

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Воробьёва Максима Сергеевича
«Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом
на основе дугового разряда низкого давления
с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Электронные пучки большого сечения (ПБС), генерируемые широкоапертурными ускорителями, находят широкое применение в различных областях науки и техники – для газовых лазеров, в плазмохимии и радиационной химии, для стерилизации медицинских инструментов и пищевых продуктов, генерации СВЧ излучения и т.д. Одной из наиболее сложных задач в широкоапертурных ускорителях с выводом электронного пучка в атмосферу является минимизация токовых потерь в опорной решетке выпускного фольгового окна. Другой не менее важной проблемой является достижение высокой электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка с целью повышения стабильности и надежности работы ускорителя и исключения возможности возникновения аварийных ситуаций.

Источники электронов на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы являются перспективным типом устройств, генерирующих ПБС. В диссертационной работе представлены результаты исследований источника электронов с плазменным катодом на основе самостоятельного импульсного дугового разряда низкого давления с катодным пятном, обоснованно выбранным автором в качестве основного объекта исследований. Генерируемая таким разрядом плазма имеет сравнительно низкую неоднородность концентрации, что позволяет достигать высокой однородности распределения плотности тока по сечению пучка, а низкая электронная температура обуславливает слаборасходящийся электронный

пучок. Наличие катодного пятна приводит к распылению катода и появлению микрокапель материала катода на эмиссионном электроде, что провоцирует электрические пробои высоковольтного ускоряющего промежутка.

Таким образом, задача создания стабильно работающих источников электронных ПБС с высокой средней мощностью и эффективным выводом пучка в атмосферу является весьма **актуальной**, а ее решение позволит расширить сферу возможных применений таких устройств, как в научных исследованиях, так и для технологических целей.

Диссертационная работа выполнена в объеме 197 страниц печатного текста, содержит введение, четыре главы и заключение, 76 рисунков, 1 таблицу. Библиография включает 166 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов и представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава диссертации содержит подробный обзор отечественной и зарубежной литературы и сравнительный анализ различных типов эмиттеров, применяемых для генерации электронных пучков большого сечения, их электронно-оптические системы, особенности, достоинства и недостатки. На основании проведенного рассмотрения соискателем сформулированы основные задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во **второй главе** диссертации описывается экспериментальная установка, приведены основные вольтамперные характеристики, показаны недостатки существующего макета источника электронов. Также приведены основные методики измерений. Полученные экспериментальные данные при использовании различных методик, весьма удовлетворительно совпадают друг с другом.

В третьей главе приведены результаты исследований нового, разработанного автором, катодного узла, решению вопросов устранения попадания капельной фракции материала катода на эмиссионный электрод и уменьшению потерь тока пучка на опорной решетке выпускного фольгового окна при использовании многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системы. Кроме этого, отдельное внимание уделено процессам переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, что позволило увеличить коэффициент извлечения тока из многоапертурного плазменного катода в ускоряющий промежуток.

Четвертая глава посвящена вопросам разработки, создания и применения источника электронов с плазменным катодом, генерирующего ПБС. Описаны особенности конструкции разработанного источника и ключевые моменты его автоматизации. Приведены некоторые примеры использования источника электронов с плазменным катодом и выводом ПБС в атмосферу, подтверждающие перспективность применения ускорителей такого типа в радиационно-стимулированных процессах.

Научная новизна рассматриваемой диссертационной работы заключается, в том, что впервые разработаны новые катодные узлы, обеспечивающие генерацию катодной плазмы, с увеличенным ресурсом работы и более широким диапазоном тока разряда в сравнении с традиционно используемыми катодными узлами на основе ячейки Пеннинга.

Исследована работа многоапертурного плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и показано, что его применение позволяет увеличить коэффициент вывода тока электронного пучка из ускорителя, обеспечив повышение КПД источника электронов и расширение диапазона его основных характеристик.

Практическая значимость диссертации состоит в создании катодного узла генератора плазмы на основе дугового разряда низкого давления, ста-

бильно работающего в широком диапазоне токов разряда, длительностей импульсов и частоты следования. Диафрагмирование выходного электрода разработанного катодного узла позволяет повысить электрическую прочность высоковольтного ускоряющего промежутка плазменного источника электронов.

На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный (75×15) см² источник электронов с многоапертурным сеточным плазменным катодом, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой регулировки, коэффициенту вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу подходит для применения его в промышленных целях.

Достоверность выполненных автором исследований подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих современных методик измерений, а также программных средств для проведения численных расчетов, удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных результатов. Основные результаты сопоставлены с данными, полученными другими исследователями.

Диссертация написана ясным языком, с использованием принятой терминологии, оформление диссертации замечаний не вызывает.

Содержание диссертации достаточно полно изложено в 18 работах, из которых 7 статей опубликованы в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также в 10 докладах на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах и совещаниях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**.

1. При измерениях тока пучка с помощью токоприемной пластины–коллектора не совсем понятна роль полиимидной пленки, использованной при проведении экспериментов.

Известно, что отраженные от токоприемника электроны имеют широкий спектр по энергии, основная их доля имеет пик с энергией близкой к энергии первичных электронов. Коэффициент отражения быстрых электронов от алюминиевого коллектора может достигать $\approx 14\%$ (для нормально падающих электронов), поэтому, обычно, если необходимо провести более точные измерения, в качестве коллектора используется графит (коэффициент отражения $\approx 2\%$), или углеграфитовая ткань с развитой поверхностью.

Кроме того, возможно размножение электронов в пленке, как первичных, так и отраженных.

2. После проведения тепловых расчетов диаметр отверстий в опорной решетке был выбран 15 мм. В этом случае температура фольги была принята 160°C , а рассчитанный предел прочности составил 230 МПа. По нашим данным расчетные допустимые значения механических напряжений на фольге в месте ее контакта с решеткой (суммарные, механические плюс тепловые) для надёжной непрерывной работы ускорителя не должны превышать 250-270 МПа, а при такой температуре фольга из сплава АМг-2н толщиной 30 мкм имеет ограниченный ресурс и может быстро потерять вакуумную плотность.

Однако, указанные замечания не затрагивают сущность защищаемых научных положений, а также полученных в работе основных результатов, и не влияют на общую положительную оценку диссертации. В целом работа может быть квалифицирована как законченное исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне.

Таким образом, диссертация Воробьёва Максима Сергеевича «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в

атмосферу» соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, и соответствует п. 9 «Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
начальник лаборатории ЭЛ-2 НТЦ «ЛТиТ»
АО «НИИЭФА»



С.Л. Косогоров

196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой,
дорога на Металлострой, д. 3
тел.: 8-921-791-90-11
Эл. почта: kosogorov@niiefa.spb.su

Подпись С.Л. Косогорова удостоверяю
Ученый секретарь АО «НИИЭФА»
доктор технических наук, профессор



Г.Л. Саксаганский

«20» ноября 2015 г.