

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

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:
«Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на
основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с
эффективным выводом пучка в атмосферу»

Направление подготовки:
11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

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

Аспирант



Дорошкевич Сергей Юрьевич

Научный руководитель:
Воробьёв Максим Сергеевич
д.т.н., с.н.с. ИСЭ СО РАН

Актуальность работы

Явление вторичной ионно-электронной эмиссии подразумевает под собой эмиссию электронов с поверхности твердого тела при его бомбардировке потоком ионов [1]. Среди множества практических применений вторичной ионно-электронной эмиссии, таких как контроль чистоты поверхности, ионно-оже спектроскопия, электронная микроскопия, ионно-плазменная обработка материала, имеет место создание электронных пучков большого сечения [2]. Неотъемлемой частью любого ускорителя на основе ионно-электронной эмиссии является высоковольтный катод, с поверхности которого происходит эмиссия электронов при ионной бомбардировке. Разность потенциалов между высоковольтным катодом и полым/плоским анодом провоцирует зажигание высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Ионная бомбардировка поверхности катода происходит либо ионами, рожденными в плазме ВТР, либо ионами плазменного анода, который специально создается вспомогательным разрядом с отдельным источником электропитания. Использование вспомогательного разряда позволяет перейти к несамостоятельному режиму горения ВТР, тем самым снизить рабочее давление, уменьшить вероятность перехода ВТР в дуговой разряд, обеспечить стабильную генерацию непрерывного электронного пучка.

Широкоапертурные ускорители электронов на основе ионно-электронной эмиссии разрабатываются и исследуются с середины 20-го столетия, а область их применения включает в себя накачку газовых лазеров [3], генерацию озона для очистки сточных вод [4], отверждение полимерных покрытий [5] и др. Преимуществами ускорителей на основе ионно-электронной эмиссии перед ускорителями других типов (термоэмиссионные, взрывозэмиссионные, с плазменным катодом) являются относительная простота конструкции, отсутствие нагревательных элементов, высокий срок службы, умеренные требования к насосной группе, возможность управление током пучка без изменения ускоряющего напряжения. Однако имеется

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) [6, 7, 8]. Обеспечение коэффициента вывода пучка в атмосферу выше 0,5 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 необходимости изменять конфигурацию электродной системы.

В рамках данной работы предлагается провести исследование по возможности повышения коэффициента вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу 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.

Целью работы является повышение эффективности вывода электронного пучка в атмосферу в ускорителях на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда за счет использования импульсно-периодического режима генерации вспомогательного орбитронного разряда с частотой десятки кГц.

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

1. Обзор литературы, посвященной исследованию способов повышения эффективности вывода электронного пучка в атмосферу в ускорителях на основе ионно-электронной эмиссии.

2. Определение параметров вспомогательного тлеющего разряда и эмиссионной плазмы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с диапазоном частот 1–70 кГц и изменении коэффициента заполнения импульса от 0,2 до 0,8.

3. Определение изменения параметров разряда и эмиссионной плазмы при подаче ускоряющего напряжения величиной до 150 кВ и коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу при генерации вспомогательного разряда в режимах, описанных в п.2.

4. Определение распределения плотности тока по сечению пучка при генерации вспомогательного разряда в режимах из п.2.

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. Определение распределения концентрации плазмы вспомогательного разряда;

5. Определение распределения плотности тока по сечению выведенного пучка с использованием созданной автоматизированной системы измерения.

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Использование самостоятельного тлеющего разряда орбитронного типа с полым катодом в режиме импульсно-периодической генерации с частотой следования импульсов десятки килогерц позволяет повысить концентрацию эмиссионной плазмы до четырех раз по сравнению с непрерывном режимом путем изменения коэффициента заполнения импульсов в диапазоне 0,2 – 0,5 при стабилизации среднего тока разряда от 30 до 100 мА и площади полого катода $\sim 2 \text{ м}^2$.

2. Применение импульсно-периодического режима генерации вспомогательного тлеющего разряда орбитронного типа с частотой следования импульсов 5 – 30 кГц и коэффициентом их заполнения 0,2 – 0,5 при стабилизации среднего тока разряда позволяет повысить мгновенное значение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу по сравнению с непрерывным режимом с 0,25 до 0,6 без изменения конструкционных параметров ионно-электронной оптической системы за счет сокращения длительности процессов, обеспечивающих увеличение тока в ускоряющей промежутке, и наличия продолжительной паузы между импульсами.

3. Генерация вспомогательного самостоятельного тлеющего разряда орбитронного типа в импульсно-периодическом режиме с частотой 10 – 20 кГц снижает неоднородность распределения плотности тока пучка сечением $45 \times 65 \text{ см}^2$ на 10 – 30 % по сравнению с непрерывным режимом генерации при сохранении средней за период плотности тока электронного пучка.

4. Создан автоматизированный ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда, генерирующий широкоапертурный электронный пучок с площадью поперечного сечения $45 \times 65 \text{ см}^2$, энергией 100 – 150 кэВ, плотностью электронного тока пучка в

импульсе до 15 мкА/см^2 и ее среднему значению за период 6 мкА/см^2 , с коэффициентом вывода пучка в атмосферу до 0,6 при частоте генерации $5 - 30 \text{ кГц}$ и коэффициенте заполнения импульсов $0,2 - 0,5$.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

1. Достоверность **первого** научного положения подтверждается использованием стандартной методики определения параметров плазмы с одиночным зондом Ленгмюра, а также измерением ≈ 8000 точек для каждой зондовой вольт-амперной характеристики; проведенным расчетом толщины прикатодного слоя, используя общепринятую формулу расчета.

2. Достоверность **второго** научного положения подтверждается стандартным способом определения коэффициента вывода через отношение тока пучка к току нагрузки высоковольтного источника. Наибольшая ошибка возможна при определении тока пучка, которая в первую очередь связана с коэффициентом отражения электронов от коллектора, достигающего 0,3. Однако, учет данного коэффициента лишь добавит ток электронного пучка и повысит коэффициент вывода в атмосферу.

3. Достоверность **третьего** научного положения подтверждается использованием в автоматизированной системе 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.

Научная новизна

1. Определены параметры орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме генерации с частотой $1 - 70 \text{ кГц}$, коэффициентом заполнения импульса $0,2 - 0,8$, амплитудой тока разряда

50 – 300 мА, и показано влияние генерации электронного пучка на распределение параметров эмиссионной плазмы.

2. Представлен способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей на основе несамостоятельного ВТР, характеризующийся высокочастотной (десятки килогерц) генерацией вспомогательного разряда и управлением коэффициентом заполнения импульсов (Патент RU № 2772817, приоритет от 01.10.2021 г.)

3. Обнаружено, что генерация вспомогательного разряда с частотой 10 – 20 кГц позволяет снизить неоднородность распределения плотности электронного тока по сечению пучка на 10 – 30 % по сравнению с непрерывным режимом генерации при сохранении средней за период плотности тока электронного пучка в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР.

Практическая значимость

1. Полученные параметры плазмы орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом (десятки килогерц) режиме генерации могут быть использованы при проведении численных экспериментов с разрядами данного типа.

2. Проведенное моделирование полезно для описания физических процессов в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР.

3. Определен диапазон частот для генерации вспомогательного разряда, в котором достигается повышение эффективности вывода электронного пучка.

4. Продемонстрировано снижение неоднородности распределения плотности тока электронного пучка в атмосфере при переходе с непрерывного режима генерации вспомогательного разряда в импульсно-периодический.

Апробация результатов работы

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

1. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР 2023» (17 – 19 мая, 2023 г.), Томск, Россия;
2. 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;
3. 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;
4. XII Международная конференция «Химия нефти и газа» (26 – 30 сентября, 2022 г.), Томск, Россия;
5. XII Всероссийская конференция по физической электронике, ФЭ – 2022 (19 – 22 октября, 2022 г.), Махачкала, Россия;
6. 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;
7. Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных наук – 2020» (21 – 24 апреля, 2020 г.), Томск, Россия.

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 М.С. Воробьёвым и Н.Н. Ковалем при участии автора работы.

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

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Описание экспериментальной установки

Исследуемый широкоапертурный ускоритель на основе несамостоятельного ВТР позволяет генерировать и выводить в атмосферу непрерывный электронный пучок сечением $650 \times 450 \text{ мм}^2$, энергией 150 кэВ и током до 30 мА [9, 10]. Конструкция ускорителя (Рисунок 1) имеет два основных промежутка: дрейфовый промежуток 1, в котором горит вспомогательный разряд, генерирующий эмиссионную плазму и формирующий плазменный анод, и ускоряющий промежуток (область горения несамостоятельного ВТР) 2, в котором заряженные частицы приобретают высокую энергию, соответствующую ускоряющему напряжению. Промежутки разделены анодной решеткой 5 с отверстиями щелевого типа. Конфигурация отверстий в анодной решетке повторяет конфигурацию отверстий в водоохлаждаемой опорной решетке выводного окна, перекрытого алюминий-магниевой фольгой марки АМг-2н толщиной 30 мкм. Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами [11, 12]. В качестве полого катода используются стенки вакуумной камеры 7 (площадью $\approx 21000 \text{ см}^2$), а анодом служат две вольфрамовые проволоки 4 диаметром 0,035 см и длиной 85 см (суммарной площадью $\approx 18 \text{ см}^2$), натянутые вдоль длинной стороны выводного окна и находящиеся в геометрической тени для

электронного пучка. Рабочий газ гелий напускается в область горения вспомогательного разряда, рабочее давление составляет 1 – 5 Па. Ионы, эмитированные с границы анодной/эмиссионной плазмы и прошедшие через отверстия анодной решетки, набирают энергию в ускоряющем промежутке и бомбардируют поверхность высоковольтного катода, находящегося под потенциалом до – 150 кВ относительно “земли”, что приводит к вторичной ионно-электронной эмиссии. Часть ионов нейтрализуется в высоковольтном зазоре, и бомбардировка катода в этом случае осуществляется нейтралами, имеющими широкий энергетический спектр [13]. В результате такой бомбардировки возникают вторичные электроны, которые ускоряются по направлению к анодной решетке, дрейфуют через плазму вспомогательного разряда и, проходя через каналы выводного фольгового окна, выводятся в атмосферу.

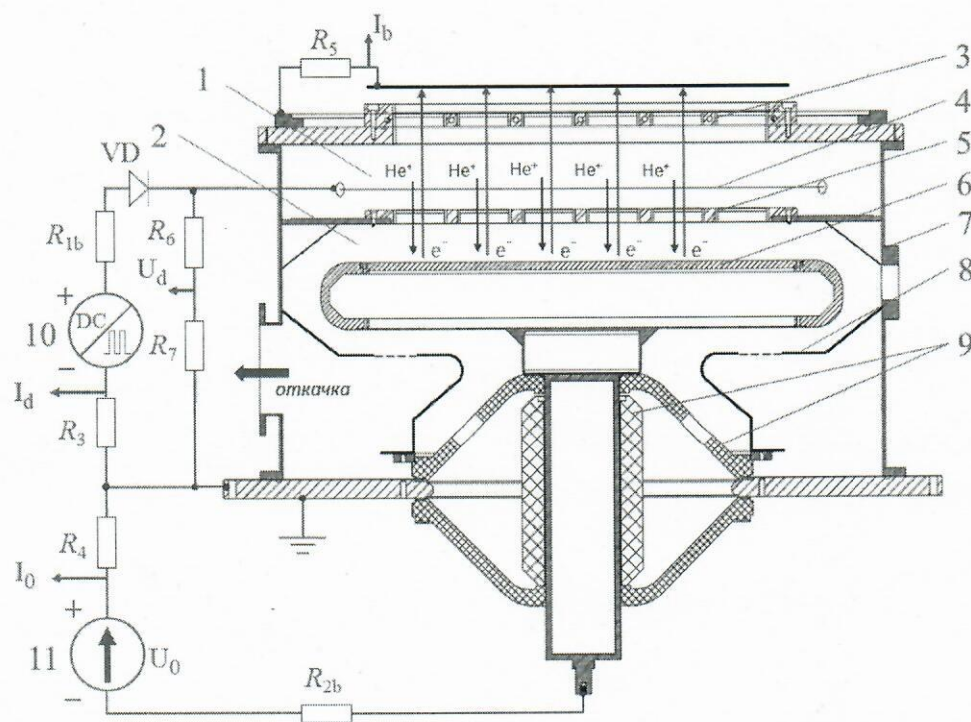


Рисунок 1. Схема ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР. 1 – дрейфовый промежуток; 2 – ускоряющий промежуток; 3 – выводное фольговое окно; 4 – тонкопроволочный анод; 5 – анодная решетка; 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера; 8 – экран; 9 – изоляторы; 10 – источник питания вспомогательного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

Генерация вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника электропитания, который способен работать как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой 1–100 кГц со стабилизацией среднего значения тока. Импульсный режим генерации вспомогательного разряда позволяет обеспечить большую амплитуду тока вспомогательного разряда и концентрацию эмиссионной плазмы за счет изменения коэффициента заполнения импульсов. Ранее подобная регулировка, но в более низкочастотном режиме была продемонстрирована при использовании источника электронов с сеточным плазменным катодом [14]. Изменение частоты следования импульсов при этом позволяет управлять длительностью импульса тока разряда и паузой между импульсами, которая для рассматриваемой высокочастотной генерации разряда находится в диапазоне 5–800 мкс.

Генерация эмиссионной плазмы в импульсно-периодическом режиме

Импульсно-периодический режим генерации в данной работе характеризуется частотой следования импульсов $f = 1 - 70$ кГц, управлением амплитудой и длительностью импульса путем изменения коэффициента заполнения импульсов D от 0,2 до 0,8 при стабилизации среднего тока разряда.

Характерные осциллограммы и вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда в непрерывном ($D = 1$) и импульсно-периодическом режимах генерации для разных значений коэффициента заполнения импульсов D при стабилизации среднего тока представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Наибольшее напряжение разряда соответствует наименьшему D за счет большей амплитуды тока разряда и растущей ВАХ. Поэтому напряжение разряда в непрерывном режиме всегда меньше, чем в импульсно-периодическом при одинаковом среднем токе разряда.

Амплитудное значение тока разряда на одном проволочном аноде определяется как:

$$I_m = \frac{I_{dcp}}{2D}, \quad (1)$$

где I_m – амплитудное значение тока; D – коэффициент заполнения импульса; I_{dcp} – среднее за период значение тока разряда с двух проволочных анодов.

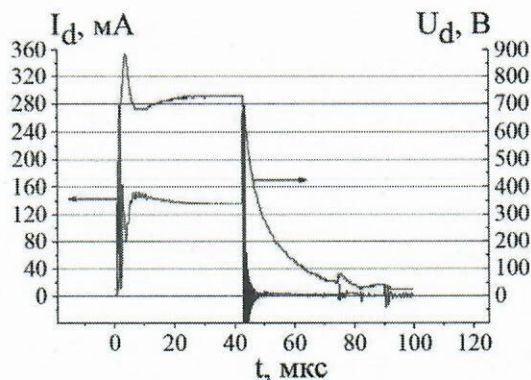


Рисунок 2. Осциллограммы тока и напряжения вспомогательного разряда при $f = 10$ кГц, $D = 40\%$, $p = 3$ Па, $I_{dcp} = 55$ мА.

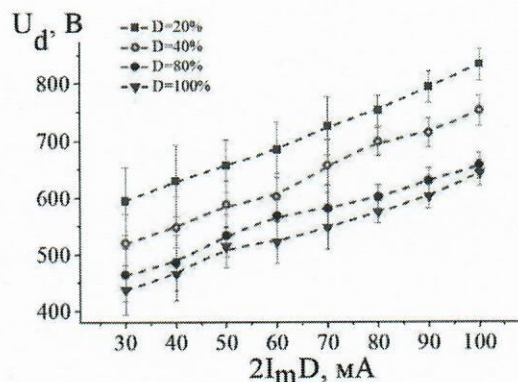


Рисунок 3. Вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда при разных значениях коэффициента заполнения импульсов D ($p = 3$ Па, $f = 20$ кГц).

Измерение параметров эмиссионной плазмы проводилось зондовым методом с использованием специально созданной автоматизированной системы измерения зондовых характеристик, которая 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. Измерение параметров плазмы (потенциал, концентрация и температура электронов) осуществлялось относительно полого катода разряда, используя электронную ветвь зондовой характеристики.

В таблице 1 представлены параметры плазмы исследуемого тлеющего разряда как в непрерывном режиме генерации, так и в импульсно-периодическом при разных D . В импульсно-периодическом режиме при уменьшении D проводилось соответствующее изменение времени измерения зондовой характеристики с 30 на 15 мкс.

Повышение амплитуды тока разряда как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме (при уменьшении D) приводит к

повышению напряжения горения разряда и потенциала плазмы относительно катода, росту температуры электронов и увеличению концентрации плазмы. При одинаковом среднем значении тока разряда, равного 60 мА, в импульсно-периодической генерации концентрация плазмы тем выше, чем меньше коэффициент D , что напрямую связано с повышением амплитуды тока разряда.

Таблица 1. Параметры плазмы тлеющего разряда орбитронного типа в разных режимах генерации.

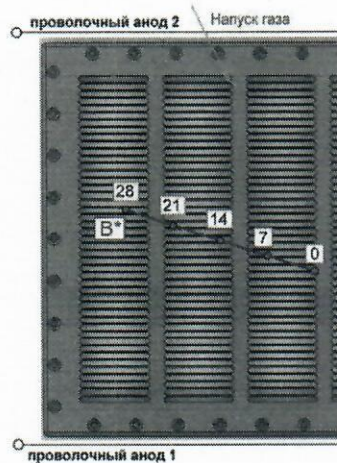
Режим генерации	φ_{pl} (В)	T_e (эВ)	$n_e \times 10^8$ (см ⁻³)
Непрерывный 60 мА	218	4,9	1,5
Непрерывный 90 мА	229	3,1	4,1
Импульсно-периодический $I_{d_cp} = 60$ мА $D = 0,4$ (30 мкс)	272	6,2	2,6
Импульсно-периодический $I_{d_cp} = 60$ мА $D = 0,2$ (15 мкс)	314	7,7	5,5

Если сравнивать режимы генерации плазмы при одинаковой амплитуде тока разряда, то в импульсно-периодическом концентрация плазмы ниже, однако наблюдается меньшая неоднородность распределения концентрации плазмы по сравнению с непрерывным (Рисунок 4б). Вероятнее всего, снижение концентрации плазмы связано с недостаточным временем для полного перестроения разряда с периферийной части полого катода в центр. За счет того, что время релаксации плазмы превышает паузу между импульсами, а за время импульса разряд не переходит в стационарную стадию, то плазма разряда с меньшей неоднородностью заполняет имеющийся объем. При отдалении от центра (координата 0 на рисунке 4а) потенциал плазмы в постоянном режиме уменьшается на ≈ 10 В, а в импульсном увеличивается на ≈ 20 В (Таблица 2), однако ширина прикатодного слоя d_k увеличивается в обоих случаях.

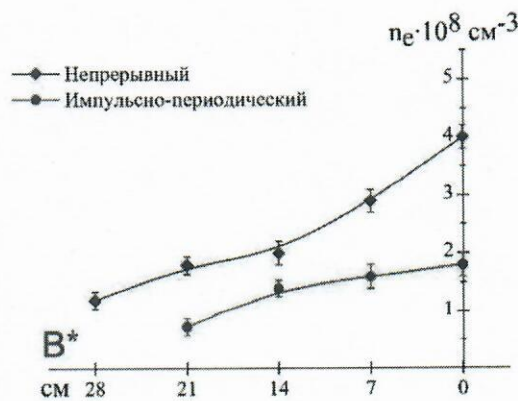
При подаче ускоряющего напряжения и генерации электронного пучка в импульсно-периодическом режиме, также как в непрерывном, наблюдается снижение напряжения разряда на ≈ 40 В и уменьшение потенциала плазмы на ≈ 20 В (Таблица 3).

Таблица 2. Распределение параметров плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме с одинаковой амплитудой тока разряда

Расстояние, (см)	Непрерывный режим $I_d = 120$ мА				Импульсный режим $I_{d\text{cp}} = 48$ мА, $I_{d\text{амп}} = 120$ 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	258	2,3	5,3	1,7	292	3,1	2,6	2,5
7	250	2,4	3,1	2,1	291	2,7	2,3	2,7
14	249	1,8	3	2,3	294	2,9	1,4	3,3
21	247	2	2,2	2,6	308	3	0,7	4,8
28	245	2,1	1,2	3,5	-	-	-	-



а)



б)

Рисунок 4. Схема перемещения зонда а) и распределение концентрации эмиссионной плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме с одинаковыми амплитудами тока разряда б). $p = 3,8$ Па, $I_d = 120$ мА, $D = 0,4$, $f = 10$ кГц.

Как и в таблице 2 при одинаковой амплитуде тока разряда в импульсно-периодическом режиме концентрация меньше, однако, если сравнивать

непрерывный режим со средним значением тока, импульсно-периодический режим превосходит по величине концентрации плазмы как без ускоряющего напряжения, так и при генерации пучка. В дальнейшем будут сравниваться режимы с одинаковым средним значением тока вспомогательного разряда I_d .

Подача ускоряющего напряжения в импульсно-периодическом режиме, также как и в непрерывном, выравнивает распределение концентрации плазмы (Рисунок 5а), при этом становится возможным измерить параметры плазмы имеющимся зондом в тех точках (координата 28 на рисунке 4), в которых без ускоряющего напряжения, зондовая характеристика не поддавалась анализу из-за малого тока на зонд и большого разброса точек.

Таблица 3. Параметры плазмы в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при генерации электронного пучка

Режим генерации	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	596	216	4,2	1	2,9
	100	540	196	3,6	0,8	3
Импульсно-периодический $I_{d\text{cp}} = 24$ мА, $I_{d\text{амп}} = 60$ мА, $D = 0,4, f = 10$ кГц	0	561	275	2,3	0,47	5,9
	100	520	260	5,3	0,51	4,4
Импульсно-периодический $I_{d\text{cp}} = 60$ мА, $I_{d\text{амп}} = 150$ мА, $D = 0,4, f = 10$ кГц	0	603	274	4,3	1,58	2,8
	100	582	255	3	1,37	3,1

Если рассчитать ширину прикатодного слоя в каждой точке измерения параметров плазмы, то можно графически (Рисунок 5б) представить границу плазмы вспомогательного разряда со стороны анодной решетки (ось x представляет собой границу анодной решетки), поскольку электрическое поле в ускоряющем промежутке не проникает в область генерации вспомогательного разряда. По мере удаления от центра ширина прикатодного слоя растет, при этом генерация электронного пучка способствует выравниванию границы анодной плазмы как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме.

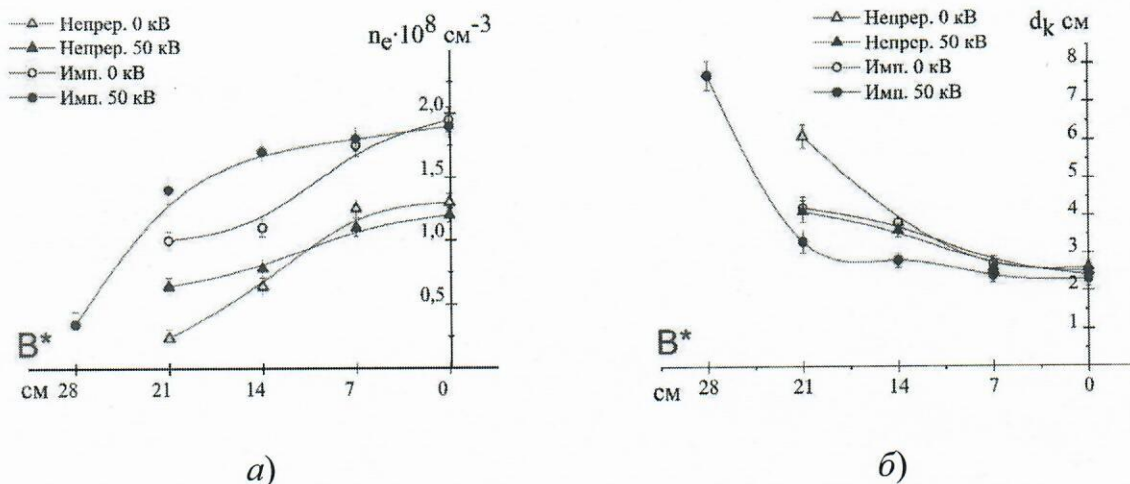
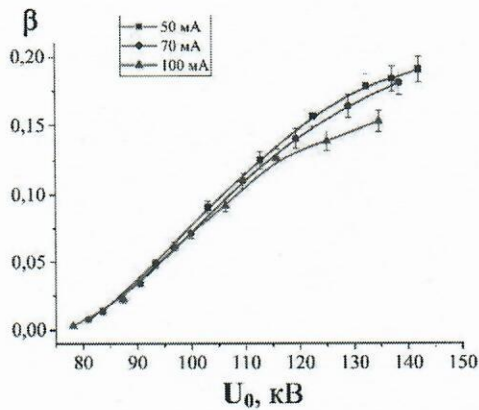


Рисунок 5 – Распределение концентрации плазмы *a)* и ширина прикатодного слоя *б)* в непрерывном и импульсно-периодическом режиме при наличии ускоряющего напряжения. $I_d = 60 \text{ мА}$, $D = 0,4$, $f = 10 \text{ кГц}$, $p = 2,7 \text{ Па}$.

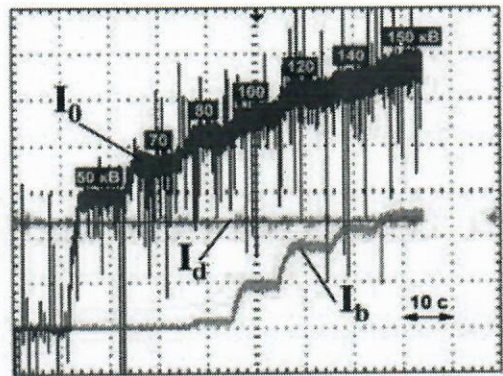
Генерация электронного пучка и его вывод в атмосферу

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. На резисторе $R_5 = 100 \text{ Ом}$ (см. рисунок 1) измерялась разность потенциалов, создаваемая током пучка относительно корпуса ускорителя. Для сравнения эффективности вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу в разных режимах генерации вспомогательного разряда использовался параметр – коэффициент вывода электронного пучка, рассчитываемый как отношение тока пучка, выведенного в атмосферу, к общему току в ускоряющем промежутке: $\beta = I_b/I_0$. В непрерывном режиме коэффициент вывода слабо зависит от величины тока вспомогательного разряда в исследуемом диапазоне, а при 100 мА даже снижается (Рисунок 6*a*) и составляет менее 0,25 при ускоряющем напряжении 140 кВ [15]. Осциллограммы токов ускорителя в непрерывном режиме вспомогательного разряда при ступенчатом изменении ускоряющего напряжения от 50 до 150 кВ приведены на рисунке 6*б*.

Слабая зависимость коэффициента β от тока вспомогательного разряда в непрерывном режиме генерации, вероятно, связана со слабым изменением положения границы эмиссионной плазмы и ИЭОС в диапазоне токов до 100 мА. Низкое значение $\beta < 0,25$ свидетельствует о значительных потерях тока пучка внутри электродной системы ускорителя. Потери электронного пучка складываются из потерь на анодной и выводной решетках, а также потерь внутри алюминий-магниевой выводной фольги [6].



а)



б)

Рисунок 6. Зависимости коэффициента вывода тока пучка β в атмосферу от ускоряющего напряжения в непрерывном режиме при разном токе вспомогательного разряда ($p = 3$ Па) а) и оциллограммы токов при повышении ускоряющего напряжения б), где I_0 – ток в ускоряющем промежутке (10 мА/дел), I_d – ток вспомогательного разряда (20 мА/дел), I_b – ток пучка (5 мА/дел).

Оциллограммы токов ускорителя при генерации вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме приведены на рисунке 7. Коэффициент вывода в этом случае определялся в момент окончания импульса тока вспомогательного разряда. Согласно рисунку 7, коэффициент β при $D = 0,8$ близок по значениям к непрерывному режиму. Уменьшение коэффициента D приводит к росту β : при $D = 0,2$ и $U_0 = 150$ кВ коэффициент вывода $\beta > 0,5$. При уменьшении коэффициента заполнения D соответственно увеличиваются ток и напряжение горения разряда, а следовательно, повышается концентрация эмиссионной плазмы, увеличивается прикатодное падение потенциала и изменяется ширина прикатодного слоя:

$$d_k = \varepsilon_0^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{ekT_e} \right)^{1/4} \cdot \frac{U_k^{3/4}}{n_i^{1/2}} \quad (2)$$

Все вышеописанные параметры влияют на ИЭОС таким образом, что коэффициент вывода пучка в атмосферу растет.

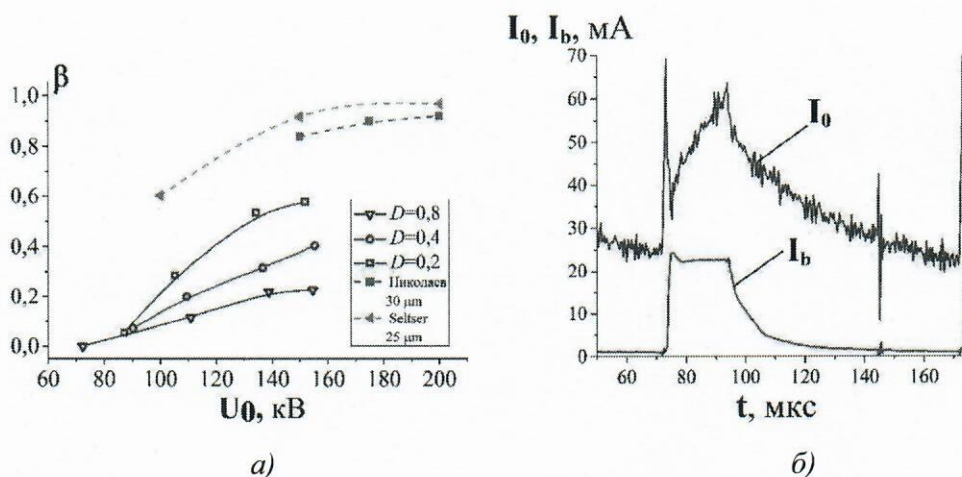


Рисунок 7. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсно-периодическом режиме при разном коэффициенте заполнения, $p = 3$ Па, $I_{dcp} = 30$ мА, $f = 10$ кГц а). Пунктиром представлены расчетные коэффициенты прохождения электронами алюминиевой фольги из работы Николаева [16] и Seltser [17]. Осциллограммы токов б) при $U_0 = 130$ кВ, $I_{dcp} = 50$ мА, $f = 10$ кГц, $D = 0,2$, $p = 3$ Па.

Кроме того, согласно осциллограммам (Рисунок 7б), после окончания генерации вспомогательного разряда начинается спад тока пучка I_b , выведенного в атмосферу, и за время паузы он становится близким к нулю. При этом ток в ускоряющем промежутке I_0 после прекращения генерации вспомогательного разряда I_d спадает с меньшей скоростью и во время паузы остается значительным. Таким образом, в момент паузы генерации вспомогательного разряда коэффициент β стремится к 0,01 – 0,1.

Наличие тока в ускоряющем промежутке в паузу генерации вспомогательного разряда можно объяснить релаксационными процессами в анодной плазме после прекращения импульса тока разряда. Для проверки данного предположения внутри вакуумной камеры был помещен цилиндрический коллектор площадью ≈ 130 см², на который в отсутствие

ускоряющего напряжения подавалось постоянное отрицательное напряжение смещения относительно полого катода для измерения тока ионов из плазмы вспомогательного тлеющего разряда (Рисунок 8а). Согласно рисунку 8б, после окончания импульса разряда I_d ток коллектора I_c спадает, но за время паузы ≈ 130 мкс не достигает нуля, а остается на уровне 100 мкА. Это позволяет сделать вывод, что время релаксации плазмы вспомогательного разряда существенно превышает время паузы между импульсами тока разряда. В результате во время паузы между импульсами тока разряда в ускоряющий промежуток продолжают поступать ионы из плазменного анода, поддерживающие горение ВТР.

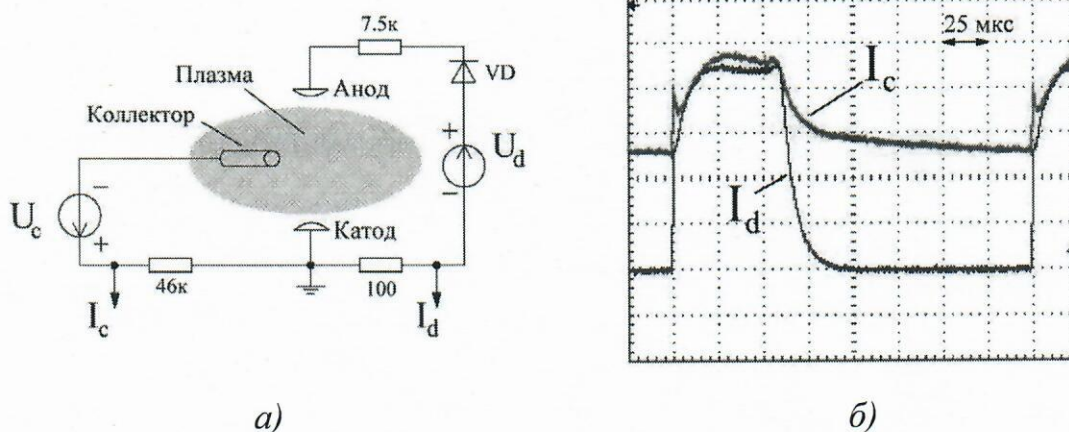


Рисунок 8. Схема подключения цилиндрического коллектора а); осциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/дел) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0,2 мА/дел), $I_{dcp} = 65$ мА, $f = 5$ кГц, $D = 0,3$, $p = 4,5$ Па.

По результатам анализа проведенных экспериментов была также построена зависимость коэффициента вывода β электронного пучка от ускоряющего напряжения U_0 при варьировании частоты генерации f вспомогательного разряда (Рисунок 9). Согласно рисунку 9, наибольшее значение коэффициента β достигается при генерации импульсов вспомогательного разряда с частотой 10 – 30 кГц. С повышением частоты генерации разряда от 10 до 70 кГц ток пучка в атмосфере изменяется незначительно, однако ток в ускоряющем промежутке при $f > 30$ кГц возрастает, что в итоге приводит к соответствующему снижению

коэффициента β . Важно отметить, что напряжение горения разряда U_d с ростом частоты следования импульсов изменяется незначительно. Так, при повышении частоты f от 1 до 70 кГц напряжение U_d , которое фиксировалось в конце импульса, изменяется менее чем на 50 В и составляет $U_d = 700 \text{ В} \pm 3\%$. Тем не менее, зависимость $\beta(f)$ может быть также обусловлена динамикой прикатодного падения потенциала в полом катоде, которая, в свою очередь, может способствовать фокусировке или расфокусировке ионного потока в области ускоряющего промежутка.

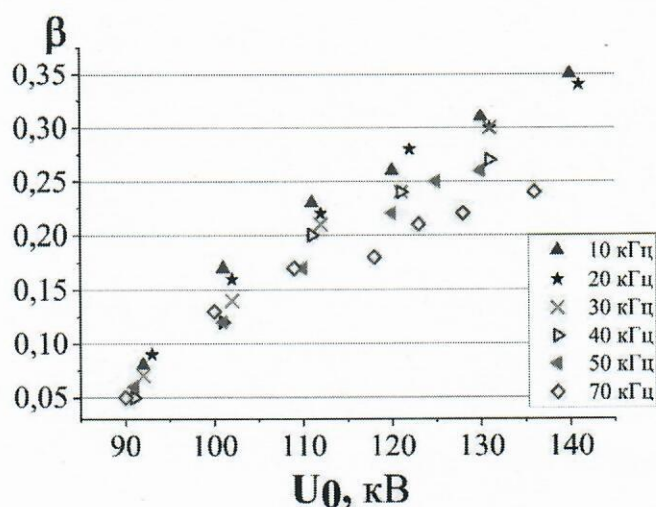


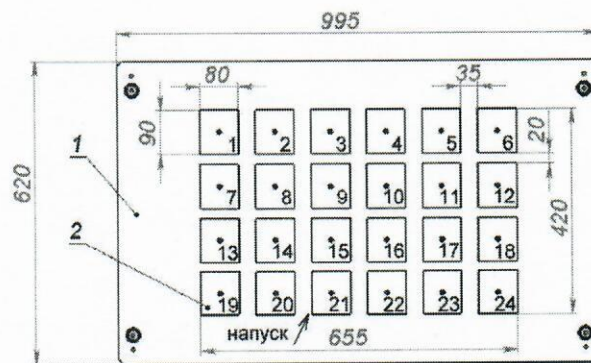
Рисунок 9. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсно-периодическом режиме при разной частоте генерации ($I_d = 50 \text{ мА}$, $D = 0,3$, $p = 3 \text{ Па}$).

Распределение плотности тока электронного пучка выведенного в атмосферу

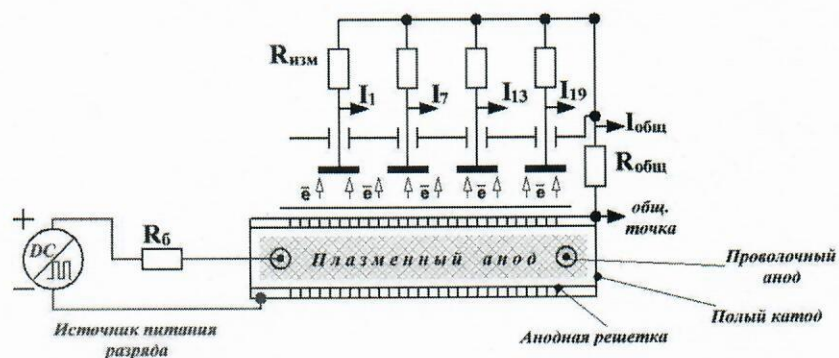
Для измерения распределения плотности тока по сечению пучка был создан секционированный коллектор (Рисунок 10). Конструкция коллектора включает в себя пластину из нержавеющей стали 1, на которой через изоляторы закреплены металлические коллекторы 2 размером $80 \times 90 \text{ мм}$ в количестве 24 штук. Для измерения тока на каждой коллекторной пластине использовались сопротивления $R_{изм}$ номиналом $10 \text{ кОм} \pm 1\%$.

Таким образом в предложенной схеме измерение распределения плотности тока пучка сводится к измерению напряжения на каждом $R_{изм}$,

которое появляется в результате протекания доли тока пучка через соответствующую коллекторную пластину, а полный ток пучка регистрируется на $R_{общ}$. Наличие множества коллекторных пластин приводит к необходимости использования автоматизированной многоканальной системы измерения плотности тока пучка. Для измерения распределения в импульсно-периодическом режиме генерации использовалась синхронизация по фронту импульса тока вспомогательного разряда. За один импульс генерации система опрашивает один коллектор, а для определения полной картины распределения происходит последовательное измерение тока на каждом коллекторе. Многократный (более 100 раз) повтор данного цикла позволяет получить усредненное распределение плотности электронного тока с передачей данных на персональный компьютер.



а)



б)

Рисунок 10. Чертеж секционированного коллектора а) и принципиальной схемы измерения распределения плотности тока пучка б).

Неоднородность распределения плотности тока пучка по сечению рассчитывалась как $\pm (j_{\text{макс}} - j_{\text{ср}})/j_{\text{ср}}$, где $j_{\text{ср}}$ и $j_{\text{макс}}$ – значения средней плотности тока по всем коллекторам и максимальное отклонение плотности от среднего соответственно.

На рисунке 11 приведено распределение плотности тока электронного пучка, генерируемого в непрерывном режиме вспомогательного разряда. 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, по-видимому, объясняется наибольшей вероятностью 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.

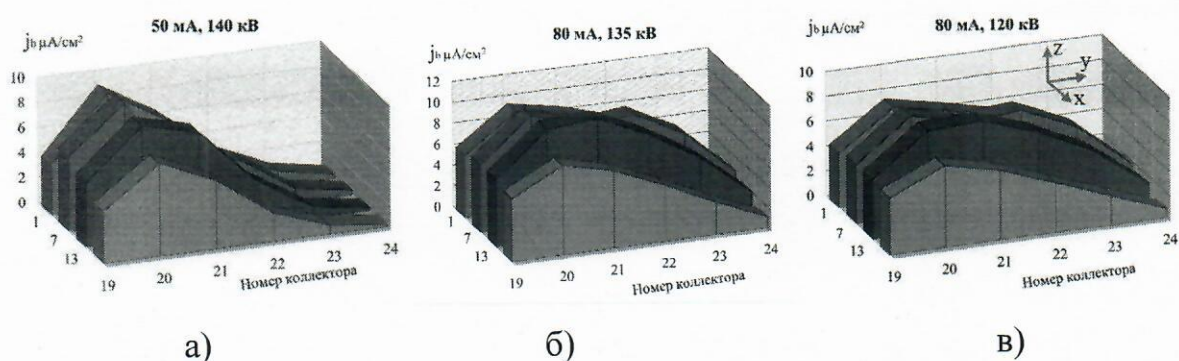


Рисунок 11. Распределение плотности тока пучка в атмосфере для разных ускоряющих напряжений и токов вспомогательного разряда, генерируемого в непрерывном режиме.

Такое распределение говорит 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. Увеличение ускоряющего напряжения приводит к повышению плотности тока пучка в атмосфере, однако слабо влияет на качественную картину его распределения. При повышении ускоряющего напряжения с 120 до 135 кВ среднее значение плотности тока увеличилось с 5,2 до 6,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,

а неоднородность снизилась на 5 %. Полученные распределения коррелируют с распределением концентрации анодной плазмы, представленным на рис. 5а.

Распределение плотности тока пучка в импульсно-периодическом режиме генерации приведено на рисунке 12. При ускоряющем напряжении 135 кВ было зарегистрировано распределение на 20-ой микросекунде (середина генерации вспомогательного разряда) и на 72-ой (середина паузы генерации вспомогательного разряда). В импульсно-периодическом режиме для сравнения с непрерывным режимом рассчитывалась средняя неоднородность в течение генерации вспомогательного разряда, среднее значение в паузу генерации и средняя неоднородность за период. Например, для частоты 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 пауза по 15.

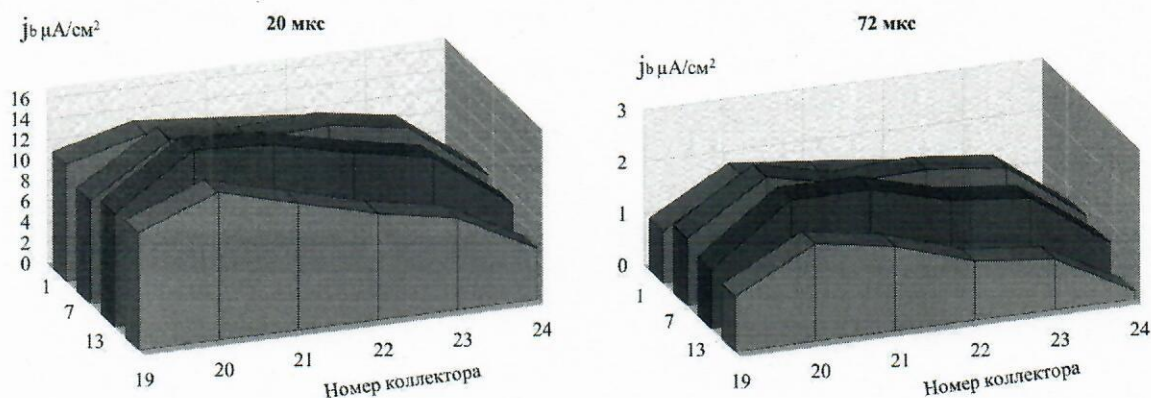


Рисунок 12. Распределение плотности тока пучка при импульсно-периодическом режиме генерации вспомогательного разряда $I_d = 80$ мА, $D = 0,4$, $f = 10$ кГц, $p = 3$ Па, $U_0 = 135$ кВ, во время генерации (на 20 -ой мкс) и паузы генерации разряда (на 72-ой мкс).

Из диаграмм видно, что распределение в импульсно-периодическом режиме генерации (10 кГц) также смещено в сторону напуска рабочего газа, однако по сравнению с постоянным режимом генерации зависимость от напуска становится менее выраженной. При переходе с постоянного режима $I_d = 80$ мА в импульсно-периодический: $f = 10$ кГц, $D = 0,4$, $I_{dcp} = 80$ мА неоднородность электронного пучка по сечению снижается на 20%, а средняя

плотность тока за период генерации в импульсно-периодическом режиме остается такой же величины, как и в непрерывном режиме ≈ 6 мкА/см². При этом в течение генерации вспомогательного разряда неоднородность составляет $\pm 30\%$, а в паузу достигает $\pm 60\%$. Максимум плотности тока в паузу генерации остается по-прежнему смещенным к центру системы и к напуску рабочего газа. Повышение частоты с 10 до 20 кГц приводит к повышению средней за период неоднородности распределения плотности тока пучка на 15%. На меньшей частоте в течение генерации разряда неоднородность пучка ниже, что, по-видимому, связано с более длительной генерацией анодной 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 $\pm 15\%$ в течение импульса разряда и средней за период неоднородностью $\pm 40\%$, 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 сгенерировать электронный пучок с меньшей неоднородностью плотности тока.

Основные выводы по научной работе

1. Определены параметры орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме генерации с частотой 1–70 кГц, коэффициентом заполнения импульса 0,2 – 0,8, амплитудой тока разряда 50 – 300 мА. Генерация электронного пучка в импульсно-периодическом режиме, также как в непрерывном, способствует снижению напряжения вспомогательного разряда на ≈ 40 В и уменьшению потенциала плазмы относительно полого катода на ≈ 20 В, при этом снижается неоднородность распределения концентрации эмиссионной плазмы на 20%.

2. 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. По-видимому, увеличение тока и напряжения горения разряда, а следовательно, повышение концентрации эмиссионной плазмы, уменьшение ширины прикатодного слоя и рост прикатодного падения потенциала вспомогательного разряда, вызванные снижением коэффициента заполнения D и соответствующим ростом амплитуды тока разряда, приводят к снижению потерь на анодной и опорной решетках и формированию более оптимальной ИЭОС.

3. В паузу 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 плазмы ВТР.

4. Генерация вспомогательного самостоятельного тлеющего разряда орбитронного типа в импульсно-периодическом режиме с частотой 10–20 кГц снижает неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка на 10–30 % по сравнению с непрерывным режимом генерации при сохранении средней за период плотности тока электронного пучка. Наименьшая неоднородность как в течение генерации вспомогательного разряда, так и в паузу достигается при меньших значениях коэффициента заполнения импульса.

Публикации автора по теме работы

1. 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.] // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 3. – С. 53-60.

2. Способ повышения энергетической эффективности источников электронов на основе ионно-электронной эмиссии / С.Ю. Дорошкевич, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, С.А. Сулакшин, В.А. Леванисов, В.В. Шугуров, В.И. Шин // Патент на изобретение 2772817 С1, 26.05.2022. Заявка № 2021128647 от 01.10.2021.

3. 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. Shklyaev // В сборнике: Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Congress Proceedings. Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. Tomsk, 2022. – С. 118-127.

4. 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 // В сборнике: Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Congress Proceedings. Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. Tomsk, 2022. – С. 109-117.

5. 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. Томск, 2022. – С. 315-316.

6. 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, [и др.] // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 15. Сер. "15th International Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications", GDP 2021". – 2021. – С. 012116.

7. Increasing the operation stability of the electron accelerator based on ion-electron emission / M.S. Torba, S.Yu. Doroshkevich, V.A. Levanisov [и др.] // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. 15. Сер. "15th International

Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications", GDP 2021". – 2021. – С. 012122.

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

9. 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 // В сборнике: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020. – 2020. – С. 310-314.

10. Electron accelerator based on ion-electron emission for generation of a wide-aperture beam / S. Doroshkevich, S. Sulakshin, M. Vorobyov [и др.] // В сборнике: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2020. – 2020. – С. 42-45.

11. 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.

12. 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.] // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. The proceeding 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications". Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – С. 012006.

13. 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.] // В сборнике: Proceedings - 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics, ISHCE 2018. – 2018. – С. 66-69.

Список цитируемой литературы

1. Мамедов, Н.В. Физические основы генерации ионных пучков в плазменных источниках нейтронных трубок / Н.В. Мамедов // Учебное пособие. – М.: Букки Веди. – 2021. – 388 с.
2. Брусиловский, Б.А. Кинетическая ионно-электронная эмиссия / Б.А. Брусиловский – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 184 с.
3. Clark, W.M., A long pulse high-current gun for e-beam sustained excimer lasers / W.M. Clark, G.J. Dunning // IEEE Journal of quantum electronics. – 1978. – V. qe-14. – №. 2. – pp. 126–129.
4. 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.
5. Широкоапертурные низкоэнергетические 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. 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.
7. Гаврилов, Н.В. Импульсный источник электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ПТЭ. – 1984. – №2. – С. 143–146.
8. 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.
9. 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.] // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 3. – С. 53-60.

10. Electron Accelerator Based on Ion-Electron Emission for Generation of a Wide-Aperture Beam / S. Doroshkevich, S. Sulakshin, M. Vorobyov [et. al.] // IEEE 2020. Proc. of 7th Int. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 21st Int. Symp. On High-Current Electronics (Tomsk). – 2020. – P. 42.

11. McClure, G. Low-pressure glow discharge / G. McClure // Appl. Phys. Lett. – 1963. – V. 2. – № 12. – P. 233.

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

13. Новиков, А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. / А.А. Новиков // М.: Энергоатомиздат. – 1983.

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

15. 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. – С. 012116.

16. 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.

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