления азота ($I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $D = 0,8$)

Исследование импульсно-периодического режима показало, что число возникающих дуг становится меньше с повышением частоты генерации и уменьшением коэффициента заполнения импульса разряда (Рисунок 3.28) Данные факторы снижают время генерации разряда, а, следовательно, возрастает электрическая прочность межэлектродного промежутка. Кроме этого, ограничивается по времени зарядка диэлектрических слоев до критической напряженности электрического поля.

Из проведенных экспериментов становится ясным, что с точки зрения возникновения переходов микровзрывов в дуговой разряд на поверхности полого катода вспомогательного разряда наилучшими (с меньшим количеством срабатываний «дугозащиты») режимами из рассматриваемых является импульсно-периодический с частотой следования импульсов $f > 10$ кГц или с малым коэффициентом заполнения импульса $D < 0,5$.

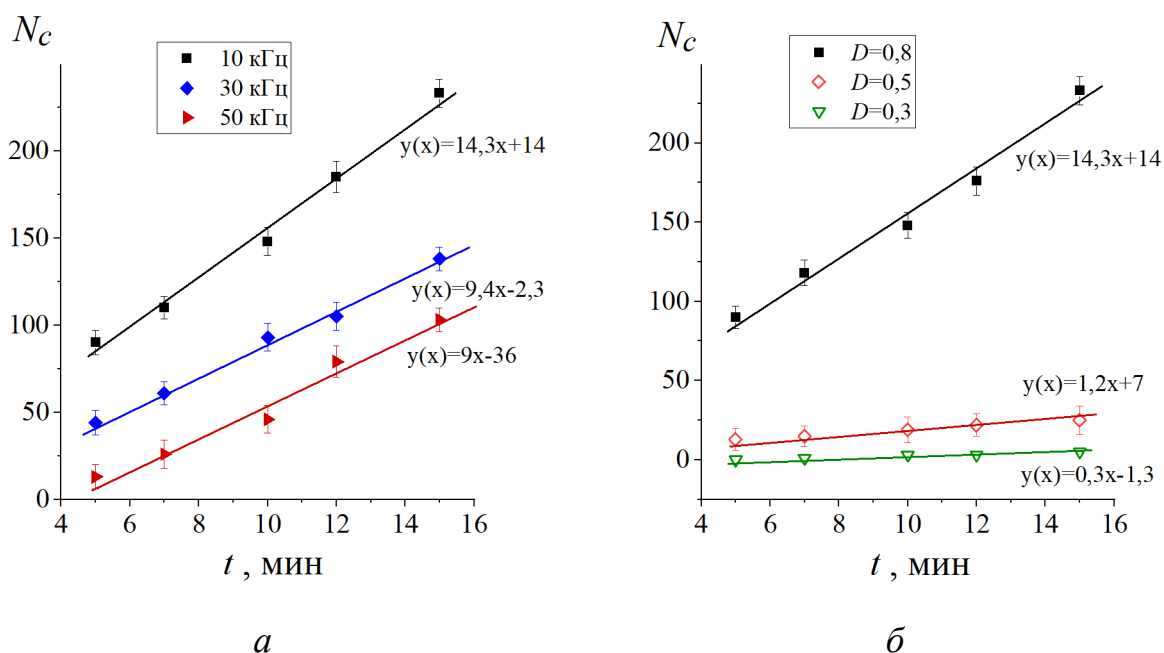


Рисунок 3.28 – Количество зафиксированных дуг в импульсно-периодическом режиме: *а* – в зависимости от частоты генерации вспомогательного разряда (при $I_{dcp} = 80$ мА, $p = 0,4$ Па, $D = 0,8$); *б* – в зависимости от коэффициента заполнения импульса ($I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 0,4$ Па)

Выводы:

1) Применение импульсно-периодического режима генерации самостоятельного тлеющего разряда орбитронного типа позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы n_e с $1,5 \cdot 10^8$ до $5,5 \cdot 10^8$ см⁻³ по сравнению с непрерывным режимом при одинаковом среднем значении тока разряда.

2) Генерация электронного пучка в импульсно-периодическом режиме, также как в непрерывном, способствует снижению напряжения вспомогательного разряда U_d на ≈ 40 В и уменьшению потенциала плазмы относительно полого катода ϕ_{pl} на ≈ 20 В, при этом снижается неоднородность распределения концентрации эмиссионной плазмы на 20 %.

3) Длительность релаксационных процессов эмиссионной плазмы после окончания импульса генерации разряда превышает длительность паузы, что приводит к инжекции ионов в ускоряющий промежуток в течение всего периода генерации, но в разном их количественном отношении.

4) Импульсно-периодический режим вспомогательного разряда позволяет снизить число микровзрывов, способных перейти в дуговой разряд, на стенках полого катода и тем самым снизить локальные неоднородности в эмиссионной плазме, влияющие на ВТР и генерацию электронного пучка.

ГЛАВА 4. ВЫВОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРУ

Как было отмечено в Главе 2, эффективность вывода электронного пучка в атмосферу оценивается с помощью коэффициента вывода, рассчитываемого как отношение тока пучка, выведенного в атмосферу, к общему току в ускоряющем промежутке $\beta = I_b/I_0$. Относительно других типов ускорителей характерной особенностью ускорителей на основе несамостоятельного ВТР является низкое значение β (зачастую не превышающее 0,5). Низкие значения коэффициента β обусловлены протеканием в ускоряющем промежутке процессов, сопровождающих вторичную ионно-электронную эмиссию с высоковольтного катода. Такими процессами являются резонансная перезарядка ионов и образование потока ускоренных нейтралов, отражение вторичных электронов от поверхности анодной решетки, фотоэмиссия, неоднородность электрического поля на краях высоковольтного катода, приводящая к угловой расходимости ионного и электронного пучков и др. Все представленные процессы вносят вклад в поддержание тока несамостоятельного ВТР и приводят к возникновению вторичных электронов на поверхности высоковольтного катода в геометрической тени анодной решетки, которые не могут быть выведенными в атмосферу. В данной главе рассмотрен вывод электронного пучка в атмосферу для разных режимов генерации эмиссионной плазмы, описаны причины полученных зависимостей, а также представлены способы повышения коэффициента вывода пучка в атмосферу, являющегося одним из самых важных параметров таких энергетических систем.

4.1. Вывод электронного пучка в непрерывном режиме

Ток электронного пучка, выведенного в атмосферу, регистрировался коллектором, представляющим собой пластину из нержавеющей стали, полностью перекрывающую выводное окно ускорителя, и расположенную на расстоянии 20 мм от выводной фольги (см. раздел 2.2).

В непрерывном режиме генерации вспомогательного разряда при подаче ускоряющего напряжения регистрировался ток в ускоряющем промежутке I_0 (Рисунок 4.1) и ток электронного пучка, выведенного в атмосферу I_b (Рисунок 4.2). С повышением ускоряющего напряжения наблюдается увеличение тока в ускоряющем промежутке, объясняемое повышением коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии с поверхности высоковольтного катода из нержавеющей стали, который для ионов гелия с энергией 150 кэВ составляет 8 – 10 [9, 137].

Повышение тока вспомогательного разряда приводит к увеличению концентрации эмиссионной плазмы. При этом пропорционально возрастает количество ионов, которые извлекаются из вспомогательного разряда через каналы анодной решетки, что приводит к росту общего тока в ускоряющем промежутке.

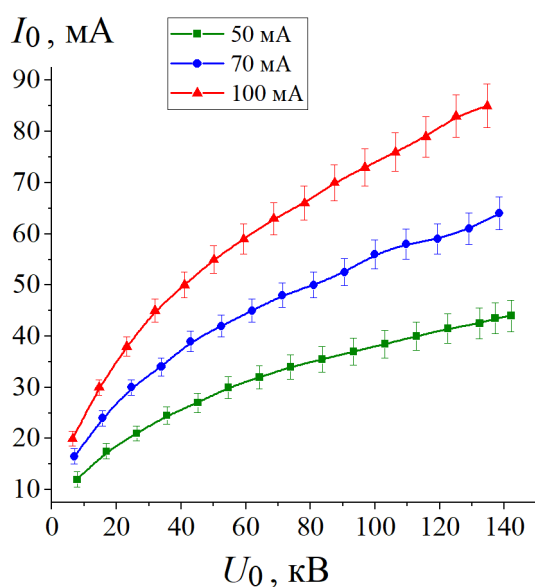


Рисунок 4.1 – Зависимость тока в ускоряющем промежутке от ускоряющего напряжения при разном токе вспомогательного разряда

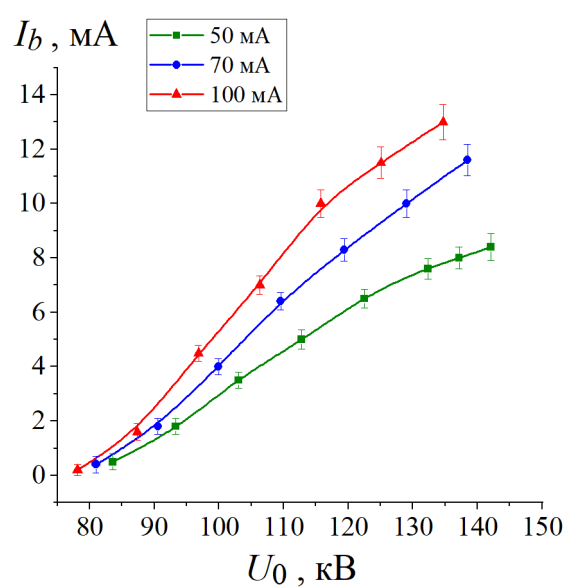


Рисунок 4.2 – Зависимость тока выведенного пучка от ускоряющего напряжения при разном токе вспомогательного разряда

Ток электронного пучка, выведенного в атмосферу, повышается с ростом ускоряющего напряжения как за счёт увеличения коэффициента вторично-электронной эмиссии, так и за счёт увеличения коэффициента прохождения

электронами алюминиевой фольги на выводном окне. Согласно литературным данным для ускоряющего напряжения до 70 кВ коэффициент прохождения для используемой на ускорителе фольги толщиной 30 мкм близок к нулю, а для напряжения 150 кВ составляет 0,85 [33, 34].

В непрерывном режиме коэффициент вывода слабо зависит от величины тока вспомогательного разряда в исследуемом диапазоне, а при токе в 100 мА даже снижается (Рисунок 4.3) и составляет менее 0,2 при ускоряющем напряжении 140 кВ [138]. Осциллограммы токов в непрерывном режиме вспомогательного разряда при ступенчатом изменении ускоряющего напряжения от 50 до 150 кВ приведены на Рисунке 4.4.

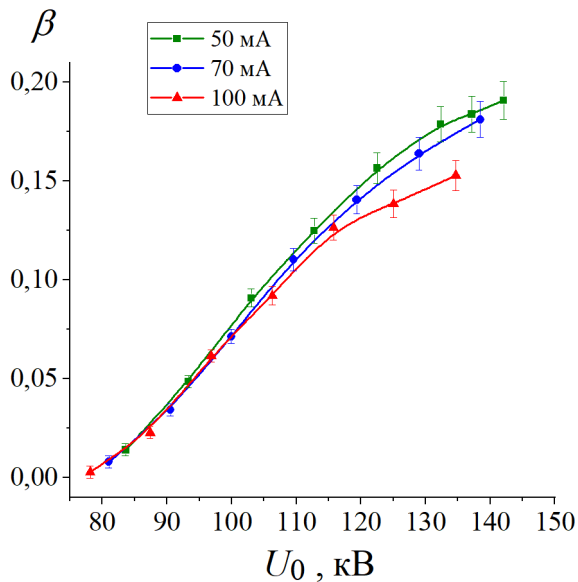


Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в непрерывном режиме при разном токе вспомогательного разряда

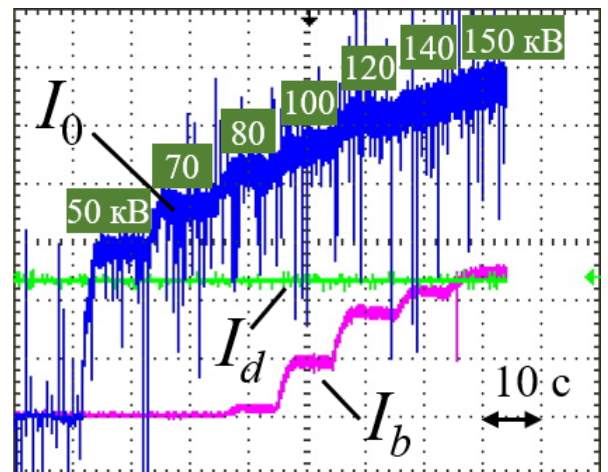


Рисунок 4.4 – Осциллограммы токов при повышении ускоряющего напряжения: I_0 – ток в ускоряющем промежутке (10 мА/дел); I_d – ток вспомогательного разряда (20 мА/дел); I_b – ток пучка (5 мА/дел); $p = 3$ Па

Слабая зависимость коэффициента β от тока вспомогательного разряда в непрерывном режиме генерации связана с малым изменением положения границы эмиссионной плазмы и ИЭОС в диапазоне токов до 100 мА. Низкое значение

$\beta < 0,2$ свидетельствует о значительных потерях тока пучка внутри электродной системы ускорителя. Потери электронного пучка складываются из потерь на анодной и опорной решетках, а также потерь внутри алюминий-магниевой выводной фольги [25], что для данного ускорителя рассмотрено в разделе 4.4.

4.2. Вывод электронного пучка в импульсно-периодическом режиме

Рассмотрим вывод электронного пучка в атмосферу при импульсно-периодическом режиме вспомогательного разряда со стабилизацией среднего значения его тока (Рисунок 4.5). При уменьшении коэффициента заполнения D происходит сокращение длительности импульса тока I_d с соответствующим повышением его амплитуды, что приводит к сокращению длительности и увеличению амплитуды тока пучка I_b , выведенного в атмосферу.

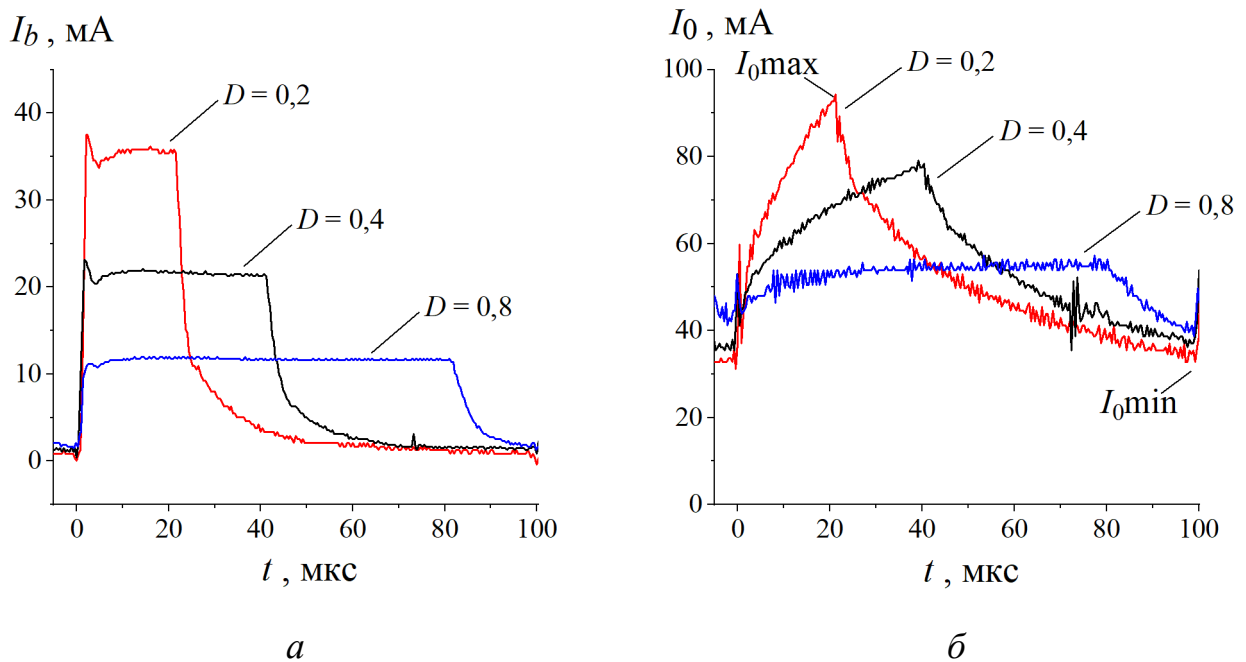


Рисунок 4.5 – Осциллограммы тока при разном коэффициенте заполнения импульса: *a* – ток электронного пучка в атмосфере; *б* – ток в ускоряющем промежутке; условия генерации: $I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па

Амплитуда тока пучка при этом остается постоянной на протяжении всего импульса генерации для разных D . Ток в ускоряющем промежутке увеличивается в течение всего импульса генерации, и в отличие от тока пучка в паузе имеет

низкую скорость спада и не достигает к концу паузы нулевых значений. В итоге коэффициент вывода пучка в атмосферу (Рисунок 4.6а) имеет наибольшее значение в начале импульса генерации, а в паузу составляет около 0,05. Наличие тока I_0 в паузе генерации обусловлено поступлением в ускоряющий промежуток ионов эмиссионной плазмы вспомогательного разряда (раздел 3.6), а также релаксационными процессами самого ВТР.

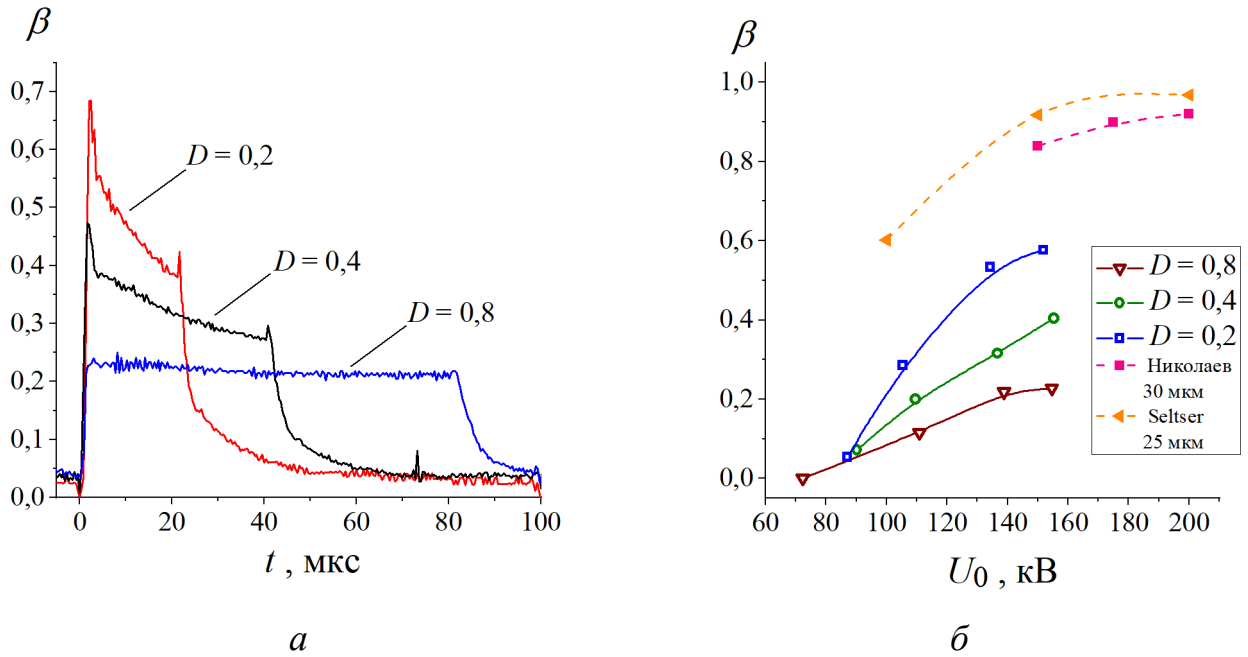


Рисунок 4.6 – Коэффициент вывода пучка в атмосферу при разном коэффициенте заполнения импульса: *а* – в течение одного периода генерации ($I_{dcp} = 80$ мА); *б* – в зависимости от ускоряющего напряжения ($I_{dcp} = 30$ мА); условия генерации: $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па; пунктиром представлены расчетные коэффициенты прохождения электронами алюминиевой фольги из работы Николаева [33] и Seltser [34]

В зависимости от ускоряющего напряжения (Рисунок 4.6б) мгновенное значение коэффициента вывода в конце импульса может достигать $\beta = 0,55$ при $D = 0,2$ и напряжении 150 кВ на ускоряющем промежутке [113, 138, 139]. При коэффициенте ионно-электронной эмиссии $\gamma \approx 10$ доля ионного тока в ускоряющем промежутке составляет $\approx 10\%$, а значит, реальный коэффициент вывода электронного пучка достигает $\beta = I_b/0,9 \cdot I_0 = 0,63$. Штриховыми линиями обозначен

потенциальный максимум коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу при отсутствии потерь на электродах, ограниченный лишь коэффициентом пропускания электронов алюминиевой фольгой толщиной 25 и 30 мкм, взятые из литературных данных [33, 34]. Так, максимально возможный коэффициент вывода для 150 кВ составляет 0,8–0,9. В нашем случае при учете ионной компоненты в токе I_0 имеется более 20% потерь тока электронного пучка в сравнении с максимально возможным коэффициентом вывода.

Отдельно стоит отметить, что коэффициент β слабо зависит от значения среднего тока вспомогательного разряда для неизменного коэффициента заполнения в течение периода генерации (Рисунок 4.7а) и в зависимости от напряжения на ускоряющем промежутке (Рисунок 4.7б). Данные графики свидетельствуют о слабой зависимости β от тока разряда I_d и определяющем значении коэффициента заполнения импульса D .

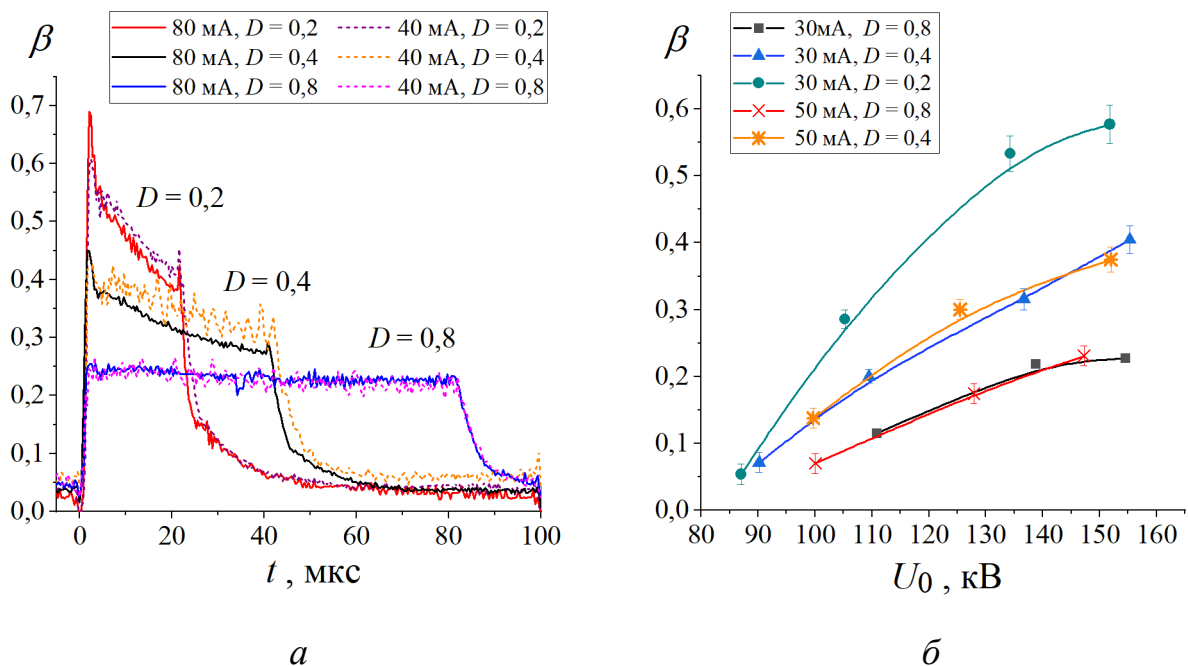


Рисунок 4.7 – Коэффициент вывода тока пучка в атмосферу при различных коэффициентах заполнения импульса и средних токах разряда: a – в течение одного периода генерации; b – в зависимости от ускоряющего напряжения.

Условия генерации: $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па

Зависимость на Рисунке 4.8 представляет собой максимальные I_{0max} и минимальные I_{0min} значения тока в ускоряющем промежутке для разного коэффициента заполнения. В данных режимах сохранялось одинаковое амплитудное значение тока вспомогательного разряда $I_{damn}=175$ мА для разных D путем подбора среднего значения тока I_d . Видно, что наименьшие значения тока в ускоряющем промежутке для I_{0max} и I_{0min} соответствуют малым D . По мере увеличения коэффициента заполнения ток I_0 растет и стремится к максимальному значению, соответствующему непрерывному режиму генерации. Ток выведенного пучка I_b (Рисунок 4.9), при этом, имеет наибольшее значение при малых D , что связано как с изменением параметров плазмы разряда, так и разным значением ускоряющего напряжения на промежутке.

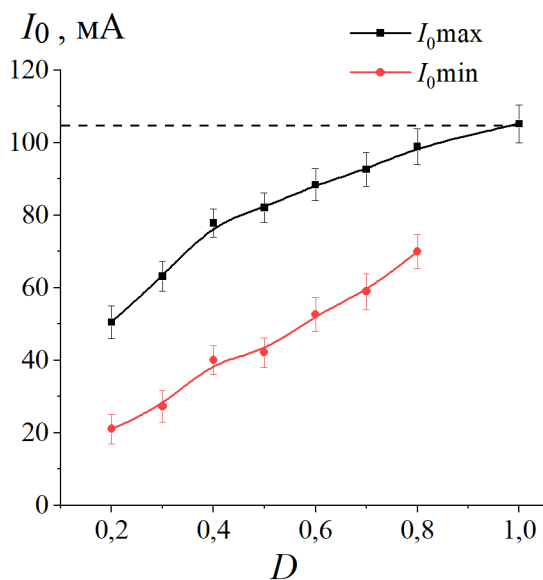


Рисунок 4.8 – Зависимость минимального I_{0min} и максимального I_{0max} значения тока в ускоряющем промежутке от коэффициента заполнения импульса D

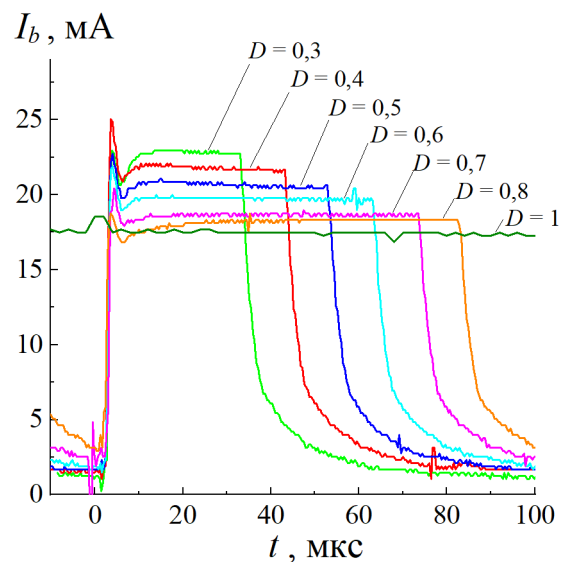


Рисунок 4.9 – Зависимость тока пучка, выведенного в атмосферу, I_b от коэффициента заполнения импульса D

Различие напряжения на ускоряющем промежутке обусловлено падением напряжения на балластном сопротивлении (R_{2b} на Рисунке 2.1), которое может достигать 10 кВ и напрямую определяется током I_0 . Поэтому напряжение на

ускоряющем промежутке и, соответственно, коэффициент прозрачности фольги для электронов в случае непрерывного режима будет меньше.

Малые значения D приводят к тому, что ток в ускоряющем промежутке за длительность генерации не может выйти на максимальные значения, соответствующие непрерывному режиму (Рисунок 4.8). Кроме этого, наличие длительной паузы, в течение которой происходит спад I_0 , способствует началу роста тока с меньшего значения при следующем импульсе.

С повышением частоты генерации разряда ток выведенного пучка изменяется несущественно, однако ток в ускоряющем промежутке при частоте 70 кГц возрастает, как и в случае повышения коэффициента заполнения импульса (Рисунок 4.8), что в итоге приводит к снижению коэффициента вывода (Рисунок 4.10). Повышение частоты следования импульсов уменьшает длительность паузы между импульсами, а также за счет наличия индуктивности и емкости в контуре питания разряда увеличивается постоянная составляющая тока вспомогательного разряда, и как следствие, тока пучка. Таким образом, частота более 50 кГц приводит к квазинепрерывному режиму, когда постоянная составляющая тока сравнима со средним значением.

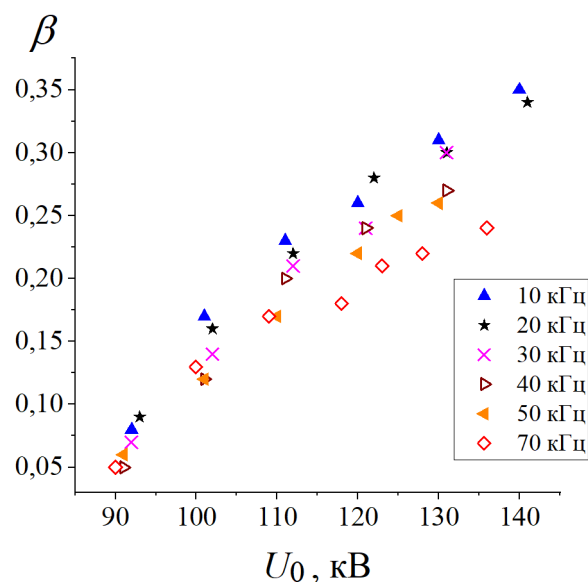


Рисунок 4.10 – Зависимость коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения при разной частоте следования импульсов; условия генерации: $I_{dcp} = 50$ мА, $p = 3$ Па, $D = 0,4$

Поскольку несамостоятельный ВТР, как и остальные газовые разряды, включает в себя множество элементарных процессов взаимодействия частиц, то его рассмотрение только как ионно-электронной эмиссии с поверхности металла при бомбардировке ионов из плазмы вспомогательного разряда будет неполным при описании процесса генерации электронного пучка. Рост тока I_0 косвенным образом свидетельствует о развитии ВТР со временем, что может быть обусловлено такими процессами как: перезарядка ионов и бомбардировка высоковольтного катода быстрыми нейтралами, отражение ускоренных электронов от анода и ионизация газа вблизи него. Кроме этого, под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения могут развиваться фотоэмиссионные процессы с поверхности катода, однако вклад данного эффекта существенно меньше за счет малого коэффициента электронной эмиссии, при котором плотность рентгеновского фототока не превышает 10^{-7} А/см² [9]. При этом важно отметить, что электроны, рожденные вдали от поверхности катода, будут иметь энергию меньше приложенного ускоряющего напряжения, и при энергии < 70 кэВ у них нет возможности пройти через металлическую фольгу, однако они дают вклад в ток в ускоряющем промежутке.

Резонансная перезарядка ионов в большей степени проявляется до энергий 40 кэВ при максимуме сечения этого процесса. С дальнейшим повышением ускоряющего напряжения сечение взаимодействия уменьшается, и частота перезарядки падает. Однако при этом вероятность перезарядки с атомами гелия при напряжении $U_0 = 150$ кВ и величине параметра $pd = 2$ Па·см² может составлять 20% [1, 9, 140]. Процесс перезарядки приводит к снижению средней энергии ионов и образованию быстрых нейтралов, бомбардирующих катод, что расширяет область возникновения вторичной электронной эмиссии с поверхности катода. Часто в ускорителях с ВТР давление гелия находится в форвакуумной области и составляет $p = (1-5)$ Па, что приводит при напряжении $U_0 = 150$ кВ и зазоре около $d = 10$ см к многократной перезарядке, за счет чего растет эффективный коэффициент вторичной электронной эмиссии [1].

Отражение электронов от анода (в данном случае от анодной решетки) по литературным данным [141–143] может играть существенную роль в механизме зажигания и поддержания ВТР за счет того, что отраженные электроны проходят более длинный путь в разрядном пространстве, потеряв часть кинетической энергии в результате столкновения с анодом, и влияния тормозящего электрического поля со стороны катода. Ионизация отраженными электронами происходит в основном вблизи анода и вызывает появление положительных ионов, энергия которых будет близкой к приложенному ускоряющему напряжению. При энергии быстрых электронов с катода выше 100 кэВ полный коэффициент отражения в зависимости от материала анода составляет 0,15 – 0,9 [143].

Все описанные процессы дают вклад в ток в ускоряющей промежутке, часть которого не выводится в атмосферу за счет конечной геометрической прозрачности анодной решетки (эффективная прозрачность решетки может быть существенно ниже геометрической прозрачности [25, 32]) или недостаточной энергии для пролета через фольгу. В литературе данный ток называют фоновым, который распределен по площади высоковольтного катода, превышающей размеры эмиссионных апертур анодной решетки. Наличие фонового тока повышает эффективность генерации электронного пучка, но снижает эффективность его вывода в атмосферу в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР. Снижение коэффициента вывода пропорционально отношению величины фонового тока к току, который образуют ионы, эмитированные с границы плазмы вспомогательного разряда, и вторичные электроны, образованные данными ионами. Далее будут рассмотрены потери тока электронного пучка на электродах ускорителя как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме.

4.3. Моделирование замыкания заряженных частиц в электродной системе ускорителя

Сложность и большое количество процессов, участвующих в формировании ИЭОС предполагают использование инструментов для её оптимизации. Одним из таких инструментов являются методы численного моделирования, которые

отражают изменения в траекториях заряженных частиц при изменении параметров эмиссионной плазмы. При моделировании траекторий заряженных частиц использовались параметры плазмы, определенные в Главе 3 для непрерывного и импульсно-периодического режимов. Представленные результаты моделирования включают в себя как расчеты в пределах одной щели, так расчет для массива из пяти щелей, поскольку анодная решетка является многоапертурной и необходим учет заряженных частиц, которые могут проходить в области соседних щелей.

С использованием кода КОBRA3-ИП (раздел 2.5) было получено распределение траекторий ионов из эмиссионной плазмы для продольного и поперечного сечения одиночной щели размером 8×100 мм (Рисунок 4.11) [144].

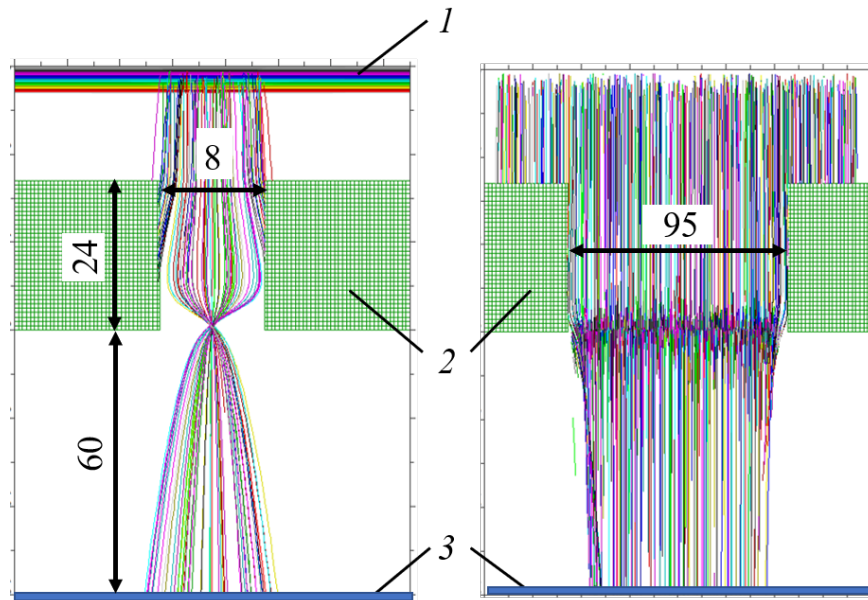


Рисунок 4.11 – Траектории ионов с границы эмиссионной плазмы: *a* – в поперечном сечении щели анодной решетки; *b* – в продольном сечении; *1* – граница эмиссионной плазмы; *2* – анодная решетка; *3* – высоковольтный катод; расчёт кодом КОBRA3-ИП

Поперёк щели за счёт малого размера и сильного градиента напряженности электрического поля вблизи торца решётки, обращенного в сторону ускоряющего промежутка, формируется кроссовер. При этом, в зависимости от условий вспомогательного разряда и потенциала плазмы значительная доля ионов, эмитированных с границы плазмы напротив щели, может замыкаться на ребра

анодной решетки. Размеры образуемого отпечатка ионного пучка на высоковольтном катоде могут быть соизмеримы с поперечным размером щели. При образовании кроссовера реальный размер отпечатка может быть и больше поперечного размера щели, поскольку ионная оптика будет определяться не только геометрическими параметрами решётки, но и энергией ионов. Поэтому потери пучка вторичных электронов необходимо рассчитывать для каждого режима вспомогательного разряда.

В продольном сечении за счет большего размера апертуры и, как следствие, меньшей напряженности электрического поля в данной области отпечаток ионного пучка на высоковольтном катоде получается незначительно меньше, чем размер щели. Таким образом, проведённый траекторный анализ для одиночной щели показывает, что большая часть потерь пучка вторичных электронов локализована в поперечном сечении щелей анодной решетки.

Используя код OOPIC Pro, было получено интегральное распределение ионов в многощелевой системе при задании постоянного потенциала плазмы величиной 200 В для разного ускоряющего напряжения (Рисунок 4.12). По мере повышения ускоряющего напряжения наблюдается фокусировка ионного пучка. При этом, стоит отметить, что для значений ускоряющего напряжения менее 150 кВ ширина ионного пучка на катоде больше поперечного размера щели анодной решетки.

В распределении ионов на поверхности высоковольтного катода определяющую роль, кроме величины ускоряющего напряжения, играет энергия влета ионов в апертуру анодной решетки, которая в свою очередь соответствует потенциалу эмиссионной плазмы относительно полого катода вспомогательного разряда. Представленное на Рисунке 4.13 распределение ионов в зависимости от потенциала плазмы φ_{pl} в диапазоне 50–250 В свидетельствует о том, что повышение потенциала плазмы приводит к расширению области ионной бомбардировки поверхности катода. Выделенные области на рисунке соответствуют участкам высоковольтного катода, с которых вторичные электроны будут выводиться в атмосферу 1, либо будут попадать на электроды и составлять потери генерируемого пучка 2.

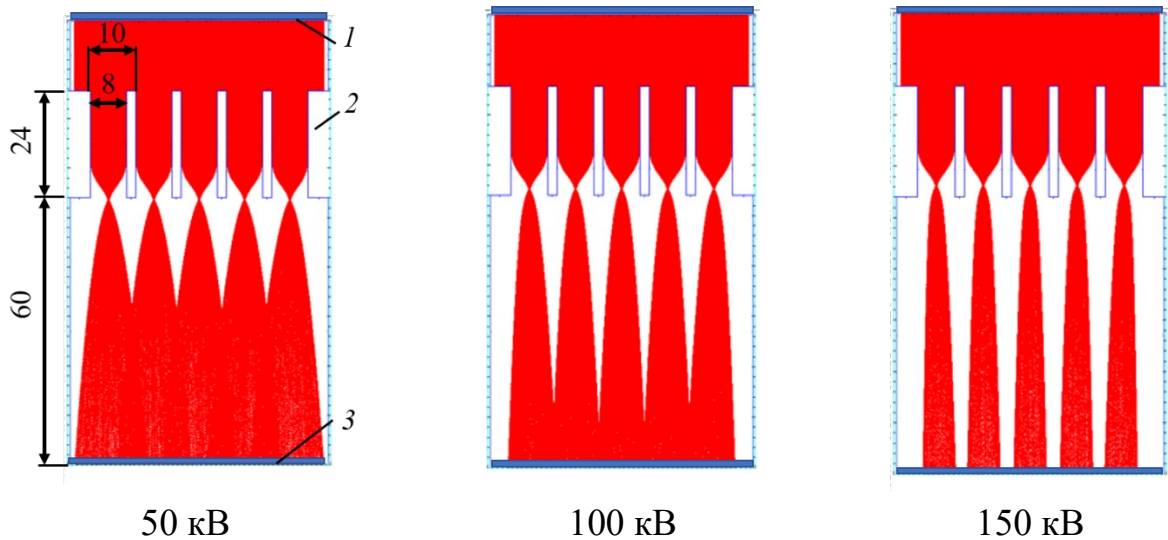


Рисунок 4.12 – Интегральное распределение ионов на поверхности высоковольтного катода в зависимости от величины ускоряющего напряжения: 1 – граница эмиссионной плазмы; 2 – анодная решетка; 3 – высоковольтный катод; расчет кодом OOPIC Pro

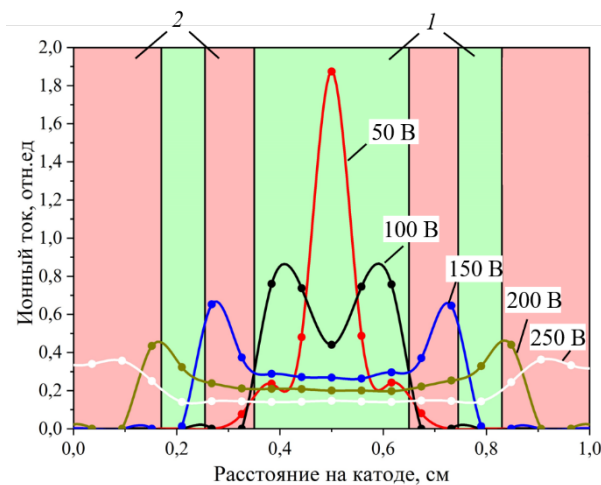


Рисунок 4.13 – Распределение ионов на поверхности высоковольтного катода при разном потенциале плазмы: 1 – область вывода электронного пучка; 2 – область потерь; расчет кодом OOPIC Pro

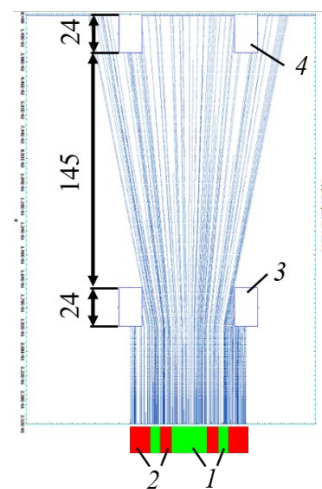


Рисунок 4.14 – Траектории вторичных электронов с катода: 1 – область вывода электронного пучка; 2 – область потерь; 3 – анодная решетка; 4 – опорная решетка; расчет кодом OOPIC Pro

Из Рисунка 4.14 видно, что при равномерной эмиссии вторичных электронов с поверхности высоковольтного катода в пределах одной щели расфокусировка

электронного пучка приводит к тому, что часть электронного пучка выводится в атмосферу через соседние апертуры. Оптимальный потенциал плазмы соответствует $\varphi_{pl} = 50\text{--}100$ В для данной конфигурации электродов ускорителя. В этих условиях распределение ионов имеет меньшую неоднородность, а электронный пучок выводится в пределах одной апертуры опорной решетки.

На Рисунке 4.15 представлена зависимость ионного тока для одной щели от потенциала плазмы при ускоряющем напряжении $U_0 = 100$ и 150 кВ. В кодах хооріс и ООРІС Pro граница плазмы задавалась плоской и не зависела от потенциала, поэтому при минимальных потенциалах плазмы коэффициент прохождения ионов соответствует геометрической прозрачности $0,68$ анодной решетки. В коде КОBRA3-INP положение границы плазмы определялось самосогласованно и, поэтому при потенциалах $\varphi_{pl} < 50$ В наблюдается резкое снижение коэффициента прохождения, которое связано с приближением плазмы к анодной решетке и замыканием большей доли частиц на ее боковые стенки. При этом отсутствует разница между 100 и 150 кВ ускоряющего напряжения U_0 , поскольку решетка имеет глубину канала 24 мм, и электрическое поле не проникает в область генерации вспомогательного разряда.

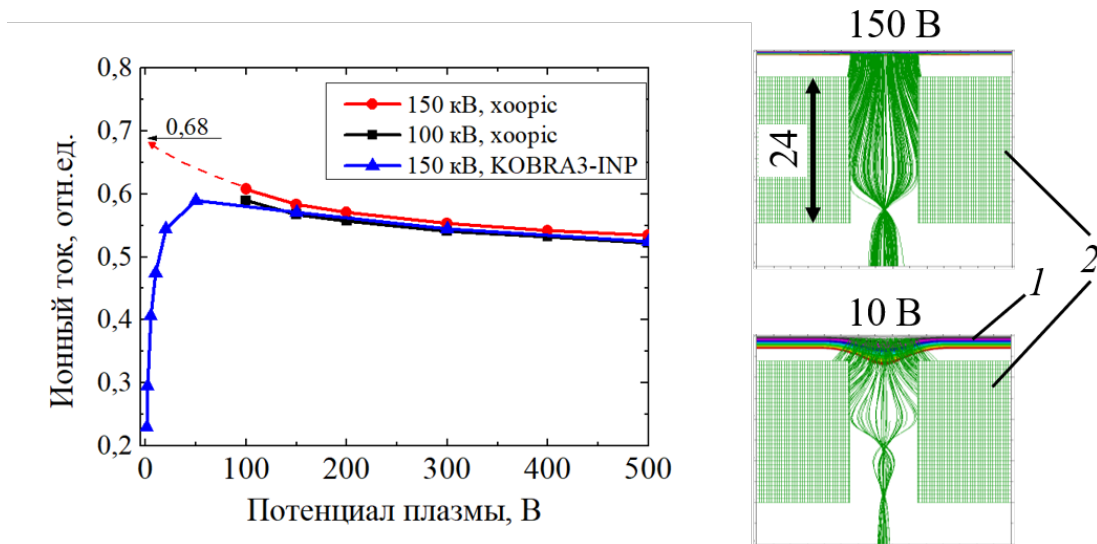


Рисунок 4.15 – Расчетная зависимость прохождения ионов через анодную решетку в зависимости от потенциала плазмы: 1 – граница эмиссионной плазмы; 2 – анодная решетка; расчет кодом хооріс и КОBRA3-INP

Моделирование паузы генерации в импульсно-периодическом режиме заключалось в постепенном снижении потенциала плазмы относительно полого катода. Уменьшение потенциала плазмы приводит к сокращению ширины прикатодного слоя и приближению границы плазмы к анодной решетке. На Рисунке 4.15 показано, что уменьшение потенциала плазмы φ_{pl} с 150 до 10 В способствует замыканию ионов по большей части на анодную решетку, а малая часть от ионного потока, прошедшая в ускоряющий промежуток, становится более сфокусированной. Релаксационные процессы в эмиссионной плазме обеспечивают поставку ионов в ускоряющий промежуток, однако из проведенных расчетов следует, что данные ионы должны создавать вторичные электроны с малым коэффициентом потерь за счет фокусировки. Такой картины не наблюдается в эксперименте, поскольку ток в ускоряющем промежутке в течение паузы остается значительным в сравнении с моментом генерации эмиссионной плазмы, что косвенным образом подтверждает наличие фонового тока ВТР в ускоряющем промежутке.

В соответствии с расчетом распределения ионного пучка на поверхности высоковольтного катода (Рисунок 4.13) и траекторий вторичных электронов был посчитан коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу в зависимости от потенциала плазмы (Рисунок 4.16). Полученные высокие значения коэффициента β обусловлены рассмотрением случая без учета потерь в выводной фольге и фонового тока в ускоряющем промежутке. Видно, что максимальный коэффициент вывода соответствует потенциалу $\varphi_{pl} = 50\text{--}100$ В. Снижение коэффициента вывода обусловлено замыканием электронов, как на анодную, так и на опорную решетку. Пилообразный характер зависимости в диапазоне $\varphi_{pl} = 150\text{--}250$ В связан с выводом электронного пучка через соседние апертуры опорной решетки. Для потенциала плазмы $\varphi_{pl} = 200$ В, который соответствует непрерывному режиму, максимальный расчетный коэффициент вывода составляет $\beta = 0,6$ при доле потерь 0,18 на анодной решетке и 0,22 на опорной. При потенциале $\varphi_{pl} < 50$ В значения β должны быть меньше, поскольку расчет не учитывал приближение плазмы к

апертуре анодной решетки, что приводит к уменьшению количества ионов, проникающих в ускоряющий промежуток.

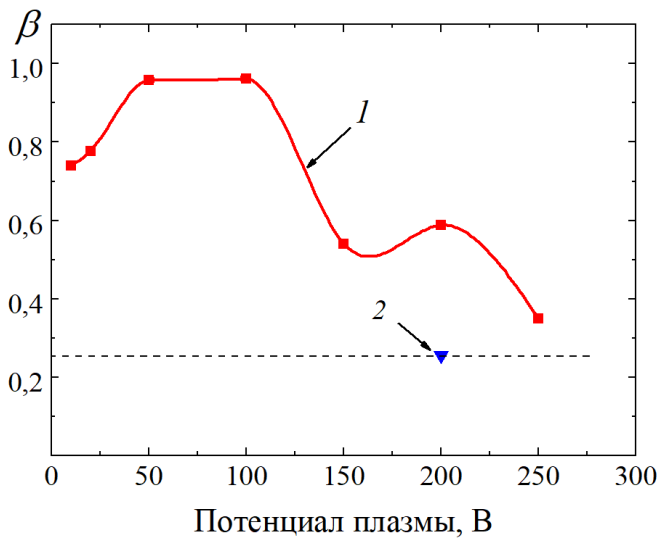


Рисунок 4.16 – Расчетный коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу в зависимости от потенциала плазмы:

1 – коэффициент для ионов из эмиссионной плазмы; 2 – для ионов с боковых стенок апертуры анодной решетки; расчет кодом OOPIC Pro

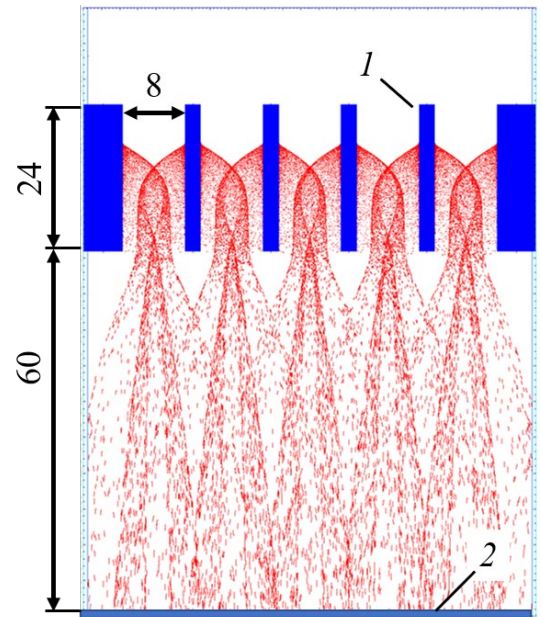


Рисунок 4.17 – Траектории ионов с боковых стенок апертуры анодной решетки: 1 – анодная решетка; 2 – высоковольтный катод; расчет кодом OOPIC Pro

Было сделано предположение, что значительная часть фонового тока может быть сосредоточена в каналах анодной решетки (Рисунок 4.17), поскольку в данной области имеется малый градиент электрического поля, а бомбардировка боковой поверхности анодной решетки ускоренными электронами пучка и ионами из вспомогательного разряда приводит к десорбции газа и локальному повышению давления. Если в модели эмитировать ионы с боковых поверхностей ребер анодной решетки и ускорить их до энергии сравнимой с потенциалом плазмы вспомогательного разряда 200 В, то образованный данными ионами электронный пучок будет иметь сравнительно низкий коэффициент вывода β относительно

электронов, рожденных ионами из плазмы вспомогательного разряда. Малый коэффициент вывода связан с расфокусировкой ионов и бомбардировкой области катода, размеры которой превышают границы апертур анодной решетки.

4.4 Определение потерь электронного пучка на электродах ускорителя

Поскольку величина потерь электронного пучка напрямую определяет эффективность вывода электронного пучка в атмосферу, то необходимо знать или иметь представление о распределении этих потерь внутри электродной системы ускорителя. Для определения потерь тока электронного пучка опорная и анодная решетки были соединены с вакуумной камерой через низкоиндуктивные сопротивления номиналом 10 Ом. С помощью установленных сопротивлений стало возможным регистрировать ток на данных электродах (I_{ag} – ток на анодной решетке и I_{sg} – ток на опорной решетке). Без подачи ускоряющего напряжения, регистрируя ток I_{ag} и I_{sg} , можно оценить распределение тока разряда по электродной системе. В непрерывном режиме генерации из 45 мА в разряде 17 мА замыкается на анодную решетку и 12 мА на опорную (Рисунок 4.18).

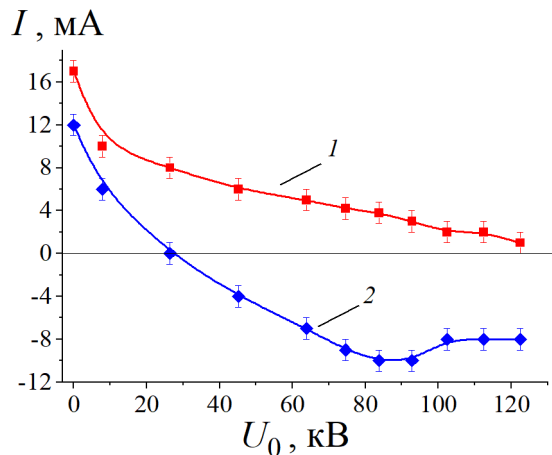


Рисунок 4.18 – Зависимости тока на решетках от величины ускоряющего напряжения в непрерывном режиме генерации: 1 – ток на анодной решетке; 2 – ток на опорной решетке; условия генерации: $I_d=45$ мА, $p=3$ Па

В импульсно-периодическом режиме (Рисунок 4.19) с амплитудой тока вспомогательного разряда 100 мА на опорной и анодной решётках регистрировался

ток амплитудой 20 и 30 мА соответственно. Большая доля тока на анодную решетку связана с расположением анодных проволок, которые находятся на расстоянии по нормали 45 мм от анодной и 100 мм от опорной решетки. При подаче ускоряющего напряжения сигналы на I_{ag} и I_{sg} уменьшаются, поскольку электроны генерируемого электронного пучка обеспечивают протекание тока через резисторы в обратном направлении. Рост тока на опорной решетке после 80 кВ (Рисунок 4.18) связан с выводом пучка в атмосферу и уменьшением количества электронов, оставшихся в фольге. Таким образом, сравнивая сигналы в отсутствие и при генерации пучка, можно оценить долю тока, которая приходится на каждый электрод. Однако при таком расчете сумма в правой части формулы 4.1 оказывается больше $0,9I_0$ на ≈ 10 мА.

$$0,9I_0 = I_b + [I_{a.g.}(0) - I_{a.g.}(U_0)] + [I_{s.g.}(0) - I_{s.g.}(U_0)] \quad (4.1)$$

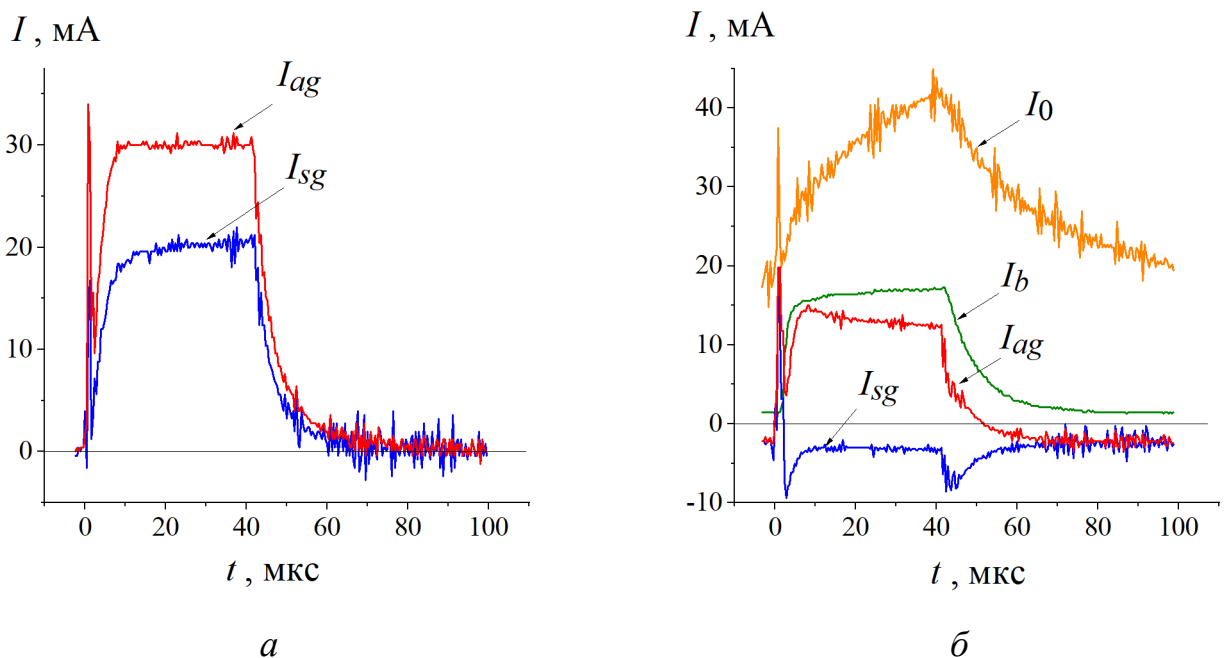


Рисунок 4.19 – Осциллограммы токов в импульсно-периодическом режиме для параметров разряда: *a* – без ускоряющего напряжения $U_0 = 0$; *б* – при $U_0 = 150$ кВ; I_{ag} – ток на анодной решетке, I_{sg} – ток на опорной решетке, I_0 – ток в ускоряющем промежутке, I_b – ток пучка в атмосфере; условия генерации: $I_{dcp} = 40$ мА,

$$f = 10 \text{ кГц}, p = 3 \text{ Па}, D = 0,4$$

Из этого следует, что определение доли тока пучка на электроде путем разности сигналов в отсутствие и при наличии ускоряющего напряжения приводит к большой погрешности, что связано с изменением условий генерации вспомогательного разряда при генерации электронного пучка. Кроме того, при подаче ускоряющего напряжения часть ионов захватываются электрическим полем высоковольтного катода и не замыкаются на анодную решетку. Для подтверждения этой гипотезы была проведена специальная серия моделирований кодом OOPIC Pro в двух геометриях анодной решётки. В первом случае моделировалась анодная решётка, которая полностью соответствовала параметрам, используемым в эксперименте, а во втором случае, эта же решётка закрывалась со стороны ускоряющего промежутка непрозрачным экраном. Сравнение полученных в таком моделировании амплитуд ионного тока, извлекаемого из плазмы вспомогательного разряда на анодную решетку, показало, что снижение ионного тока при подаче ускоряющего напряжения может составить до 30%.

Для демонстрации изменения условий горения разряда было проведено сравнение сигналов при повышении давления рабочего газа (Рисунок 4.20). С повышением давления происходит снижение тока разряда как на анодной, так и на опорной решетке за счет перестроения разряда и снижения неоднородности распределения концентрации плазмы ближе к боковым стенкам цилиндрического полого катода. Таким образом, все меньше ионов замыкается на решетки (центр полого катода вспомогательного разряда) и больше за их пределы, включая боковые поверхности цилиндрического полого катода. Превышение доли тока разряда на анодной решетке над током на опорной решетке соответствует расположению проволочных анодов относительно решеток. Поэтому на опорной решетке изменение тока при варьировании давления более заметно. Таким образом, проведенный эксперимент показывает, что изменение условий горения разряда, например, концентрации плазмы, сопровождается соответствующим изменением распределения тока на электродах системы. Поэтому для более точной оценки доли потерь тока требуется учитывать уменьшение слагаемых $I_{ag}(0)$ и $I_{sg}(0)$ в формуле 4.1 за счет изменения распределения концентрации плазмы в объеме при

генерации электронного пучка, что ранее было продемонстрировано зондовыми измерениями параметров плазмы (раздел 3.3). Кроме этого, при подаче ускоряющего напряжения происходит переключение части ионного потока с анодной решетки на высоковольтный катод, что также влияет на изменение $I_{ag}(0)$.

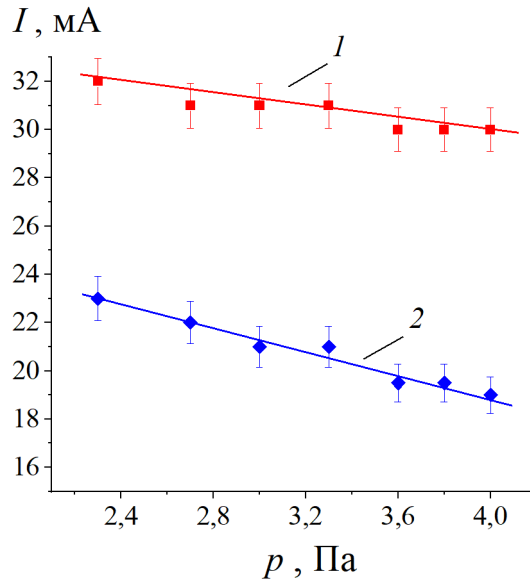


Рисунок 4.20 – Зависимость доли тока вспомогательного разряда при повышении давления в импульсно-периодическом режиме: 1 – ток на анодной решетке; 2 – ток на опорной решетке; условия генерации: $I_{dcp} = 40$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па, $D = 0,4$

В паузе вспомогательного разряда при генерации электронного пучка сигналы на решетках переходят в отрицательную полярность, что говорит о преобладании доли электронного тока пучка над долей тока вспомогательного разряда, однако сигнал в паузу достаточно мал (уровня 50 мВ). Из проведенных ранее экспериментов и расчетов (раздел 3.6) известно, что релаксационные процессы эмиссионной плазмы происходят на протяжении всей паузы генерации, а величина пристеночного падения потенциала существенно уменьшается. Поскольку для измерения тока обе решетки были соединены с вакуумной камерой через сопротивление, то замыкание ионов и электронов на решетки сопровождается соответствующим изменением напряжения на данных сопротивлениях. Замыкание электронов пучка на решетки приводит к появлению

отрицательного смещения относительно вакуумной камеры. Поскольку в паузе величина прикатодного падения значительно падает, то появление отрицательного автосмещения на решетках притягивает ионы разряда из релаксирующей плазмы. Замыкание ионов в свою очередь уменьшает величину протекающего тока через измерительное сопротивление. Таким образом, уменьшению сигналов I_{ag} и I_{sg} в паузе генерации за счет замыкания электронов пучка препятствует создание отрицательного смещения и замыкание ионов из эмиссионной плазмы на анодную и опорную решетки.

Чтобы проверить зависимость потерь тока пучка от толщины анодной решетки была изготовлена решетка толщиной 0,2 мм из нержавеющей стали с щелевой структурой аналогичной используемой решетке толщиной 24 мм (Рисунок 4.21).

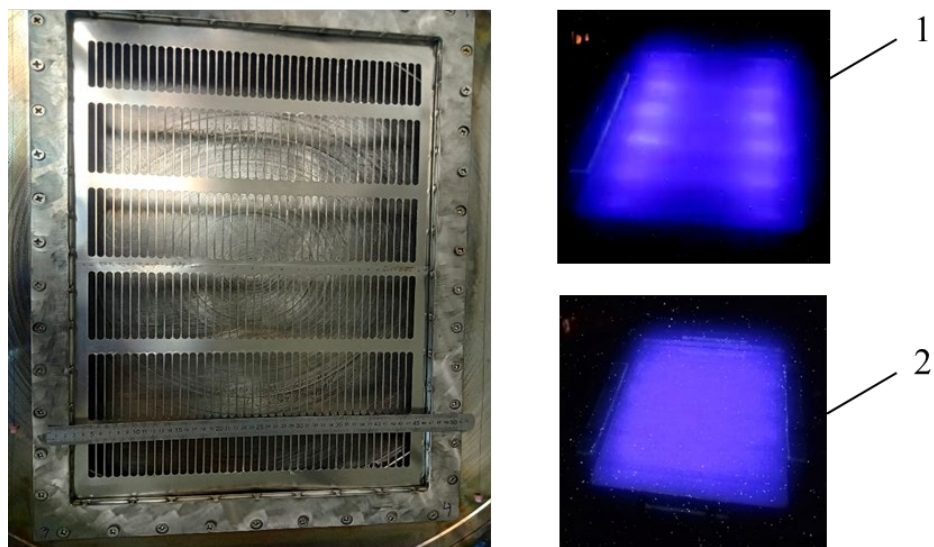


Рисунок 4.21 – Фото анодной решетки толщиной 0,2 мм и фото электронного пучка, выведенного в атмосферу: 1 – решетка без сетки; 2 – решетка с сеткой 1×1 мм

Ввиду технологических требований для лазерной резки и созданной оправы новая решетка имела следующие отличия: по ширине 45 см отсутствовало по два ряда с каждой стороны, по длине 65 см крайние щели уменьшены в длину. Толщина решетки 0,2 мм при ширине щелей 8 мм не позволяет экранировать электрическое

поле ускоряющего промежутка. Проникновение электрического поля в область вспомогательного разряда сопровождается изменением условий генерации и горением разряда преимущественно возле проволочных анодов за пределами анодной решетки. Таким образом, электронный пучок имеет максимум плотности тока напротив проволок. Для экранирования электрического поля ускоряющего промежутка и стабилизации границы анодной плазмы сверху анодной решетки была уложена сетка с размером ячейки 1×1 мм.

Из полученных осциллограмм (Рисунок 4.22а) видно, что ток в ускоряющем промежутке I_0 увеличился примерно на 5 мА относительно стандартной конфигурации. Поскольку толщина решетки в данном случае составляет ~ 1 мм, то, вероятнее всего, в ускоряющий промежуток попадают ионы, движущиеся к решетке под малыми углами. Таким образом, количество ионов, бомбардирующих высоковольтный катод, возрастает, а область эмиссии вторичных электронов с высоковольтного катода расширилась. При этом ионы с малыми углами влета в анодную решетку приводят к вторичной электронной эмиссии с областей катода, находящихся напротив ребер решетки (геометрической тени для электронного пучка).

При сравнении тока выведенного электронного пучка (Рисунок 4.22б) наблюдается снижение амплитуды в момент генерации, что связано с уменьшением геометрической прозрачности при установке сетки с ячейкой 1×1 мм поверх решетки 0,2 мм примерно в два раза. Если учесть уменьшение геометрической прозрачности, то выведенный ток пучка I_b должен составлять около 17 мА по сравнению с 14 мА (пунктирная линия 3 на Рисунке 4.22б). В паузе генерации амплитуда тока пучка становится выше в два раза (на 1 мА), а при учете сетки – в четыре раза, что в свою очередь подтверждает существенные потери ионов на стенках анодной решетки толщиной 24 мм, что было показано в проведенном моделировании (раздел 4.3). К тому же при использовании тонкой анодной решетки отчетливо видна область перегиба на осциллограмме тока пучка в атмосфере после окончания генерации вспомогательного разряда. Данная часть осциллограммы отображает суперпозицию электронного тока, полученного от

потока ионов с границы эмиссионной плазмы, и электронного тока несамостоятельного ВТР (часть сигнала I_0).

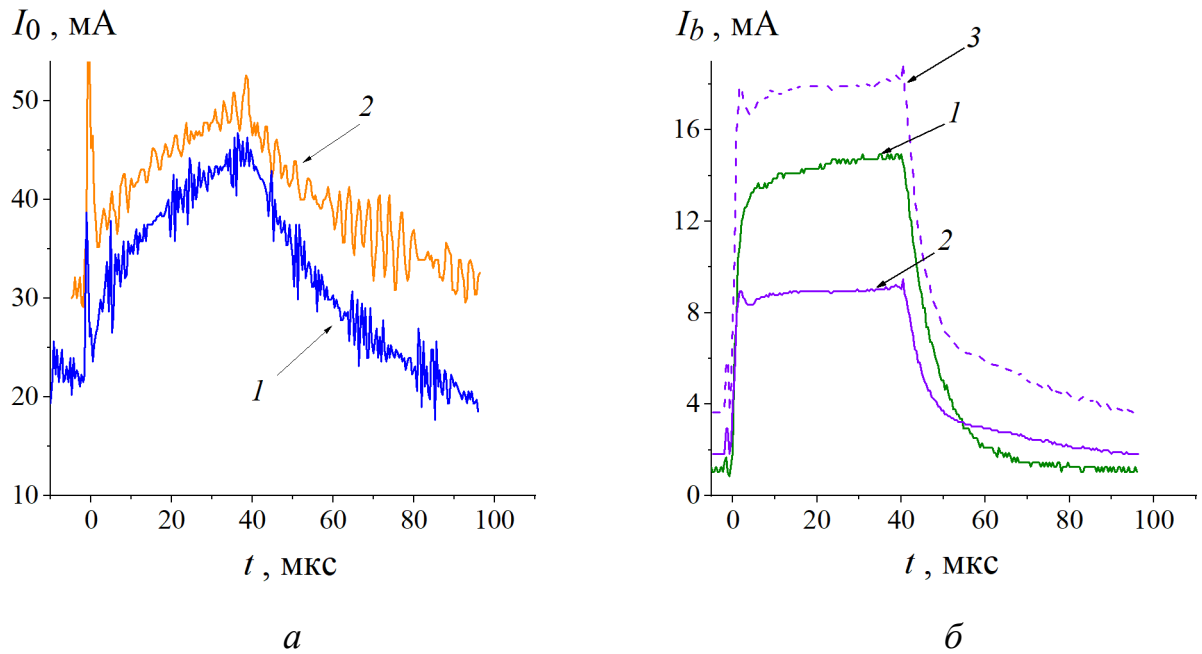


Рисунок 4.22 – Осциллограммы токов для разной толщины анодной решетки:
 а – ток в ускоряющем промежутке; б – ток пучка в атмосфере; 1 – решетка толщиной 24 мм; 2 – решетка 0,2 мм; 3 – учет геометрической прозрачности сетки для кривой 2

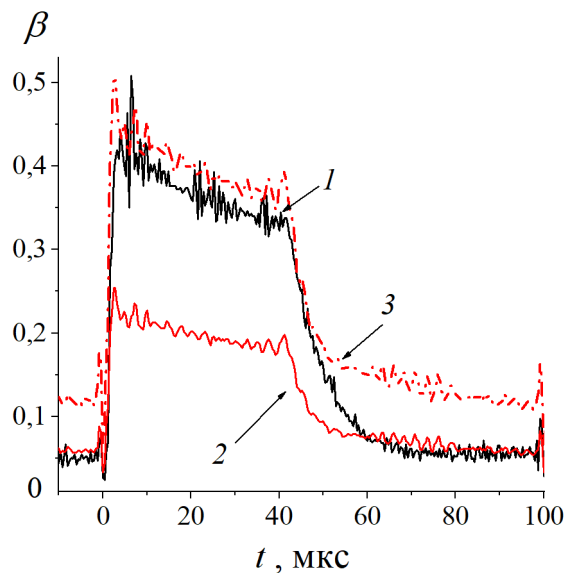


Рисунок 4.23 – Коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу для разной толщины анодной решетки: 1 – решетка толщиной 24 мм; 2 – решетка 0,2 мм; 3 – учет геометрической прозрачности сетки для кривой 2

Уменьшение тока электронного пучка в атмосфере и рост тока в ускоряющем промежутке приводят к снижению коэффициента вывода примерно в два раза в импульсно-периодическом режиме. В паузе генерации коэффициенты равны (Рисунок 4.23). Учет снижения геометрической прозрачности сетки приводит к повышению коэффициента вывода как в течение паузы генерации, так и в паузе несмотря на повышение тока в ускоряющем промежутке. В непрерывном режиме без учета прозрачности сетки наблюдается снижение коэффициента вывода β с 0,22 до 0,15.

Кроме потерь на самой анодной решетке, возможны потери электронного тока за пределами решетки вследствие расширения области бомбардировки поверхности высоковольтного катода. Для оценки фонового тока за пределами анодной решетки в исследуемых режимах генерации электронного пучка вместо решетки была установлена сетка с ячейкой $0,63 \times 0,63$ мм, наполовину закрытая фольгой (Рисунок 4.24). Для регистрации фонового тока напротив уложенной фольги были установлены три коллектора размером 13×2 см и подключены к вакуумной камере ускорителя через сопротивление $5,8$ кОм. Коллекторы устанавливались с шагом $1,5$ см начиная от края закрывающей сетку фольги.

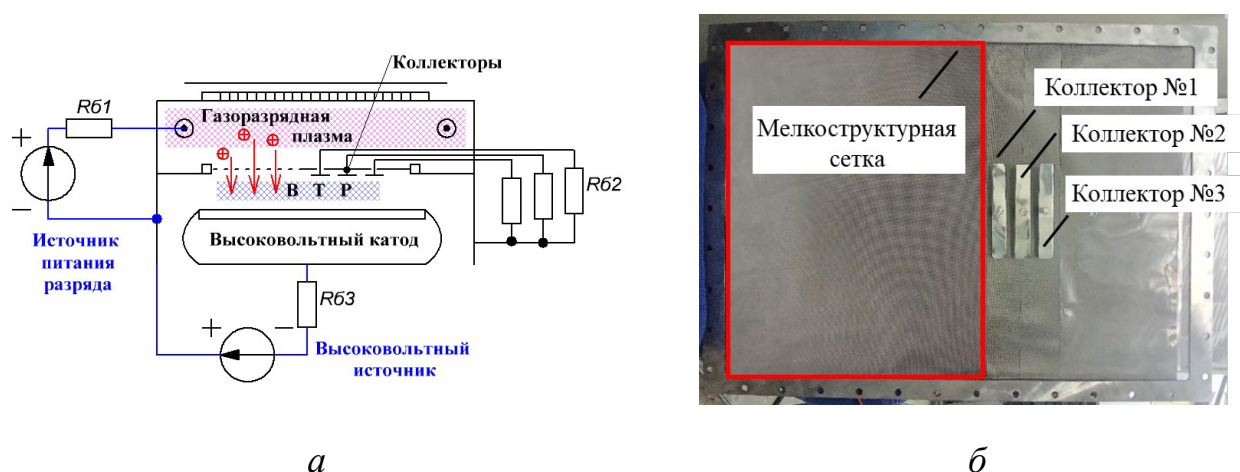


Рисунок 4.24 – Измерение фонового тока за пределами анодной решетки:

а – схема измерения; *б* – фотография установленных коллекторов

Таким образом, измерялось распределение фонового тока на расстоянии 10,5 см от края эмиссионной апертуры в непрерывном режиме генерации вспомогательного разряда (Таблица 4.1).

Из полученных данных следует, что средняя плотность фонового тока при $U_0 = 40$ кВ составляет $0,8$ мкА/см², а при $U_0 = 100$ кВ – $1,1$ мкА/см². Если предположить, что распределение фонового тока равномерно на расстоянии 10 см от каждой стороны решетки, то суммарная площадь, на которой замыкается фоновый ток, составляет ~ 2000 см². Таким образом, фоновый ток за пределами анодной решетки в непрерывном режиме при напряжении $U_0 = 40$ и 100 кВ составляет порядка 5% от общего тока I_0 , а основная его доля сосредоточена в области, ограниченной размерами анодной решетки.

Таблица 4.1 – Распределение фонового тока на коллекторах в зависимости от величины ускоряющего напряжения

Ускоряющее напряжение, кВ	Фоновый ток на каждом коллекторе, мкА		
	Коллектор № 1	Коллектор № 2	Коллектор № 3
40	31	17	12
100	44	26	15

4.5. Исследование неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка

Неоднородность распределения плотности тока выведенного в атмосферу электронного пучка важна для всех типов ускорителей, генерирующих ПБС. Требования к неоднородности зачастую определяются поставленной задачей, для решения которой используется конкретный ускоритель. Например, для возбуждения несамостоятельных газовых разрядов высокого давления требования к неоднородности электронного пучка N могут составлять не хуже $\pm 10\%$ [30]. Кроме того, наименьшая неоднородность позволяет использовать для обработки все поперечное сечение электронного пучка, что повышает скорость проведения процесса облучения.

Для измерения распределения плотности тока электронного пучка, выведенного в атмосферу, использовался созданный секционированный коллектор, а также автоматизированная система измерения, которые описаны в разделе 2.2. Схема расположения секций коллектора относительно напуска рабочего газа и откачки вакуумной камеры представлена на Рисунке 4.25.

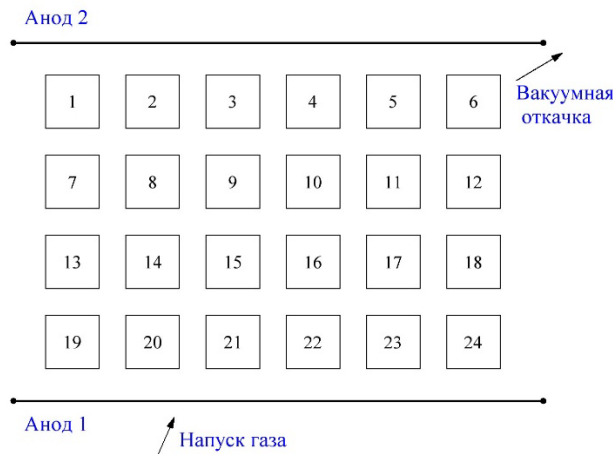
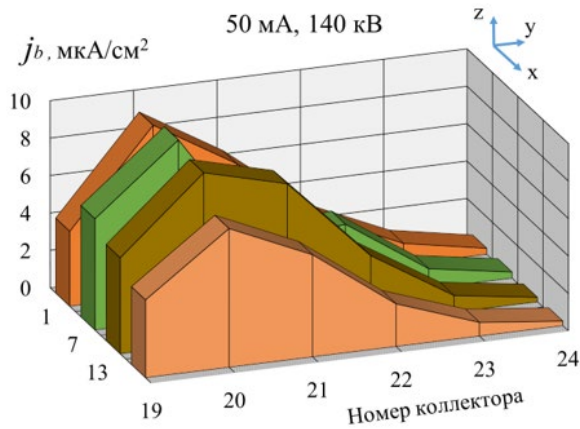


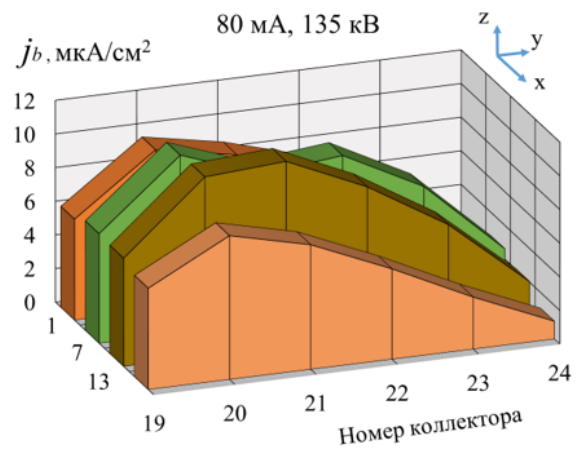
Рисунок 4.25 – Схема нумерации секций коллектора

На Рисунке 4.26 приведено распределение плотности тока электронного пучка, генерируемого в непрерывном режиме вспомогательного разряда [118]. По осям x и y расположены номера коллекторов, а по оси z – плотность электронного тока. Из диаграмм видно, что максимум распределения находится в центре, что объясняется наибольшей эффективностью ионизационных процессов в приосевой области плазменного эмиттера. Однако присутствует смещение плотности тока пучка по длинной стороне в область коллекторов (1, 7, 13, 19), расположенных ближе к напуску рабочего газа. Такое распределение свидетельствует о локальном увеличении концентрации анодной плазмы вспомогательного разряда возле напуска. Повышение амплитуды тока разряда приводит к снижению неоднородности генерируемого электронного пучка, а также росту величины плотности тока пучка. Данные зависимости повторяют изменение концентрации плазмы вспомогательного разряда, которое было получено ранее при измерениях параметров анодной плазмы (раздел 3.3), проведенных зондовым методом. Увеличение ускоряющего напряжения приводит к повышению плотности тока

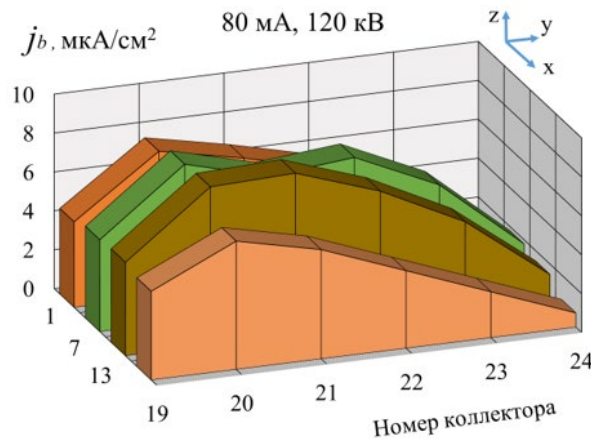
пучка в атмосфере, однако слабо влияет на качественную картину его распределения. При повышении ускоряющего напряжения U_0 с 120 до 135 кВ среднее значение плотности тока j_b увеличилось с 5,2 до 6,8 мкА/см², а неоднородность N снизилась на 5%. В зондовых измерениях также было получено, что существенное влияние вносит лишь сам факт наличия ускоряющего напряжения, а изменение величины напряжения U_0 от 10 до 100 кВ не отражается на получаемых зондовых характеристиках.



а



б



в

Рисунок 4.26 – Распределение плотности тока пучка в атмосфере для разных ускоряющих напряжений и токов вспомогательного разряда, генерируемого в непрерывном режиме: а – $U_0 = 140$ кВ, $I_d = 50$ мА; б – $U_0 = 135$ кВ, $I_d = 80$ мА; в – $U_0 = 120$ кВ, $I_d = 80$ мА

Распределение плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме генерации приведено на Рисунке 4.27. При ускоряющем напряжении 135 кВ было зарегистрировано распределение на 20-ой микросекунде (генерация вспомогательного разряда) и на 72-ой (пауза генерации вспомогательного разряда). Точки измерения распределения указаны на осциллограмме тока пучка на Рисунке 4.28.

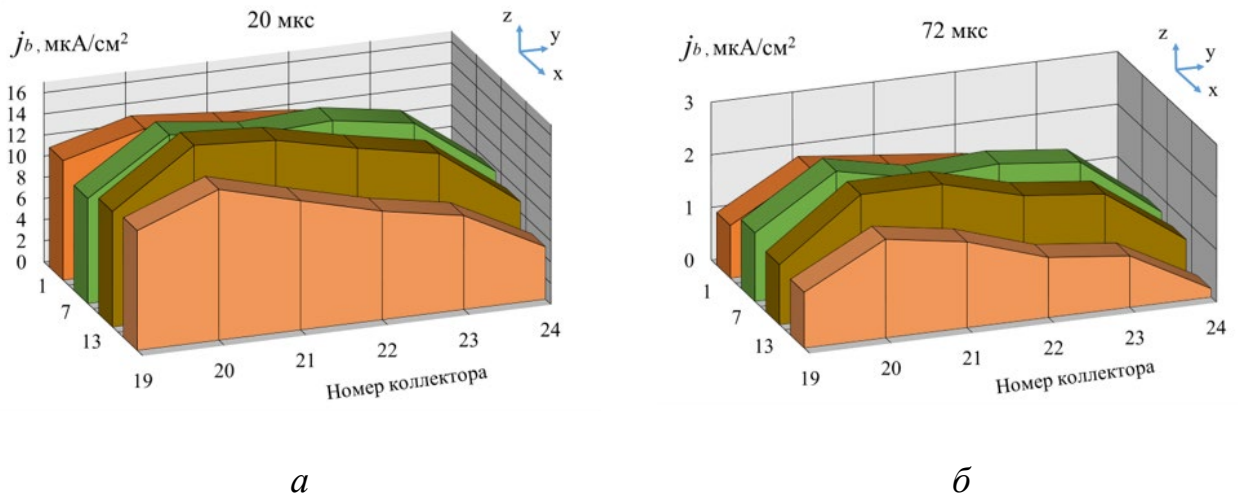


Рисунок 4.27 – Распределение плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме: $I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па, $U_0 = 135$ кВ, $D = 0,4$; *a* – во время генерации на 20 -ой мкс; *б* – в паузе генерации разряда на 72-ой мкс

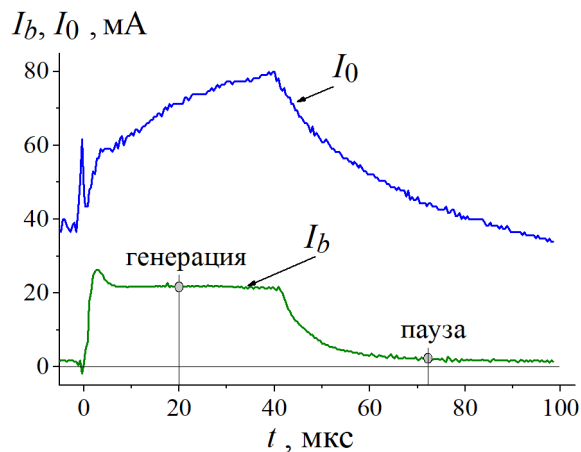


Рисунок 4.28 – Осциллограммы тока в ускоряющем промежутке и тока пучка при определении распределения плотности тока; условия генерации: $I_{dcp} = 80$ мА, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па, $U_0 = 135$ кВ, $D = 0,4$

Из диаграмм видно, что распределение в импульсно-периодическом режиме генерации ($f = 10$ кГц) также смещено в сторону напуска рабочего газа, однако по сравнению с непрерывным режимом генерации зависимость от напуска становится менее выраженной. При переходе с непрерывного режима $I_d = 80$ мА в импульсно-периодический: $f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 80$ мА, $D = 0,4$ неоднородность электронного пучка N по сечению снижается на 20 %. Средняя плотность тока пучка в атмосфере в импульсно-периодическом режиме генерации вспомогательного разряда остается такой же величины, как и в непрерывном режиме $j_b \approx 6$ мкА/см². При этом в течение генерации вспомогательного разряда неоднородность составляет ± 30 %, а в паузе достигает ± 60 %. В силу низкого значения тока пучка в паузе по сравнению с моментом генерации вспомогательного разряда, влияние распределения тока пучка в паузе будет незначительно влиять на облучение материалов, поэтому далее оно не определялось.

С уменьшением частоты следования импульсов с 20 кГц до 10 кГц при постоянном значении D наблюдается меньшая неоднородность распределения тока пучка, что связано с более длительной генерацией эмиссионной плазмы и ее возможностью равномернее заполнить заданный объем. Генерация разряда в импульсно-периодическом режиме: $f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 50$ мА, $D = 0,2$ позволяет выводить электронный пучок в атмосферу с неоднородностью $N = \pm 15\%$, что является лучше вышеописанного режима ($f = 10$ кГц, $I_{dcp} = 80$ мА, $D = 0,4$), обладающего бóльшим средним током разряда. Из этого следует, что уменьшение коэффициента заполнения импульса при неизменном среднем значении тока разряда позволяет за меньшее время получить электронный пучок с меньшей неоднородностью плотности тока.

Система коллекторных измерений (раздел 2.2) позволяет регистрировать ток пучка каждую микросекунду. На Рисунке 4.29 приведена динамика (каждые 4 мкс) электронного пучка в течение одного периода генерации вспомогательного разряда, зарегистрированная на коллекторах 7–12. Полученная диаграмма повторяет осциллограмму тока выведенного пучка, и позволяет оценить неоднородность выводимого пучка в течение одного периода генерации

вспомогательного разряда. Видно, что время развития электронного пучка составляет 8 мкс, после выключения вспомогательного разряда на 40-ой мкс происходит плавный спад тока пучка. Зарегистрированный ток пучка в паузе генерации вспомогательного разряда подтверждает превышение времени релаксационных процессов эмиссионной плазмы над временем паузы между импульсами с частой следования f более 1 кГц (раздел 3.6). Малые значения тока пучка обусловлены снижением прикатодного падения потенциала и уменьшением количества ионов, прошедших в ускоряющий промежуток, а также значительными потерями тока электронного пучка на ребрах анодной решетки, что было показано в моделировании (раздел 4.3).

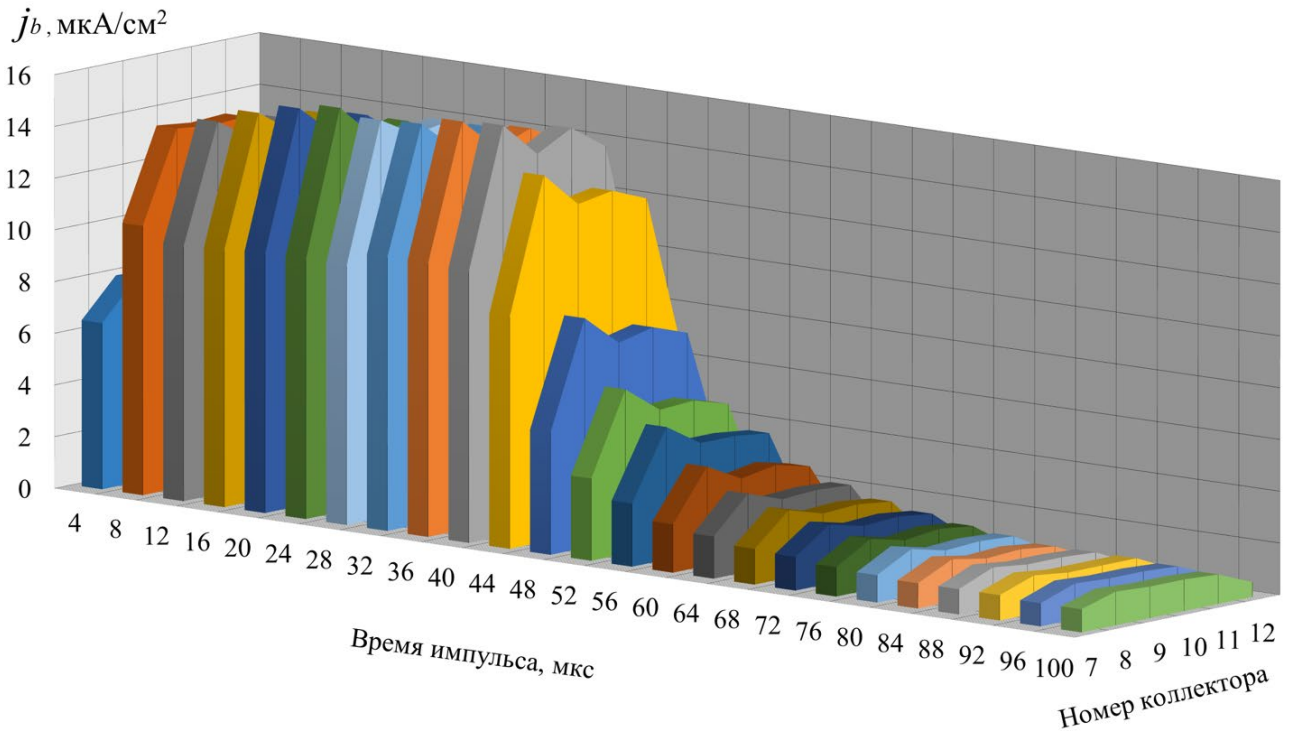


Рисунок 4.29 – Диаграмма изменения распределения плотности тока электронного пучка на коллекторах 7–12 в импульсно-периодическом режиме:

$$I_{dcp} = 80 \text{ мА}, U_0 = 135 \text{ кВ}, f = 10 \text{ кГц}, p = 3 \text{ Па}, D = 0,4$$

4.6. Калориметрические исследования электронного пучка

Одним из важных параметров любого электронного пучка является его средняя мощность, которую определяют, в том числе, с помощью калориметров

разного типа. По описанной в разделе 2.3 методике, используя проточный калориметр, была измерена мощность электронного пучка, выведенного в атмосферу, в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации вспомогательного разряда (Таблица 4.2). Для импульсно-периодического режима колонка I_d в Таблице 4.2 соответствует средним значениям тока разряда. Необходимо отметить, что, если сравнивать полученную из калориметрии мощность выведенного в атмосферу пучка W_b и расчетную мощность W_{bc} , равную произведению среднего тока пучка и ускоряющего напряжения, то несовпадение значений составляет от 20 до 60%.

Таблица 4.2 – Значения мощности электронного пучка в атмосфере W_b , на опорной решетке W_{sg} и мощности в ускоряющем промежутке W_{acc}

Параметры генерации вспомогательного разряда		Режим генерации	W_b	W_{sg}	W_{acc}	W_{bc}
I_d , мА	D		кВт			
50	–	Непрерывный $p = 3$ Па	0,8	1,1	4,8	1,1
100	–		1,0	1,9	8,6	1,6
50	0,2	Импульсно-периодический $f = 10$ кГц $p = 3$ Па	0,8	1,4	6,1	1,0
50	0,4		0,7	1,3	5,2	1,1
70	0,4		0,9	1,8	6,3	1,4
100	0,4		1,0	1,9	8,6	1,6

Такое несовпадение значений объясняется в первую очередь расширением энергетического спектра пучка при его выводе в атмосферу, а также смещением максимума спектра в область меньших энергий электронного пучка [145, 146]. В работе [147] приведены кривые расширения энергетического спектра в диапазоне энергий 110–160 кэВ на расстоянии 15 мм от выводной фольги, полученные с использованием фольгового фильтра и применением метода регуляризации Тихонова. Из Рисунка 4.30 видно, что электронный пучок с энергией 140 кэВ после

вывода в атмосферу приобретет энергетический спектр с максимумом энергии ≈ 90 кэВ, а с энергией 130 кэВ имеет максимум ≈ 70 кэВ. Если для расчета W_{bc} использовать значения энергии электронов, соответствующие максимуму приведенного распределения, то наблюдается совпадение с результатами проведенной калориметрии с точностью $\pm(5-10)\%$.

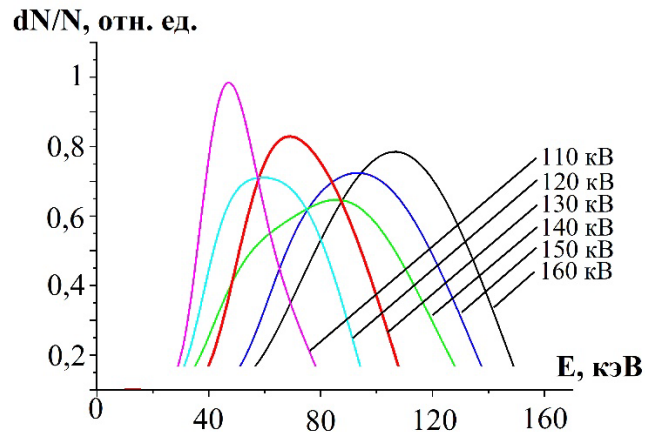


Рисунок 4.30 – Энергетические спектры электронного пучка, выведенного в атмосферу, при различных ускоряющих напряжениях; условия эксперимента: выводная фольга АМГ-2н толщиной 30 мкм, расстояние от фольги до коллектора 15 мм [147]

Кроме измерения калориметром (раздел 2.3) мощности пучка, выведенного в атмосферу, была измерена мощность потерь электронного пучка на опорной решетке. Поскольку ВФО охлаждается водой через каналы в опорной решетке, то проводилось измерение температуры воды и ее расхода, как в случае проточного калориметра. Средняя мощность в ускоряющем промежутке рассчитывалась через произведение среднего тока I_0 на величину напряжения в ускоряющем промежутке с учетом падения напряжения на балластном сопротивлении R_{2b} (Рисунок 2.1), которое в условиях эксперимента могло достигать 10 кВ.

Распределение потерь мощности электронного пучка можно расписать по следующему выражению:

$$W_{acc} = W_{ag} + W_{sg} + W_b \quad (4.2)$$

При этом необходимо учитывать, что в слагаемом W_{sg} находятся потери электронного пучка в выводной фольге, а из суммарной мощности в ускоряющем промежутке нужно вычитать ионную компоненту, которая составляет около 10% и долю потерь фонового тока за пределами анодной решетки 5%. Учитывая вышеописанное, около 50% мощности электронного пучка теряется на анодной решетке во всех представленных в Таблице 4.2 режимах генерации. Большие потери пучка на анодной решетке свидетельствуют как о неоптимальной электронной оптике при большой толщине анодной решетки, так и о существенном вкладе фонового тока ВТР в области анодной решетки ускоряющего промежутка. Оценим долю потерь мощности, образованную фоновым током. Для этого из полученной на анодной решетке мощности необходимо вычесть долю, которая приходится на электроны, генерируемые ионами из плазменного эмиттера. В качестве примера рассмотрим случай непрерывного режима с $I_d = 50$ мА (Таблица 4.2). При учете 10% ионной компоненты I_0 и 5% за пределами анодной решетки мощность в ускоряющем промежутке W_{acc} составляет 4,1 кВт. Согласно уравнению 4.2, вычитая мощность на опорной решетке W_{sg} и, выведенную в атмосферу W_b , получаем потери мощности на анодной решетке $W_{ag} = 1,9$ кВт. Согласно Рисунку 4.13 доля потерь электронного пучка на анодной решетке составляет $\approx 0,2$ для потенциала плазмы 200 В, что соответствует 0,8 кВт от мощности в ускоряющем промежутке W_{acc} . Таким образом, отнимая 0,8 кВт из мощности на анодной решетке W_{ag} , получаем 1,1 кВт от фонового тока, что составляет 26% от общей мощности в ускоряющем промежутке. Для представленных в Таблице 4.2 режимов доля потерь мощности, связанная с фоновым током, составляет от 0,2 до 0,35.

Для снижения фонового тока ВТР и потерь, связанных с ним можно вынести несколько рекомендаций: размер отпечатка ионов на высоковольтном катоде для одной апертуры должен быть меньше ширины щелевого отверстия анодной решетки; снизить рабочее давление газа для уменьшения ионизационных процессов в ускоряющем промежутке; генерировать эмиссионную плазму короткое время, недостаточное для развития фонового тока ВТР.

4.7. Управление отбором ионов из эмиссионной плазмы в паузу генерации вспомогательного разряда

Ранее было показано, что повысить коэффициент вывода пучка в атмосферу возможно путем уменьшения коэффициента заполнения импульса вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме, однако при $D < 0,5$ пауза занимает большую часть периода генерации, а β в это время составляет около 0,05. Малые значения коэффициента вывода в паузу связаны с низким потенциалом плазмы при релаксационных процессах эмиссионной плазмы, а также с медленным спадом тока в ускоряющем промежутке. Поскольку одним из определяющих факторов ионно-электронной оптики является энергия влетающих в анодную решетку ионов, то кажется логичным решением подать напряжение смещения на анодную решетку относительно вакуумной камеры в течение паузы генерации вспомогательного разряда. Таким образом, отрицательное смещение потенциала на решетке должно поддерживать поступление ионов в ускоряющий промежуток с установленной энергией, а замыкание электронов на остальные стенки вакуумной камеры будет обеспечивать снижение накопленного положительного заряда на диэлектрических включениях, и тем самым снижать вероятность возникновения катодных пятен. Реализованная схема подключения источника смещения представлена на Рисунке 4.31.

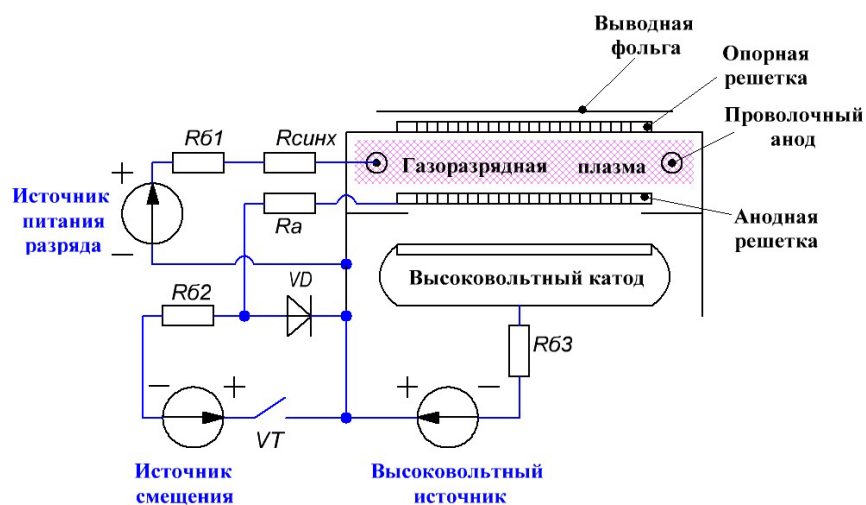


Рисунок 4.31 – Схема подключения источника смещения анодной решетки

После прекращения генерации импульса разряда, ток в цепи разряда начинает спадать за время ~ 20 мкс, после чего с помощью сопротивления $R_{сунх}$ и инверсии оптического сигнала происходит переход транзистора VT с «закрытого» состояния в «открытое», и анодная решетка приобретает отрицательный потенциал 50 – 200 В относительно стенок вакуумной камеры от источника смещения. Данная схема позволяет после генерации импульса вспомогательного разряда от основного источника питания перейти от конфигурации с полым катодом к системе с полым анодом, где полым анодом являются боковые стенки вакуумной камеры и опорная решетка, а катодом выступает анодная решетка. При этом отношение площади анода к площади катода S_a/S_c изменяется с 0,0008 на 6, вследствие чего уход электронов на анод перестает быть затруднительным, однако для поддержания разряда требуется напряжение более нескольких сотен вольт.

При смещении -100 В на анодной решетке определялось распределение плотности тока выведенного электронного пучка (Рисунок 4.32). Видно, что распределение имеет два характерных максимума на краях сечения пучка, расположенных в области анодных проволок вспомогательного разряда. По мере генерации разряда (Рисунок 4.32б) плотность тока пучка повышается и достигает некоторого установившегося значения как на краях, так в центральной области пучка, при этом два максимума плотности тока остаются. В паузу генерации вспомогательного разряда подключается источник смещения потенциала анодной решетки, плотность тока пучка снижается и равномернее распределяется по сечению (Рисунок 4.32в). Видно, что $U_{см} = -100$ В недостаточно для поддержания горения разряда, происходит лишь релаксация плазмы. Наличие смещения потенциала способствует поддержанию приэлектродного слоя и отдаления плазмы от решетки в паузу генерации, при этом разряд развивается от проволочных анодов к центру полого катода в течение импульса.

Повышение напряжения смещения в паузу генерации разряда приводит к увеличению длительности фронта тока выведенного пучка (Рисунок 4.33а). Чем выше напряжение смещения в паузе, тем дальше от анодной решетки отдалится плазма. По мере генерации разряда концентрация плазмы в центре полого катода

увеличивается и в ускоряющий промежуток поступает больше ионов, генерируя больше вторичных электронов. Таким образом, длительный фронт тока пучка связан с перестроением разряда с области анодных проволок в центр полого катода.

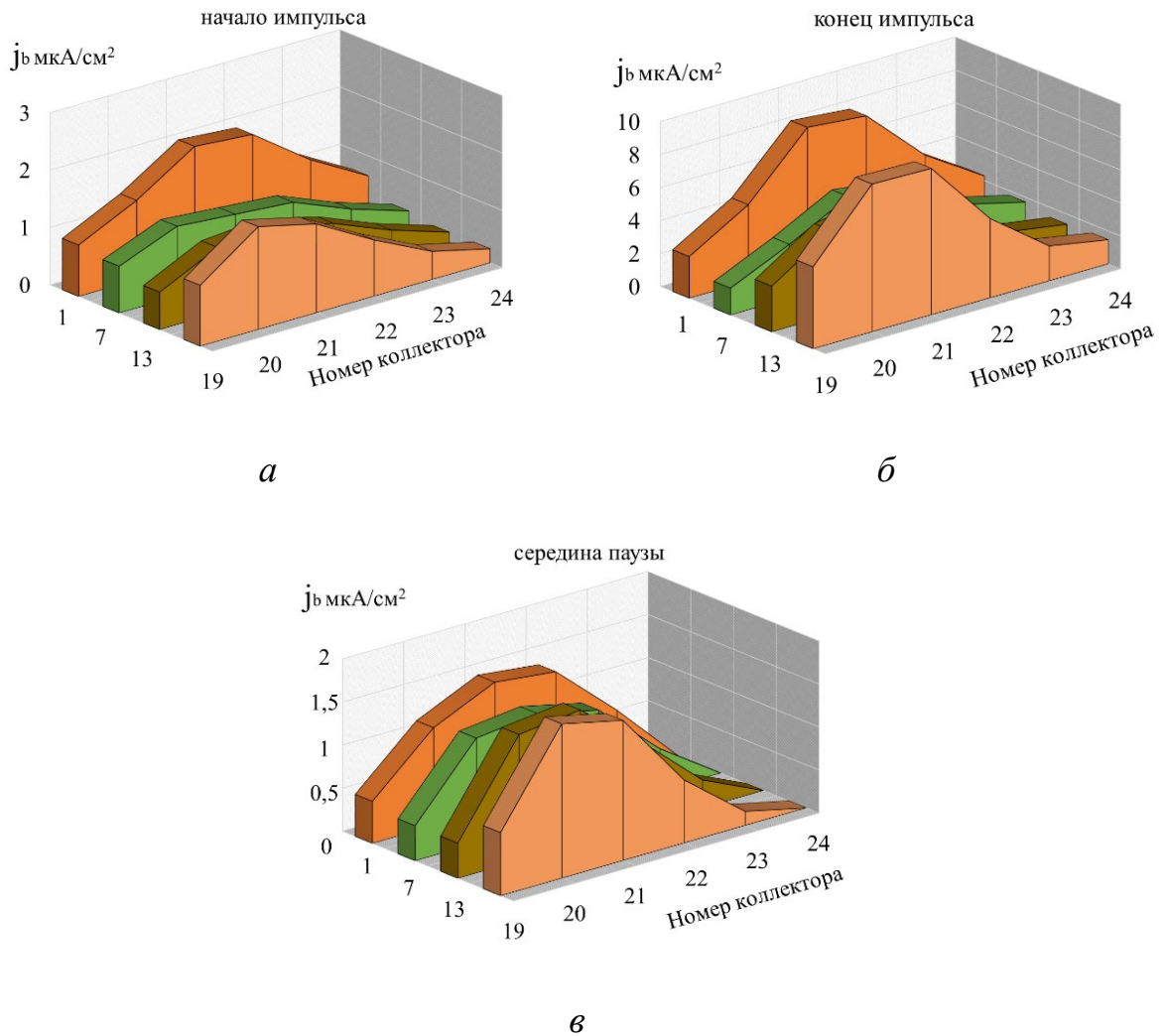


Рисунок 4.32 – Диаграммы распределения плотности тока электронного пучка при смещении -100 В анодной решетки относительно вакуумной камеры: *a* – в начале импульса; *б* – в конце импульса; *в* – в середине паузы; условия генерации разряда: $I_{dcp} = 50$ мА, $f = 10$ кГц, $U_0 = 135$ кВ, $p = 3$ Па, $D = 0,4$

Повышение выведенного тока пучка в паузу генерации с $I_b=2,5$ до $I_b=5$ мА наблюдается для смещения $U_{cm}=50$ и $U_{cm}=100$ В. Включение источника смещения влияет на измеряемый сигнал тока в ускоряющем промежутке (Рисунок 4.33б), однако видна тенденция по уменьшению среднего тока I_0 , что является следствием

горения вспомогательного разряда на периферийной области вблизи проволочных анодов. В начале импульса изменения I_0 связаны с перестроением разряда, поскольку изменяется соотношение площадей для замыкания генерируемого тока и происходит наработка плазмы в центральной области цилиндрического полого катода.

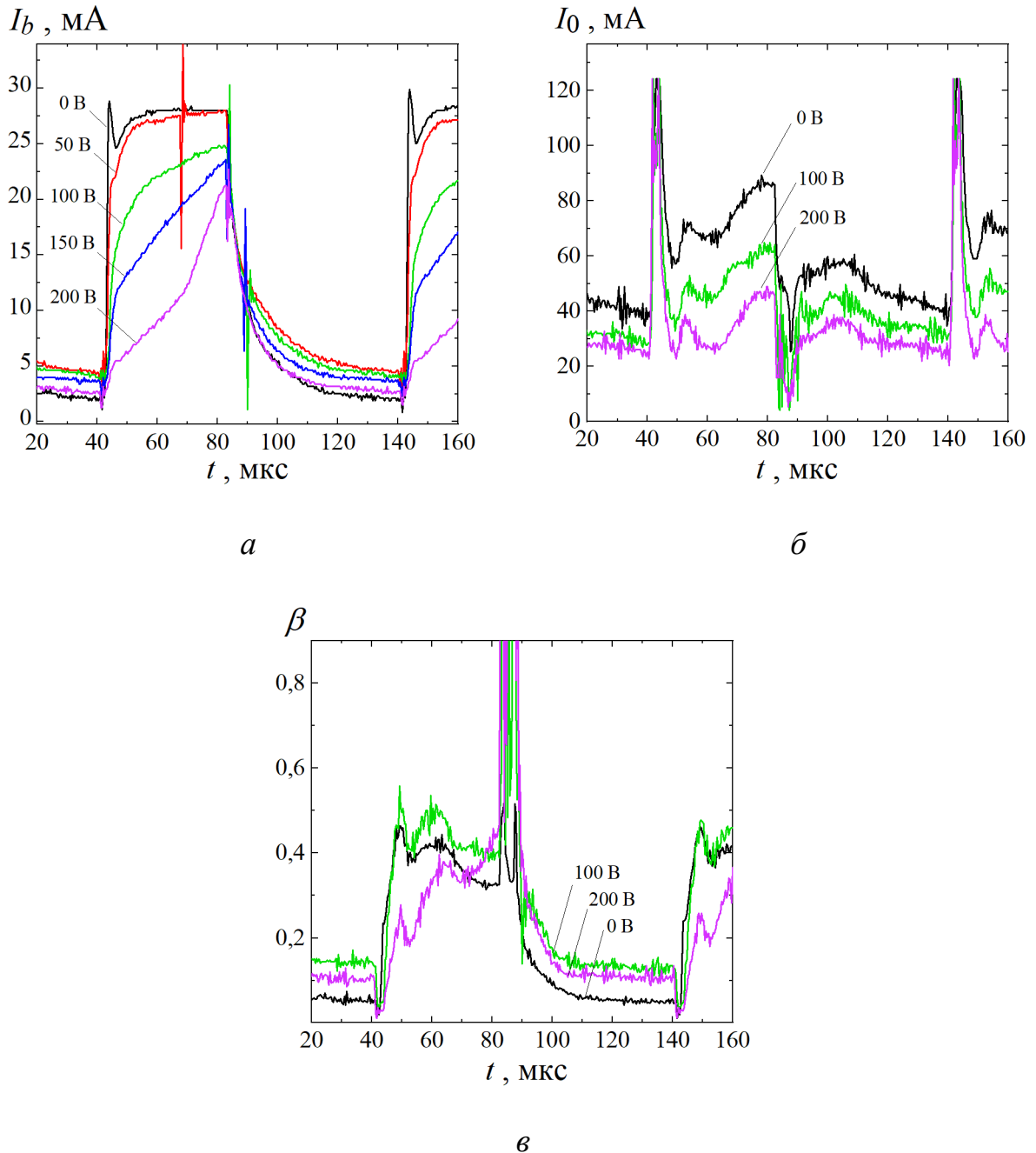


Рисунок 4.33 – Осциллограммы тока в зависимости от приложенного напряжения смещения анодной решетки в паузу генерации: *a* – ток пучка в атмосфере; *б* – ток в ускоряющем промежутке; *в* – коэффициент вывода

После окончания импульса происходит подключение источника смещения, что вызывает соответствующую наводку на измерительном шунте. Немонотонная зависимость β (Рисунок 4.33в) получается в соответствии с измеренным сигналом I_0 , однако при этом в паузе генерации наблюдается повышение коэффициента вывода пучка в атмосферу β с 0,05 до 0,15, что связано как с повышением амплитуды тока выведенного пучка, так и уменьшением среднего значения I_0 .

Наилучший результат наблюдался при смещении 50–100 В, что коррелирует с проведенным в разделе 4.3 моделированием, однако подача смещения на анодную решетку в паузу генерации вспомогательного разряда требует дальнейшего исследования.

4.8. Электронно-пучковая обработка сельскохозяйственного посевного материала

Выведенный в атмосферу ПБС позволяет обрабатывать материалы, объем и размеры которых превышают габариты вакуумной камеры, что достигается использованием конвейеров или специальных систем прокачки жидкости и газа. Помимо таких применений низкоэнергетических ПБС как накачка газовых лазеров [18–20], отверждение полимерных покрытий [10, 11], инициирование плазмохимических процессов [14–16] и стерилизация объектов медицинского назначения [6, 17], актуальным направлением является радиационная обработка пищевых продуктов, а именно посевного материала с целью его обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы [21, 22, 148].

Увеличение производства сельскохозяйственной продукции и улучшение ее качества является одной из важнейших задач обеспечения продовольственной безопасности любого государства. Потери заложенного на хранение зерна могут достигать более 10% [149, 150], что связано с поражением зерновых культур как насекомыми-вредителями, так и болезнями. В современных технологических процессах, как правило, применяют химическую обработку сельскохозяйственной продукции, использование которой сопряжено с негативными побочными последствиями (загрязнение окружающей среды, негативное влияние на здоровье

людей, сложность обращения с токсическими препаратами и высокая стоимость). Это определяет необходимость внедрения более эффективных и экологически безопасных технологий, среди которых перспективными являются радиационные технологии с использованием электронного облучения.

Главными характеристиками электронного облучения является энергия электронов и величина поглощенной дозы в обрабатываемом материале. Поскольку глубина проникновения электрона в материал напрямую определяется его энергией, то важным фактором для ПБС, выведенных в атмосферу, является энергетический спектр пучка, который расширяется при взаимодействии с молекулами и атомами воздуха. Обработка электронными пучками с энергиями до 300 кэВ позволяет воздействовать на материалы, не оказывая при этом существенного влияния на глубине более 1 мм. Как известно [21, 149], именно предпосевная обработка поверхностного слоя зерна является одной из наиболее актуальных задач, поскольку, в данном случае, воздействие низкоэнергетического электронного пучка позволяет проводить дезинфекцию и дезинсекцию поверхности зерна, не только не повреждая зародыш, но и обеспечивая его стимуляцию за счет стрессового воздействия тормозного рентгеновского излучения.

Для определения распределения поглощенной дозы в зерне было проведено моделирование, результаты которого представлены на Рисунке 4.34 [22]. В используемом коде EPNCA2 [23, 151] область моделирования состояла из нескольких слоев: алюминиевая фольга 30 мкм, слой воздуха 30 мм, слой углерода 1 мм (имитирует сплошной одинарный слой зерен) с плотностью равной плотности зерна пшеницы 1,3 г/см³. Видно, что основная часть электронов с начальной энергией до 160 кэВ поглощается во внешнем слое углерода толщиной менее 250 мкм (семенная оболочка зерна), там же сосредоточена основная поглощенная доза. Внутренняя часть углеродного слоя (эндосперм) облучается существенно меньше. Основным источником дозы во внутренней части – тормозное рентгеновское излучение, генерируемое во внешнем слое зерна и, в значительно меньшей степени в фольге выводного окна.

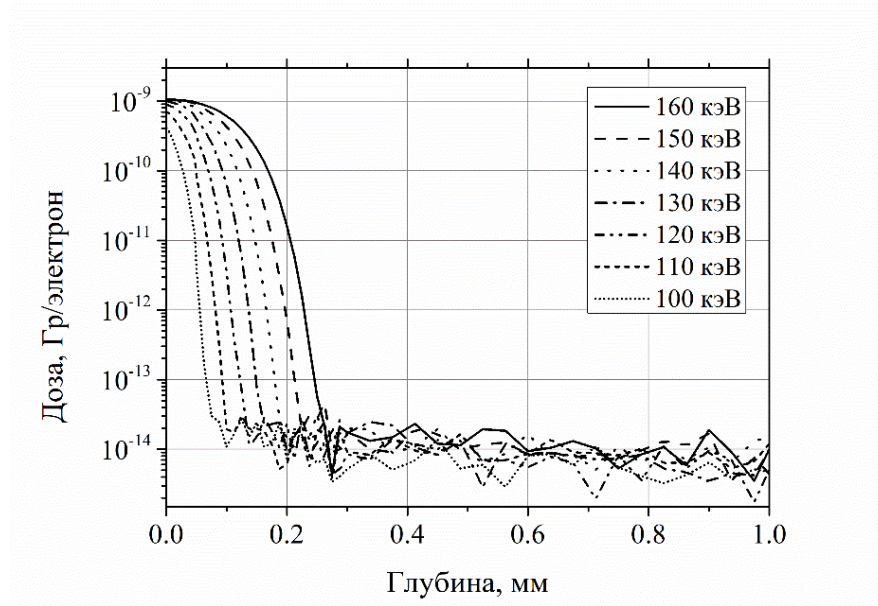


Рисунок 4.34 – Распределение поглощенной дозы в модельном слое пшеницы в зависимости от начальной энергии электронов

Представленный Рисунок 4.34 демонстрирует распределение поглощенной дозы, приведенной к одному электрону для диапазона энергии 100–160 кэВ. Для оценки суммарной поглощенной дозы один импульс пучка можно воспользоваться следующим выражением:

$$D = (j \times t_{pulse} \times D_e) / q_e \quad (4.3)$$

где j – плотность электронного тока пучка, D_e – поглощенная доза, приведенная к одному электрону, t_{pulse} – длительность импульса, q_e – заряд электрона. Результаты моделирования согласуются с проведенным измерением поглощенной дозы с помощью образцов пленочных дозиметров СО ПД(Э)-1/10 (поглощенная доза 1–10 кГр, размер 10×30 мм, погрешность измерения $\leq 15\%$). Стандартный образец представляет собой упаковку, в которой находятся три пленки. Каждая пленка имеет основу из лавсана толщиной 100 мкм и чувствительный слой 30 мкм. Поскольку при энергиях электронного пучка 100 – 200 кэВ длина пробега электронов сравнима с толщиной пленки, то облучение стопки пленок позволяло измерить распределение дозы по глубине.

Результаты исследований по оценке эффективности предпосевного облучения семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком показали, что для стимулирования всхожести, роста и развития растений яровой пшеницы, а также для поверхностного обеззараживания семян оптимальными являются разные режимы облучения [22]. Несовпадение параметров облучения, обуславливающих ростостимулирующие и бактерицидные эффекты является одной из серьезных проблем, возникающих при разработке оптимальных режимов предпосевного облучения семян быстрыми электронами. Как правило, для стимулирования всхожести семян и ускорения последующего роста и развития растений оптимальными являются более мягкие режимы облучения (энергией электронов 100 – 130 кэВ и поглощенной дозой в поверхностном слое зерна до 15 кГр), которые, к сожалению, не оказывают достаточно сильного воздействия на фитопатогенную микрофлору, колонизирующую поверхностные и подповерхностные оболочки семян. При энергии электронов более 130 кэВ, независимо от дозы облучения, были отмечены эффекты снижения всхожести семян пшеницы, а облучение зерна электронным пучком с энергией электронов 160 кэВ приводило к нулевой всхожести семян.

С другой стороны, выполненные исследования подтвердили нелинейный характер зависимости между интенсивностью облучения семян и откликом фитопатогенной микрофлоры, что обуславливает необходимость более детального исследования «доза–эффект» закономерностей. По этой причине исследования, направленные на подбор режимов ионизирующего облучения, приемлемых одновременно как для стимулирования роста и развития растений, так и для целей обеззараживания посевного материала, на данном этапе исследований являются наиболее актуальными.

На исследуемом в данной работе ускорителе с несамостоятельным ВТР проводилась электронно-пучковая обработка семян гороха сорта Фараон на посевные качества и резистентность возбудителей болезней. В результате экспериментов показано, что электронное облучение способствовало на уровне тенденции снижению степени поражения проростков корневой гнилью

(возбудитель *Fusarium oxysporum*) в 1,1–1,2 раза при дозах 6 и 12 кГр (мощность дозы 6 кГр/сек). Также облучение статистически значимо снизило степень поражения гороха *Penicillium* sp. – в 2,7–11,8 раза при дозах 24 – 96 кГр (мощность дозы 6 кГр/сек). Облучение семян приводило к стимуляции ростовых процессов (повышение лабораторной всхожести семян, увеличение длины ростка и корешка и др.).

Таким образом, технология электронно-пучковой обработки перспективна для практического применения в сельском хозяйстве при предпосевной обработке с целью обеззараживания семян и увеличения урожайности сельскохозяйственных культур. Актуальными остаются исследования, направленные на эмпирический подбор оптимальных режимов обработки для каждой сельскохозяйственной культуры.

Представленный в данной работе импульсно-периодический ускоритель также перспективен для поверхностной модификации полимерных и композиционных материалов. К этой тематике можно отнести обработку скаффолдов на основе полилактида, которые нашли применение в биомедицине благодаря своей биосовместимости, однако требуют повышения гидрофильности для лучшей адгезии живых клеток [152]. Другим перспективным направлением является обработка поливинилхлорида (ПВХ). При воздействии электронного пучка происходит отщепление хлора по реакции дегидрохлорирования, что приводит к образованию из ПВХ обогащенных углеродом полимеров с системой сопряженных кратных углерод-углеродных связей [153]. Кроме того, развиваемый подход может послужить основой для разработки бездиоксиновых методов утилизации отходов хлорполимеров. Большое сечение электронного пучка ($45 \times 65 \text{ см}^2$) позволяет спроектировать рабочую газовую кювету для проведения различных плазмохимических процессов, которые в последнее время становятся все более популярными, например конверсия углеводов [14].

Выводы:

1) Коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу слабо зависит от амплитуды тока разряда в исследуемом диапазоне, однако увеличивается с уменьшением коэффициента заполнения импульса при стабилизации среднего значения, что связано с уменьшением времени развития части тока несамостоятельного ВТР и, как следствие, меньшей величины тока в ускоряющем промежутке.

2) Проведенное моделирование показывает, что для данной конфигурации электродной системы оптимальным потенциалом плазмы относительно полого катода является величина 50 – 100 В, при которой достигается наибольший коэффициент вывода и наименьшая неоднородность электронного пучка в пределах одной апертуры анодной решетки.

3) При оценке доли потерь тока электронного пучка путем измерения тока на анодной и опорной решетках следует учитывать изменение распределения концентрации плазмы в объеме при генерации электронного пучка, а также переключение части ионного потока с анодной решетки на высоковольтный катод.

4) Потери мощности, созданные фоновым током несамостоятельного ВТР, могут составлять до 0,35 от всей мощности в ускоряющем промежутке, при этом за пределами анодной решетки потери мощности от фонового тока составляют 0,05.

5) Импульсно-периодический режим генерации вспомогательного разряда позволяет снизить неоднородность распределения плотности тока электронного пучка по сравнению с непрерывным режимом на величину 10 – 30% в соответствии с частотой 10 – 20 кГц при сохранении средней плотности тока электронного пучка.

6) Отрицательное смещение потенциала анодной решетки относительно стенок вакуумной камеры в паузу генерации вспомогательного разряда на величину 50 – 100 В позволяет повысить коэффициент вывода пучка в атмосферу с 0,05 до 0,15, что связано как с повышением амплитуды тока выведенного пучка, так и уменьшением среднего значения тока в ускоряющем промежутке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и их анализ позволили получить следующие **основные результаты:**

1. На основании проведенных исследований создан импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного ВТР, генерирующий электронный пучок сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$, энергией 100–150 кэВ, плотностью электронного тока пучка в импульсе до 15 мкА/см^2 и ее средним значением 6 мкА/см^2 при неоднородности менее $\pm 30\%$, с коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 при частоте следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициенте заполнения импульсов 0,2 – 0,5.

2. Использование самостоятельного орбитронного тлеющего разряда с полым катодом в импульсно-периодическом режиме для генерации электронного пучка в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР с частотой следования импульсов 1–30 кГц позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы до четырех раз по сравнению с непрерывным режимом путем изменения коэффициента заполнения импульсов в диапазоне 0,2 – 0,5 при стабилизации среднего тока разряда.

3. Генерация электронного пучка в импульсно-периодическом режиме, также как в непрерывном, способствует снижению напряжения горения вспомогательного разряда на $\approx 40 \text{ В}$ и уменьшению потенциала плазмы относительно полого катода на $\approx 20 \text{ В}$, при этом снижается неоднородность распределения концентрации эмиссионной плазмы на 20%.

4. Коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу слабо зависит от амплитуды тока разряда в исследованном диапазоне, однако увеличивается с уменьшением коэффициента заполнения импульса при стабилизации среднего значения тока разряда, что связано с уменьшением времени на развитие части тока несамостоятельного ВТР и достижения меньшего значения тока в ускоряющем промежутке. Переход к импульсно-периодическому режиму генерации вспомогательного разряда с частотой 5–30 кГц позволяет увеличить коэффициент

вывода на 0,3 в момент максимума тока в ускоряющем промежутке без изменения конструктивных параметров ИЭОС ускорителя.

5. В паузе генерации вспомогательного разряда спад тока пучка в атмосфере происходит быстрее, чем спад тока в ускоряющем промежутке, что приводит к резкому уменьшению коэффициента вывода до значений 0,01–0,1. Такой рост потерь тока пучка в момент паузы между импульсами тока разряда связан с релаксационными процессами в плазме вспомогательного разряда, уменьшением энергии и доли ионов, поступающих в ускоряющий промежуток, а следовательно, изменением ИЭОС и релаксационными процессами ВТР.

6. Импульсно-периодический режим вспомогательного разряда позволяет снизить число микровзрывов, способных перейти в дуговой разряд, на стенках полого катода и тем самым снизить локальные неоднородности в эмиссионной плазме, влияющие на несамостоятельный ВТР, и, соответственно, генерацию электронного пучка.

7. Генерация вспомогательного самостоятельного орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 – 20 кГц снижает неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка на 10 – 30% по сравнению с непрерывным режимом при сохранении средней плотности тока электронного пучка. Наименьшая неоднородность как в течение генерации вспомогательного разряда, так и в паузу между импульсами достигается при меньших значениях коэффициента заполнения импульса, а именно в диапазоне 0,2 – 0,5.

8. Экспериментально показана возможность получения эффекта обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы семян сельскохозяйственных культур, используя ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с энергией электронов до 150 кэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
2. Соковнин, С.Ю. Наносекундные ускорители для радиационных технологий / С.Ю. Соковнин. – Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2017. – 348 с.
3. Ершов, Б.Г. Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения / Б.Г. Ершов // Вестник Российской академии наук. – 2013. – Т.83. – №10. – С. 885–895.
4. Карпов, Д.А. Ускорители электронов с выводом пучка в атмосферу для радиационных технологий / Д.А. Карпов, С.Л. Косогоров. – СПб. АО «НИИЭФА», 2021. – 113 с.
5. Широкоапертурные низкоэнергетичные ускорители электронов АО "НИИЭФА" на основе высоковольтного тлеющего разряда / С.Л. Косогоров, Н.А. Успенский, В.Я. Шведюк [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 41–47.
6. Automated application of low energy electron irradiation enables inactivation of pathogen- and cell-containing liquids in biomedical research and production facilities / J. Fertey, M. Thoma, J. Beckmann [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – 10 (1). – 12786.
7. Electron Crosslinking АВ [Электронный ресурс, Офиц. сайт]. URL: <http://www.crosslinking.com/index.php/en/> (Дата обращения: 30.08.2023)
8. Бугаев, С.П. Техника получения высокоэнергетических электронных пучков с большим поперечным сечением / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1980. – № 1. – С. 7–24.
9. Новиков, А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
10. Абдуллин, Э.Н. Отверждение полиэфирных смол, стимулированное облучением импульсным электронным пучком / Э.Н. Абдуллин, В.Н. Чмух // ХВЭ. – 1979. – Т.13. – Вып.2. – С. 181–182.

11. Чмух, В.Н. Радиационное отверждение ненасыщенных олигоэфиров наносекундными сильноточными пучками электронов: дис. ... канд. хим. наук / В.Н. Чмух. – Томск. – 1983. – 175 с.

12. Салимов, Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения / Р.А. Салимов. – Успехи физических наук, 2000. – Т.170. – №2. – С. 197–201.

13. Разработка и исследование генератора озона на основе несамостоятельного разряда и пути повышения его эффективности / М.А. Аброян, С.Л. Косогоров, С.А. Мотовилов [и др.] // В кн. “Развитие и совершенствование способов и средств очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод”. Вологда: Полиграфист. – 2003. – С. 65–70.

14. Kuznetsov, D.L. Plasma chemical conversion of methane by pulsed electron beams and non-self-sustained discharges / D.L. Kuznetsov, V.V. Uvarin, I.E. Filatov // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021. – V. 54. N. 43. – 435203.

15. Пушкарёв, А.И. Цепные процессы в низкотемпературной плазме / А.И. Пушкарёв, Ю.Н. Новоселов, Г.Е. Ремнев. – Новосибирск: Наука, 2006. – 226 с.

16. Экспериментальное исследование и математическое моделирование восстановления фторидных соединений импульсным электронным пучком / В.А. Власов, А.И. Пушкарёв, Г.Е. Ремнев [и др.] // Известия ТПУ. – 2004. – Т.307. – №5. – С. 89–93.

17. Возможность стерилизации перевязочных средств с помощью сильноточных импульсно-периодических электронных пучков прямого действия на примере раневой абсорбирующей повязки / В.В. Ростов, П.И. Алексеенко, П.В. Выходцев [и др.] // Сибирский медицинский журнал. – 2012. Т.27. – №1. – С.141–146.

18. Устройство ионизации для непрерывного сверхзвукового электроионизационного СО-лазера / М.А. Аброян, В.В. Акулов, П.М. Богомазов [и др.] // Квантовая электроника. – 1996. – Т.23. – №8. – С.751–752.

19. Аброян, М.А. Широкоапертурные ускорители электронов / М.А. Аброян, С.Л. Косогоров, В.Я. Шведюк // Атомная энергия. – 2003. – Т.94. – Вып.4. – С. 304–309.

20. Генерация в инертных газах при накачке электронным пучком большого сечения с длительностью импульса тока до 2.5 мс / Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндел, Г.А. Месяц, [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т.12. – Вып.1. – С. 37–42.

21. Röder, E. Disinfestation of Grains Using “EVONTA e-3” Soft Electron Treatment / E. Röder, O. Röder, C. Adler. – Reference Module in Food Science, Elsevier. – 2017. P. 1–10.

22. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / С.Ю. Дорошкевич, К.П. Артёмов, Н.Н. Терещенко [и др.] // ХВЭ. – 2021. – Т.55. – № 4. – С. 326–332.

23. Measurement and calculation of the absorbed dose during irradiation of the grain by a pulse electron beam with energy up to 160 keV / M. Vorobyov, S. Doroshkevich, K. Artyomov, E. Pokrovskaya // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020). – 2020. – P. 310–314.

24. Низкоэнергетические ускорители электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу для обработки органических материалов / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев, М.С. Торба [и др.] // В сборнике: Химия нефти и газа. Материалы XII Международной конференции. – 2022. – С. 315–316.

25. Широкоапертурные ускорители электронов с высоким коэффициентом вывода пучка / М.А. Аброян, И.Ю. Евстратов, С.Л. Косогоров [и др.] // ПТЭ. – 1998. – №2. – С. 83–88.

26. Гаврилов, Н.В. Импульсный источник электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1984. – №2. – С. 143–146.

27. А.с. 409311 СССР, МКИ Н 01 J 9/02, 9/04. Способ изготовления источника электронов / Н.А. Успенский, В.П. Федяков. – № 1189278; заявл. 29.03.84; опубл. 07.07.89, Бюл. – № 25. – 3 с.

28. Широкоапертурный ускоритель непрерывного действия с выводом электронного пучка высокой плотности / Г.А. Баранов, Л.В. Бодакин, В.А. Гурашвили [и др.] // ПТЭ. – 2013. – №1. – С. 81–85.

29. Косогоров, С.Л. Расчетное и экспериментальное исследование электронно-оптических систем низкоэнергетичных электронных ускорителей с пучком большого сечения / С.Л. Косогоров // ЖТФ. – 2011. – Т.81. – Вып.7. – С. 115–119.

30. Измерение в реальном времени распределения плотности тока в низкоэнергетичных электронных пучках большого сечения / М.А. Аброян, С.Л. Косогоров, И.В. Набокова [и др.] // ПТЭ. – 2007. – №4. – С. 109–112.

31. Григорьев, Ю.В. Импульсная электронная пушка с выпуском потока большого сечения в атмосферу / Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // ПТЭ. – 1978. – №2. – С. 187–189.

32. Аброян, М.А. Эффективность высоковольтных ускорителей электронов с выводом пучка большого сечения в атмосферу / М.А. Аброян, Г.И. Трубников // ЖТФ. – 1989. – Т.59. – №2. – С. 129–134.

33. Николаев, В.Б. Прохождение электронов с энергиями 150-400 кэВ через вакуумноплотные фольги из алюминия и титана / В.Б. Николаев // ЖТФ. – 1976. – № 7. – С. 1555.

34. Seltser, S.M. Transmission and reflection of electrons by foils / S.M. Seltser, M.J. Berger // Nucl. Instrum. and Methods. – 1974. – V.119. – P. 157–176.

35. Применение алюминиевых и титановых фольг в низкоэнергетичных широкоапертурных электронных ускорителях / Л.В. Бодакин, А.И. Гусаков, О.В. Комаров [и др.] // ЖТФ. – 2016. – Т.86. – Вып.9. – С.122–128.

36. Выводное окно широкоапертурного ускорителя с повышенной плотностью тока электронного пучка / Г.А. Баранов, В.А. Гурашвили, И.Д. Джигайло [и др.] // ПТЭ. – 2017. – №4. – С.124–129.

37. Аброян, М.А. Влияние электроннооптических факторов на коэффициент вывода пучка широкоапертурных ускорителей электронов / М.А. Аброян,

Ю.В. Зуев, С.Л. Косогоров, В.Я. Шведюк // ЖТФ. – 2003. – Т.73. – Вып.8. – С. 98–104.

38. Григорьев, Ю.В. Четырехэлектродная электронная пушка с выпуском потока сечением $10 \times 80 \text{ см}^2$ в атмосферу / Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // ПТЭ. – 1979. – №4. – С.194–196.

39. Анисимова, Т.Е. Повышение надежности и ресурса работы катодного узла электронного ускорителя с выводом пучка большого сечения в атмосферу / Т.Е. Анисимова, А.Н. Малинин // ПТЭ. – 2008. – №6. – С.99–102.

40. Месяц, Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. / Г.А. Месяц – М.: Наука, 2000. – 424 с.

41. Кремнев, В.В. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике / В.В. Кремнев, Г.А. Месяц. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.

42. Озур, Г.Е. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом / Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский. – Новосибирск: Наука, 2018. – 176 с.

43. Абдуллин, Э.Н. Получение мощных электронных пучков в источнике с плазменным анодом и питанием от генератора Маркса с согласованными нагрузками / Э.Н. Абдуллин, Г.Ф. Басов // Известия ВУЗов. Физика. – 2019. – Т. 62. – №11. – С.156–160.

44. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines / G.A. Mesyats, S.D. Korovin, A.V. Gunin [et al.] // Laser and Particle Beams. – 2003. – No. 21. – P. 197–209.

45. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов "SINUS-320": формирование и диагностика широкоапертурного пучка / В.В. Ростов, В.В. Бармин, В.Ф. Ландль [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2019. – Т.62, №7. – С. 147–152

46. Development of long-lifetime cold cathodes / N.M. Vykov, V.P. Gubanov, A.V. Gunin [et al.] // Proc. 10th IEEE Pulsed Power Conf. – 1995. – P.71–74.

47. Рукин, С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока / С.Н. Рукин // ПТЭ. – 1999. – №4. – С. 5–36.

48. Сильноточный наносекундный ускоритель электронов с полупроводниковым прерывателем тока / Ф.Я. Загулов, В.В. Кладухин, Д.Л. Кузнецов [и др.] // ПТЭ. – 2000. – №5. – С.71–76.

49. Новоселов, Ю.Н. Воздействие импульсных пучков электронов на примесь сероуглерода в воздухе/ Ю.Н. Новоселов, А.И. Суслов, Д.Л. Кузнецов // ЖТФ. – 2003. – Т.73. – Вып.6. – С.123–129.

50. Процессы конверсии метана в плазме, создаваемой импульсно-периодическим пучком электронов и несамостоятельным разрядом / Д.Л. Кузнецов, Е.В. Кольман, Ю.С. Сурков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т.33. – Вып.14. – С.42–47.

51. Котов, Ю.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5 / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // ПТЭ. – 2000. – №1. – С.70–73.

52. Взрывная эмиссия электронов из металлодиэлектрического катода / С.П. Бугаев, В.А. Илюшкин, Е.А. Литвинов, В.Г. Шпак // ЖТФ. – 1973. – Т. XLIII. – Вып.10. – С. 2138–2142.

53. Бугаев, С.П. Исследование механизма импульсного пробоя по поверхности диэлектрика в вакууме. II. Неоднородное поле / С.П. Бугаев, Г.А. Месяц // ЖТФ. – 1967. – Т.37. – Вып.10. – С. 1861–1869.

54. Патент РФ № 2158982, Металлокерамический катод / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин – Оpubл. 10.11.2000. Б. № 31.

55. Соковнин, С.Ю. Улучшение эксплуатационных характеристик ускорителя УРТ-0,5 / С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // ПТЭ. – 2005. – №3. – С.127–131.

56. Частотно-импульсный электронный ускоритель «АСТРА» / И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Е.И. Луконин [и др.] // ПТЭ. – 2013. – №5. – С. 81–84.

57. К вопросу применения импульсных пучков с широким спектром кинетических энергий электронов / И.С. Егоров, А.А. Исемберлинова, А.В. Полосков [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2020. – Т.63. – №10. – С. 48–53.

58. Егоров, И.С. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «АСТРА» / И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.Е. Ремнев // Изв. ТПУ. – 2013. – №2. – Т.322. – С. 91–94.

59. Egorov, I.S. Testing of the water supplying system for the cathode of a vacuum electron diode / I.S. Egorov, M.A. Serebrennikov, A.V. Poloskov // Proc. of 8th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects: Congress Proceedings – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – P. 87–92.

60. The electra KrF Laser / F. Hegeler, M.C. Myers, M. Friedman [et al.] // IEEE 25 International power modulator symposium and high voltage workshop. – Hollywood, 2002. – P. 121–125.

61. Efficient electron beam deposition in the gas cell of the Electra laser / F. Hegeler, D.V. Rose, M.C. Myers [et al.] // Phys. Plasmas. – 2004. – V.11. – P. 5010–5021.

62. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.– 216 с.

63. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. I / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов // ЖТФ. – 1986. – Т.56. – Вып.1. – С. 66–71.

64. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов // ЖТФ. – 1986. – Т.56. – Вып.4. – С. 687–693.

65. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейнфельд, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. – М.: Энергоатомиздат, 1989.–256 с.

66. Генерация в инертных газах при накачке электронным пучком ускорителя с плазменным катодом / Л.Г. Винтизенко, В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль [и др.] // Докл. АН СССР, 1986. – Т.288. – №3. – С.609–612.

67. Высокочастотная генерация импульсных электронных пучков большого сечения / В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, Д.Л. Кузнецов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т.17. – Вып.23. – С. 26–29.

68. Электронный диодный ускоритель с большим сечением пучка / Г.С. Казьмин, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейнделъ [и др.] // ПТЭ. – 1977. – №4. – С.19–20.

69. Окс, Е.М. Высоковольтный электронный источник с плазменным катодом и высокой плотностью энергии пучка в импульсе / Е.М. Окс, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1988. – №3. – С. 166–169.

70. Лондер, Я.И. Теория отрицательного анодного падения в разрядах низкого давления / Я.И. Лондер, К.Н. Ульянов // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т.51. – №1. – С.13–23.

71. Крейнделъ, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейнделъ М.: Атомиздат, 1977. – 144 с.

72. Воробъев, М.С. Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу / М.С. Воробъев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // ПТЭ. – 2015. – №5. – С. 112–120.

73. Воробъев, М.С. Ускоритель электронов с многоапертурным плазменным эмиттером / М.С. Воробъев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Изв. ВУЗов. Физика, Т.57. – №11/3. – 2014. – С. 194–199.

74. Воробъев, М.С. Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу: дис. ... канд. тех. наук: 05.27.02 / М.С. Воробъев. – Томск. – 2015. – 197 с.

75. Высоковольтный электронный источник с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения / Н.В. Гаврилов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейнделъ [и др.] // ПТЭ. – 1981. – №3. – С. 152–154.

76. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / под. ред. П.М. Щанина // Екатеринбург: УИФ «Наука». 1993. – 149 с.

77. Мартенс, В.Я. Управление распределением плотности тока по поверхности плазменного эмиттера большой площади / В.Я. Мартенс, Е.Ф. Шевченко // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т.37.– Вып.8. – С. 71–78.

78. Плазменный катод электронного ускорителя с большим сечением пучка / Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып.3. – С. 72–78.

79. Bayless, J.R. Plasma cathode electron gun / J.R. Bayless // Rev. Sci. Instrum., 1975. – V.46. – №9. – P. 1158–1160.

80. Метель, А.С. Сильноточный плазменный эмиттер электронов на основе тлеющего разряда с многостержневой электростатической ловушкой / А.С. Метель, Ю.А. Мельник // ПТЭ. – 2013. – №3. – С. 76–84.

81. 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 ЖТФ. – 2021. – Т.47. – №10. – С. 38–42.

82. Гушенец, В.И. Сеточное управление током плазменного эмиттера сильноточного источника электронов / В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейнделъ, П.М. Щанин // ЖТФ. – 1987. – Т.57, Вып.11. – С. 2264–2266.

83. Гушенец, В.И. Формирование электронных пучков субмикросекундной длительности импульса в источниках и ускорителях электронов с плазменными эмиттерами / В.И. Гушенец, П.М. Щанин // Известия ВУЗов. Физика. – 2001. – Т.44. – Вып.9. – С. 57–62.

84. Кузнецов, Д.Л. Инициирование плазмохимических процессов окисления SO_2 в воздухе импульсными электронными пучками: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Д.Л. Кузнецов. – Екатеринбург, 1997. – 146 с.

85. Высоковольтный импульсный источник электронов с плазменным эмиттером для получения радиально расходящегося пучка / А.М. Ефремов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейнделъ, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1987. – №1. – С. 167–169.

86. Генерация в ксеноне при накачке радиально сходящимся пучком электронов / А.С. Бугаев, Н.Н. Коваль, В.В. Рыжов [и др.] // Квантовая электроника. – 1990. – Т.17. – №1. – С.17–19.

87. Бугаев, А.С. Спектральный состав генерации в смесях Ar–Xe и He–Ar–Xe, накачиваемых радиально-сходящимся пучком электронов длительностью 0,1 мс / А.С. Бугаев, Н.Н. Коваль, В.Ф. Тарасенко, А.В. Феденев // Квантовая электроника. – 1992. – Т.19. – №11. – С. 1064–1067.

88. Мамедов, Н.В. Физические основы генерации ионных пучков в плазменных источниках нейтронных трубок / Н.В. Мамедов // Учебное пособие. – М.: Букки Веди. – 2021. – 388 с.

89. O'Brien, V.V. Characteristics of a cold cathode plasma electron gun / V.V. O'Brien // Applied Physics Letters. – 1973. – V.22. – No.10. – P. 503–505.

90. Пустынский, Л.Н. Параметры прианодной плазмы высоковольтного тлеющего разряда в области напряжений 150 кВ / Л.Н. Пустынский, С.Р. Холев, Г.В. Якушин // ТВТ. – 1982. – Т.20. – Вып.6. – С.1057–1063.

91. Пустынский, Л.Н. Осевое сжатие и некоторые предельные характеристики высоковольтного тлеющего разряда / Пустынский Л.Н., Холев С.Р., Якушин Г.В. // ТВТ, 1982, Т.20, вып. 2, С. 207–214.

92. Электронная пушка с формированием пучка в высоковольтном тлеющем разряде / Ф.Н. Балтаков, В.С. Босамыкин, В.Г. Корнилов [и др.] // ЖТФ. – 1976. – Т.46. – №10. – С. 2195–2196.

93. Элементарная ячейка для формирования электронных пучков произвольной формы в высоковольтном разряде в газе / И.В. Вагнер, Э.И. Болгов, В.Ф. Гракун [и др.] // ЖТФ. – 1974. – Т.44. – №8. – С. 1669–1674.

94. Garnsworthy, R.K. Atmospheric pressure pulsed CO₂ laser utilizing preionization by high energy electrons / R.K. Garnsworthy, L.E.S. Mathias, C.H.H. Carmichael // Applied physics letters. – 1971. – V.19. – №12. – P. 506–508.

95. Pigache, D. Secondary emission electron gun for high pressure molecular lasers / D. Pigache, G. Fournier // J. Vac. Sci. Technol. – 1975. – V.12. – №6. – P. 1197–1199.

96. Газовая электронная пушка с плазменным анодом / А.А. Нечаев, И.Г. Персианцев, В.М. Полушкин [и др.] // ПТЭ. – 1983. – №2. – С. 156–157.

97. Гаврилов, Н.В. 250-кВ диод с ионно-электронной эмиссией, возбуждаемой импульсной контрагированной дугой / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейнделъ, П.М. Щанин // ЖТФ. – 1985. – Т.55. – №9. – С. 1886–1887.

98. Гаврилов, Н.В. Генератор плазмы источника электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, П.М. Щанин // В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером – под ред. Ю.Е. Крейнделя, Новосибирск: Наука, 1983. – С. 74–79.

99. Грановский, В.А. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.А. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 543 с.

100. Аброян, М.А. Ускоритель электронов непрерывного действия на основе вторичной ион-электронной эмиссии / М.А. Аброян, Н.А. Успенский, В.П. Федяков // ПТЭ. – 1984. – №4. – С.24–26.

101. Денисов, С.С. Плазменный источник электронов / С.С. Денисов, Н.А. Успенский, В.П. Федяков // ПТЭ. – 1984. – №2. – С. 139–142.

102. Гушенец, В.И. Конструкция и рабочие характеристики электронного источника с полым катодом и несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом/ В.И. Гушенец, А.С. Бугаев, Е.М. Окс // Proc. of 8th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022). – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – P. 746–751.

103. Isaacs, G.G. A cold cathode glow discharge electron gun for high pressure CO₂-laser ionization / G.G. Isaacs, D.L. Jordan, P.J. Dooley // J. Phys. E.: Sci. Instrum., 1979. – V.12. – P. 115–118.

104. Патент 3970892 (США). Ion plasma electron gun / G. Wakalopoulos.

105. Diop, B. Compact electron gun based on secondary emission through ionic bombardment / B. Diop, J. Bonnet, T. Schmid, A. Mohamed // Sensors. – 2011. – №11. – P. 5202–5214.

106. McClure G.W. Low pressure glow discharge / G.W. McClure // Appl. Phys. Lett. – 1963. – V.2. – No. 12. – P. 233–234.

107. Why does a low-pressure wire-discharge exist self-sustained? / M. Makarov, Y. Loumani, T. Minea [et al.] // *Europhys. Lett.* – 2006. – V.74. – No. 3. – P. 431–437.

108. Particle in cell modelling of the observed modes of a dc wire discharge / R. Gueroult, P.Q. Elias, D. Packan [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2010. – V.43. – No. 36. – 365204.

109. Clark, W.M. A long pulse, high-current electron gun for e-beam sustained eximer lasers / W.M. Clark, G.J. Dunning // *IEEE J. of Quant. Electronics*, 1978. – V.14. – №2. – P. 126–129.

110. Вакуумные системы широкоапертурных низкоэнергетичных ускорителей электронов / Г.А. Баранов, Д.А. Карпов, С.Л. Косогоров [и др.] // *Вакуумная техника и технология.* – 2015. – Т.25. – №1. – С. 1–23.

111. New types of electron beam sources based on high-voltage glow-discharge – basics and applications. – 2017. – 30th Inter. Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2017), Regensburg, Germany.

112. Сравнение широкоапертурных низкоэнергетичных ускорителей электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с ускорителями на основе протяженных термоэммиттеров / Г.А. Баранов, В.А. Гурашвили, И.Д. Джигайло [и др.] // *ПТЭ.* – 2020. – №2. – С. 102–108.

113. Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев, М.С. Торба [и др.] // *ПТЭ.* – 2023. – № 3. – С. 53 – 60.

114. Electron accelerator based on ion-electron emission for generation of a wide-aperture beam / S. Doroshkevich, S. Sulakshin, M. Vorobyov // *7th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020).* – 2020. – P. 42–45.

115. Longitudinal electron diffusion coefficients in gases: noble gases / J.L. Pack, R.E. Voshall, A.V. Phelps, L.E. Kline // *J. Appl. Phys.* – 1992. – V.71. – №11. – P. 5363.

116. Trump, J.G. The secondary emission of electrons by high energy electrons / J.G. Trump, R.J. Van de Graaff // *Physical Review* – 1949. – V.75. – №1. – P. 44–45.

117. Archard, G.D. Back scattering of electrons / G.D. Archard // *Journal of Applied Physics*. – 1961. – V.32. – №8. – P. 1505–1509.

118. Снижение неоднородности плотности тока пучка в атмосфере в ускорителе электронов на основе несамостоятельного ВТР / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьёв, А.А. Гришков [и др.] // Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ. – 2023. – С. 92–96.

119. Климов, А.И. Экспериментальные методы в сильноточной электронике / А.И. Климов.– Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 238 с.

120. Measurement of plasma parameters in an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge / S.Y. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, S.S. Kovalsky [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series. The proc. 14th Inter. Conf. "Gas Discharge Plasmas and Their Applications"*. – 2019. – 012006.

121. Brown, I.G. The physics and technology of ion sources. 2nd edition. Chapter 5, Weinheim: Wiley-VCH – 2004. – P. 379.

122. Verboncoeur, J.P. An object-oriented electromagnetic PIC code / J.P. Verboncoeur, A.B. Langdon, N.T. Gladd // *Computer physics and communication*. – 1995. – V.87. – P.199 – 211.

123. Spädtke, P., КОBRA3-INP / P. Spädtke, Wiesbaden: Junkernstr. – 1999.

124. Широкоапертурный ускоритель электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с генерацией плазмы планарными магнетронами / А.Г. Иванов, Д.А. Карпов, С.Л. Косогоров, Н.А. Успенский // Труды VII международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – 2023. – С. 101–106.

125. Никулин, С.П. Учебно-методические материалы по дисциплине «Физика и астрономия» / С.П. Никулин, ИЭФ УрО РАН. – 296 с.

126. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П Райзер, М.: Наука, 1987. – 592 с.

127. Заполнение рабочей камеры технологической установки однородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда / А.С. Метель,

С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, В.В. Панин // Физика плазмы. – 2009. – Т.35. – №12. – С. 1140–1149.

128. Дорошкевич, С.Ю. Широкоапертурный ускоритель электронов на основе ионно-электронной эмиссии с выводом пучка в атмосферу / С.Ю. Дорошкевич // В сборнике: перспективы развития фундаментальных наук, сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. – 2020. – С. 32–34.

129. Auxiliary orbitron glow discharge of a wide aperture electron accelerator based on ion-electron emission / A.A. Grishkov, M.S. Vorobyov, S.Yu. Doroshkevich, V.A. Shklyaev // Proc. of 8th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). Congress Proceedings, Tomsk, 2022. – P. 109 – 117.

130. Использование импульсно-периодической дуги с катодным пятном для генерации электронных и ионных пучков с регулируемым средним током / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндел, Г.А. Месяц, Ф.Н. Шведов // ПЖТФ. – 1988. – Т.14. – №.10. – С. 865–869.

131. Измерение параметров плазмы тлеющего разряда орбитронного типа в ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, М.С. Воробьёв // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск: В – Спектр, 2023. – Ч.1. – С. 227–229.

132. Makarov M. Pulsed low pressure wire discharge / M. Makarov, Y. Loumani, A. Kozyrev // J. Appl. Phys. – 2006. – V.100. – 033301.

133. Кузьмичев, А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А.И. Кузьмичев // Киев: Аверс. – 2008. – 244 с.

134. Schroll, R.A. Power system for reactive sputtering of insulating films / R.A. Schroll // Surface and Coatings Technol. – Elsevier Science SA. – 1997. – V.93. – P. 7–13.

135. Belkind, A. Pulse duration effect in pulse-power reactive sputtering of Al₂O₃ / A. Belkind, A. Freilich, R. Scholl // Surface and Coatings Technol. – Elsevier Science SA. – 1998. – V. 108–109. – P. 558–563.

136. Increasing the operation stability of the electron accelerator based on ion-electron emission / M.S. Torba, S.Yu. Doroshkevich, V.A. Levanisov [et. al] // Journal of Physics: Conference Series, 15th Inter. Conf. on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2021) – 2021. – 012122.

137. Bourne, H.C. Role of positive ions in high-voltage breakdown in vacuum / H.C. Bourne, R.W. Cloud, J.G. Trump // Journal of Applied Physics. –1955. – V.26. – P. 596.

138. Efficiency of electron beam extraction to the atmosphere in an accelerator based on ion-electron emission / S.Yu. Doroshkevich, M.S. Vorobyov, M.S. Torba [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2064. – 012116.

139. Способ повышения энергетической эффективности источников электронов на основе ионно-электронной эмиссии / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль [и др.] // Патент на изобретение 2772817 С1, 26.05.2022. Заявка № 2021128647 от 01.10.2021.

140. Кузьмичев, Д.А. Исследование особенностей зажигания разряда в гелии на левой ветви кривой Пашена / Д.А. Кузьмичев, В.С. Болдасов, А.И. Кузьмичев // Прикладная физика. – 1998. – № 1. – С. 15–24.

141. Болдасов, В.С. Роль быстрых тяжелых частиц, отраженных от катода, в поддержании высоковольтного разряда / В.С. Болдасов, А.И. Кузьмичёв // Журнал технической физики. – 1983. – Т.53. – Вып. 6. – С. 1235-1237.

142. Гусева, Л.Г. Влияние отдельных элементарных процессов на характеристики высоковольтной формы разряда / Л.Г. Гусева // Известия Академии Наук СССР. – 1964. – Т.28. – №1. – С. 141–146.

143. Пустынский, Л.Н. Влияние отражения электронов на протекание высоковольтного тлеющего разряда в области напряжений выше 100 кВ / Л.Н. Пустынский, С.Р. Холев, Г.В. Якушин // ТВТ. – 1981. – Т.19. – Вып.6. – С. 1306–1309.

144. Grishkov, A.A. Simulation of a wide-aperture electron accelerator based on ion-electron emission in repetitively pulsed mode / A.A. Grishkov, M.S. Vorobyov,

S.Yu. Doroshkevich, V.A. Shklyayev // Proc. of 8th Inter. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). Congress Proceedings, Tomsk, 2022. – P. 118–127.

145. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A.V. Kozyrev, V.Y. Kozhevnikov, M.S. Vorobyov [et al.] // Laser and Particle Beams. – 2015. – V.33, No.2. – P. 183–192.

146. Восстановление спектров электронов электронных пучков из кривых ослабления для вакуумных и газовых диодов / М.С. Воробьев, Е.Х. Бакшт, Н.Н. Коваль [и др.] // Известия ВУЗов. Физика. – 2014. – Т.57. – № 11-3. – С. 189–193.

147. Energy spectrum of an electron beam outputted into ambient air on an electron accelerator with a grid plasma cathode / M.S. Vorobyov, V.F. Tarasenko, E.K. Baksht [et al.] // Proc. of 20th Inter. Symp. on High-Current Electronics, ISHCE, Tomsk, 2018. – P. 66–69.

148. Evaluation of the effect of pre-sowing electron irradiation of barley seeds on plant development and disease incidence / N. N. Loy, N. I. Sanzharova, S. N. Gulina [et al.] // Journal of Physics: Conference Series (15th Inter. Conf. "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2021), Ekaterinburg, 2021. – V.2064. – 012101.

149. Козьмин, Г.В. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Г.В. Козьмин, С.А. Гераськин, Н.И. Санжарова, Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. – 400 с.

150. Радиационная дезинсекция зерна и зернопродуктов / Н.Н. Лой, Н.И. Санжарова, Т.В. Чиж, В.И. Шишко // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: научные основы и перспективы практического применения: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ / под ред. Н.И. Санжаровой, 2023. – С. 107–123.

151. Беспалов, В.И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц / В.И. Беспалов // Известия ВУЗов. Физика. – 2000. Т.43. – №4. – С. 159.

152. Surface modification of polylactic acid by ion, electron beams and low-temperature plasma: a review / O. A. Laput, V. V. Botvin, I. A. Kurzina, I. V. Vasenina // *Journal of Materials Science*. – 2022. – V.57. – No.4. – P. 2335–2361.

153. Холодный синтез углерода из поливинилхлорида с использованием электронного пучка, выведенного в атмосферу / Ю.Г. Кряжев, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2016. – Т.42. – №19. – С. 13–19.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2772817

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ**

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

Авторы: *Дорошкевич Сергей Юрьевич (RU), Воробьев Максим Сергеевич (RU), Коваль Николай Николаевич (RU), Торба Максим Сергеевич (RU), Сулакишин Степан Александрович (RU), Леванисов Вадим Андреевич (RU), Шугуров Владимир Викторович (RU), Шин Владислав Игоревич (RU)*

Заявка № **2021128647**

Приоритет изобретения **01 октября 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **26 мая 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **01 октября 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



Документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e34e40f0e94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Акт об использовании результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ

ВРИО директора

Шубина О.А.

« 06 » 07 2023г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы Дорошкевича Сергея Юрьевича на соискание ученой степени кандидата технических наук «Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с эффективным выводом пучка в атмосферу»

Место проведения испытаний: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», 249032 Россия, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км.

В 2022 г. в ФГБНУ ВНИИРАЭ проведены исследования по воздействию электронного пучка большого сечения с энергией электронов до 150 кэВ на семена гороха с использованием электронного ускорителя на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу. Ответственным за постановку экспериментов со стороны ИСЭ СО РАН являлся Дорошкевич С.Ю.

Проведены исследования по влиянию электронно-пучкового облучения семян гороха сорта Фараон на посевные качества и резистентность возбудителей болезней.

В результате экспериментов показано, что при мощности радиационной дозы 6 кГр/сек электронное облучение способствовало на уровне тенденции снижению степени поражения проростков корневой гнилью (возбудитель *Fusarium oxysporum*) в 1,1-1,2 раза при дозах (6 – 12) кГр. Также облучение статистически значимо снизило степень поражения гороха *Penicillium* sp. – в 2,7-11,8 раза при дозах (24 – 96) кГр. Облучение семян приводило к стимуляции ростовых процессов (повышение лабораторной всхожести семян, увеличение длины ростка и корешка и др.).

Настоящим актом руководство ФГБНУ ВНИИРАЭ подтверждает достоверность информации о возможности получения эффекта обеззараживания и стимулирующего влияния на ростовые процессы для семян гороха при их облучении низкоэнергетическим электронным пучком, выведенным в атмосферу, используя источник электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда.

Технология перспективна для практического применения в сельском хозяйстве при предпосевной обработке с целью обеззараживания семян и увеличения урожайности сельскохозяйственных культур.

Заведующий отделом радиационных
и генетических технологий
в растениеводстве, к.б.н.

Бондаренко Е.В.

Заведующий лабораторией
фитопатологии,
к.б.н.

Лой Н.Н.