

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Дорошкевича Сергея Юрьевича** «Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с эффективным выводом пучка в атмосферу» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы исследования. Диссертация **Дорошкевича Сергея Юрьевича** посвящена исследованию влияния импульсно-периодического режима генерации плазмы вспомогательного тлеющего разряда с высокой частотой следования импульсов на параметры формируемого электронного пучка большого сечения (ПБС), в частности, на коэффициент вывода пучка, стабильность и однородность распределения плотности тока по сечению в ускорителе на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Актуальность тематики определяется перспективностью данного класса ускорителей, которые могут использоваться в различных электронно-химических и плазмохимических технологиях. Автором продемонстрирована апробация новых технических решений, ориентированных на расширение параметров, выводимых в атмосферу ПБС, повышение стабильности работы данных ускорителей в целом, и продолжает быть актуальной с учетом возможностей современной элементной базы для создания различных систем электропитания.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Во **введении** автором обосновывается актуальность данной тематики с кратким описанием проблематики ускорителей на основе ВТР, формулируется цель и задачи работы, описывается научная новизна полученных результатов с указанием их научной и практической значимости, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена сравнительному анализу ускорителей электронов с выводом ПБС в атмосферу. Рассмотрены ускорители на основе ВТР, термоэлектронной и взрывной эмиссии, а также ускорители с плазменным катодом. Отмечена перспективность ускорителей на основе несамостоятельного ВТР с формулированием актуальных задач по их совершенствованию: снижение потерь электронного ПБС в электродной системе, повышение однородности распределения плотности тока пучка по сечению, повышение стабильности работы ускорителей электронов такого типа, заключающееся в увеличении электрической прочности высоковольтного ускоряющего зазора.

Вторая глава включает в себя описание методики и техники проведенных экспериментов с подробным описанием конструкции созданного ускорителя. Представлены принципиальные электрические схемы созданных систем диагностики для измерения параметров эмиссионной плазмы и для определения неоднородности распределения плотности тока пучка по его сечению.

В третьей главе подробно описаны режимы генерации вспомогательного разряда (непрерывный и импульсно-периодический), в качестве которого выступает орбитронный тлеющий разряд с полым катодом. Особое внимание уделено измерению параметров плазмы вспомогательного разряда и проведению сравнения режимов генерации. При этом измерения приводились как без включения высоковольтного источника, так и с генерацией электронного пучка. Приводятся оценки времени релаксационных процессов в плазме вспомогательного разряда, что влияет как на стабильность горения вспомогательного разряда, так и на генерацию ВТР и электронного пучка. Отдельно рассмотрен вопрос возникновения катодных пятен на поверхности полого катода вспомогательного разряда. Автором, в частности, измерялось число срабатываний «дугозащиты» источника питания разряда, что косвенно указывает на количество переходов вспомогательного тлеющего разряда в дуговую форму.

Четвертая глава включает в себя измерения тока электронного пучка в атмосфере и тока ВТР в ускоряющей промежутке в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. Сравнение двух режимов осуществлялось оценкой коэффициента вывода пучка в атмосферу. Показано, что в импульсно-периодическом режиме при генерации вспомогательного разряда при стабилизации среднего тока разряда и управлении его амплитудой и длительностью изменением коэффициента заполнения импульсов коэффициент вывода пучка в атмосферу увеличивается. В главе рассматриваются процессы, способствующие изменению эффективности вывода. С результатами физического эксперимента соотнесены результаты траекторного анализа как ионов из вспомогательного разряда, так и электронов с поверхности металлического катода ВТР. Проведены оценки потерь электронного ПБС в электродной системе ускорителя и сделаны предложения по их снижению. Отдельно рассматривается неоднородность распределения плотности тока ПБС, выведенного в атмосферу, и демонстрируется снижение неоднородности при переходе от непрерывного к импульсно-периодическому режиму генерации вспомогательного разряда. В конце главы рассмотрены перспективы и возможные применения модернизированного широкоапертурного ускорителя электронов.

В **заключении** кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов по результатам исследований подтверждается использованием автором широкого набора современных методов экспериментальных исследований, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 9 всероссийских и международных конференциях, опубликованы в 15 научных работах, среди которых 2 в журналах перечня ВАК, 1 патент на изобретение, 10 статей в журналах, индексируемых Web of science и Scopus.

Научная новизна:

1. Вспомогательный орбитронный тлеющий разряд включен в ранее не используемом режиме, а именно: импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов десятки килогерц, при этом среднее значение тока разряда стабилизируется, а управление амплитудой тока (до 300 мА) и длительностью импульса (10–500 мкс) осуществляется изменением коэффициента заполнения импульса (0,2–0,8);
2. Определены параметры плазмы орбитронного разряда и проведено их сравнение в непрерывном и импульсно-периодическом режимах, в том числе при генерации электронного пучка;
3. Продемонстрировано повышение коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу при генерации вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме;
4. Показано снижение неоднородности распределения плотности тока электронного пучка в атмосфере и повышение стабильности работы ускорителя электронов в целом при генерации плазмы вспомогательного разряда в импульсно-периодическом режиме.

Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в непосредственной демонстрации перспективности использования предлагаемого режима генерации вспомогательного разряда в ускорителях на основе несамостоятельного ВТР, что обусловлено несколькими фактами. Во-первых, импульсно-периодический режим с частотой десятки килогерц, позволяя сохранить среднюю мощность выведенного электронного пучка, способствует снижению вероятности возникновения катодных пятен на стенках полого катода разряда и повышению однородности распределения концентрации плазмы, что приводит к увеличению стабильности работы ускорителя и снижению

неоднородности распределения плотности тока ПБС по сечению. Во-вторых, экспериментально показана возможность увеличения коэффициента вывода тока ПБС в атмосферу при генерации вспомогательного разряда, что обусловлено ограничением времени развития фонового тока ВТР и наличием паузы между импульсами, в течение которой ток в ускоряющем промежутке спадает. При этом, в работе автор попытался выделить диапазон параметров генерации вспомогательного разряда, в котором наблюдается данный эффект. В-третьих, результаты траекторного анализа заряженных частиц вносят дополнительное понимание физических процессов при генерации и в течение паузы вспомогательного разряда и не противоречат ранее полученным результатам других авторов, занимающихся ускорителями на основе ВТР.

Замечания по диссертационной работе:

1. При измерении тока пучка, выведенного в атмосферу, использовался коллектор в виде металлической пластины из нержавеющей стали, расположенной на расстоянии 2 см от выводной фольги, при этом потенциал измерительного коллектора составлял величину до 5 В, что является достаточно высокой величиной при таких измерениях. При этом автор работы не рассматривает возможность возникновения дополнительных ионов и электронов между фольгой и коллектором, а также отсутствует информация об их влиянии на измерение выведенного тока пучка в газе при атмосферном давлении.
2. На рис. 4.13 приведены результаты моделирования по распределению ионов на поверхности высоковольтного катода при разном потенциале эмиссионной плазмы, из которого видно, что наилучшим распределением с точки зрения наибольшей эффективности вывода электронного пучка в атмосферу является наименьший потенциал плазмы (уровня 50–100 В). Однако путей реализации такого подхода в диссертационной работе не представлено.
3. Из рис. 4.6а видно, что коэффициент β снижается в течение импульса тока пучка вне зависимости от коэффициента заполнения импульса D . При этом в начальный момент импульса коэффициент β достигает максимальных значений и при $D=0,2$ может достигать $\beta \approx 0,7$ без учета ионной компоненты тока ВТР, а в паузу генерации он близок к нулю. Средняя мощность пучка в частотном режиме при этом достигнута примерно такой же как в непрерывном. В чем всё же энергетическая выгода от нового режима генерации электронного пучка?

Указанные недостатки не затрагивают положений и сделанных выводов, а также не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы Дорошкевича С.Ю.


Автореферат и опубликованные научные работы в полной мере отражают основное содержание диссертационной работы.

Заключение

Считаю, что рецензируемая диссертационная работа «Широкоапертурный импульсно-периодический ускоритель электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда с эффективным выводом пучка в атмосферу» может быть квалифицирована в целом как новое научное достижение, имеющее важное фундаментальное и социально-экономическое значение и соответствует всем требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель Дорошкевич Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Официальный оппонент:

Начальник лаборатории НИЛ КЛ-8
НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», д.т.н.


С.Л. Косогоров

Подпись Косогорова С.Л. удостоверяю
Научный руководитель
АО «НИИЭФА»,
доктор физико-математических наук



О.Г. Филатов

Данные официального оппонента:

Косогоров Сергей Леонидович, д.т.н.

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»)

Начальник лаборатории НИЛ КЛ-8 НТЦ «Синтез»

Почтовый адрес: Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой,
дорога на Металлострой, д.3

Телефон: 89812)464-89-63

Адрес электронной почты: kosogorov@sintez.niiefa.spb.su