

Минобрнауки России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11,

г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

http://www.inp.nsk.su, e-mail: inp@inp.nsk.su

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 20 НОЯ 2023 № 15311

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской
академии наук (ИЯФ СО РАН)

Академик РАН

Доктор физ.-мат. наук

Логачев Павел Владимирович



« _____ » 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук на диссертацию Дорощкевича Сергея Юрьевича

**«Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе
несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с эффективным выводом
пучка в атмосферу»,**

**представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника**

Актуальность темы диссертации

Электронные пучки большого сечения, выведенные в атмосферу, с энергией электронов в несколько сотен кэВ, используются для решения научных и технологических задач: радиационное отверждение лаковых покрытий, обработка сточных вод от загрязнений, инициирование плазмохимических процессов, радиационной стерилизации объектов медицинского назначения, накачки газовых лазеров, радиационная обработка семян сельскохозяйственной продукции и др. Для решения таких задач требуются надежные и долговечные ускорители электронов со стабильными параметрами, к которым в том числе относятся ускорители с самостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом (ВТР).

Ускорителям такого типа свойственна зависимость коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу от конфигурации электродной системы, эмиссионной способности высоковольтного катода и сформированной ионно-электронной оптической системы. Формирование последнего определяется типом используемого вспомогательного разряда и

параметрами генерируемой им эмиссионной плазмы. Таким образом, исследование режимов генерации вспомогательного разряда и их влияния на ионно-электронную оптическую систему с целью достижения высокой эффективности вывода электронного пучка является актуальной задачей. Кроме этого, данный подход позволяет обходиться без изменения конфигурации электродной системы, что значительно упрощает и снижает затраты на поиск и подготовку режимов работы ускорителя для технологических процессов электронно-пучковой обработки в ускорителях с несамостоятельным ВТР.

Для генерации эмиссионной плазмы зачастую используется орбитронный тлеющий разряд с полым катодом, отличающийся простой и надежной 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 пробое укоряющего промежутка. Поиск новых решений повышения стабильности горения разряда такого типа также является актуальной задачей, поскольку определяет надежность и стабильность работы ускорителя электронов в целом.

Оценка структуры и содержания работы

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 161 страницу текста, 86 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 153 наименования.

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, обозначены цель и задачи работы, приведены защищаемые научные положения, а также 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 пучками большого сечения (ПБС), а также их перспективность в электронно-пучковой области применения.

Во второй главе представлено подробное описание конструкции широкоапертурного ускорителя электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с выводом пучка в атмосферу, на котором проводились исследования в данной работе. Описаны методики и техника эксперимента с представлением принципиальных электрических схем созданных систем измерения.

Третья глава посвящена способу генерации вспомогательного тлеющего разряда с полым катодом, который характеризуется частотой следования импульсов в десятки килогерц с управлением амплитудой и длительностью импульса тока путем изменения коэффициента заполнения импульсов при стабилизации среднего тока разряда. Особое внимание уделено измерениям параметров эмиссионной плазмы вспомогательного разряда. Проведены оценки времени релаксационных процессов плазмы вспомогательного разряда, которые влияют на генерацию следующего импульса тока разряда, а также на генерацию электронного пучка. Отдельно рассматривается стабильность генерации вспомогательного разряда путем измерения количества переходов микровзрывов в дугу на поверхности 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 даются 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.

Содержание и структура диссертации соответствуют цели исследования. Диссертация выстроена логически, материал изложен последовательно, а ее содержание соответствует заявленной специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника и теме диссертации.

Автореферат и публикации адекватно и полно отражают содержание диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

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.

2. Достоверность второго научного положения подтверждается использованием низкоиндуктивных сопротивлений для осциллографирования тока выведенного пучка и тока в ускоряющей промежутке, отношение которых является коэффициентом 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.

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.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Орбитронный тлеющий разряд с полым катодом включен 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; определены параметры разряда и формируемой эмиссионной плазмы в данном режиме;

2. Определено влияние генерируемого электронного пучка на параметры эмиссионной плазмы вспомогательного разряда, которое заключается в снижении неоднородности распределения концентрации плазмы и в уменьшении потенциала плазмы относительно полого катода разряда;

3. Разработан способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей на основе несамостоятельного ВТР определением оптимальной частоты следования импульсов тока вспомогательного разряда в области десятков килогерц и коэффициента заполнения импульсов при стабилизации среднего тока разряда;

4. Продемонстрировано снижение неоднородности распределения плотности тока пучка, выведенного в атмосферу, при переходе от непрерывного к импульсно-периодическому режиму генерации вспомогательного разряда в ускорителе на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Представленная работа, позволяет использовать полученные в результате физических экспериментов данные для создания новых источников и ускорителей электронов на основе несамостоятельного ВТР, а также, используя предлагаемый импульсно-периодический режим вспомогательного разряда, модернизировать данные ускорители с целью повышения эффективности генерации и вывода электронного пучка в атмосферу. Кроме этого, определен диапазон частот следования импульсов для генерации вспомогательного разряда, в котором наблюдается повышение коэффициента вывода электронного пучка. Полученные параметры плазмы орбитронного тлеющего разряда в импульсно-периодическом режиме могут быть использованы при проведении численных экспериментов с разрядами данного типа. В работе отдельно рассматривается вопрос уменьшения возникающих микровзрывов на поверхности полого катода с помощью используемого режима генерации вспомогательного разряда. Такие микровзрывы способны перейти в дуговой разряд и отрицательно влияют как на стабильность самого орбитронного разряда, так и на генерацию ВТР и электронного пучка, соответственно. Важным параметром для каждого электронного пучка большого сечения является неоднородность распределения плотности тока по его сечению, поэтому в диссертационной работе отдельно рассматривается возможность снижения данной неоднородности в импульсно-периодическом режиме по сравнению с непрерывным режимом генерации вспомогательного разряда.

Замечания по диссертационной работе

1. Есть отдельные опечатки, не влияющие на понимание текста, например, "... укоряющего промежутка." (стр.5 диссертации, 6-я строка снизу).

2. Не приведена оценка погрешности при измерении электронной температуры ленгмюровским зондом. Судя по рисунку 2.14б, она не мала.

3. При измерениях параметров вспомогательной плазмы ленгмюровским зондом под него и его штوك укладывалась фольга (стр. 77) площадью $\sim 10 \times 30$ см², закрывая около 10% площади окна. Проверялось ли влияние площади фольги на распределение плотности вспомогательной плазмы, на выходной ток пучка и на работу ленгмюровского зонда, из текста не ясно.

4. Для исследования статистики возникновения катодных пятен в орбитронном тлеющем разряде вместо рабочего газа гелия был использован азот, имеющий меньшую электрическую прочность. Однако, автором не проведена количественная оценка аналогичных процессов в исследуемом источнике на основе полученных данных.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации, представляющей собой законченное научное исследование. Достоверность выводов и результатов диссертации, а также их новизна и актуальность не вызывают сомнений.

Заключение

Диссертационная работа Дорошкевича Сергея Юрьевича «Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с эффективным выводом пучка в атмосферу» является законченной научно-квалификационной работой, в которой проведено исследование работы широкоапертурного источника электронного пучка в новом импульсно-периодическом режиме и определены оптимальные условия для повышения выхода пучка в атмосферу и однородности плотности его тока. Исследование проведено на высоком уровне и имеет существенное практическое значение для разработки и применения источников такого типа. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Дорошкевич С.Ю. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных на открытом научном семинаре плазменных лабораторий ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, состоявшемся 7 ноября 2023 г. и утвержден на заседании Ученого совета плазменных лабораторий 23 ноября 2023 г., протокол № 8.

Проект отзыва составил:

старший научный сотрудник. ИЯФ СО РАН,
кандидат технических наук,

шифр и наименование научной специальности: 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

телефон: +7 (383) 329-49-24;

электронная почта: V.T.Astrelin@inp.nsk.su



Астрелин Виталий Тимофеевич

Подпись В.Т. Астрелина заверяю
Ученый секретарь ИЯФ СО РАН,
кандидат физико-математических наук

телефон: +7 (383) 329-47-99;

электронная почта: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su



Алексей Викторович Резниченко