

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Воробьева Максима Сергеевича на тему: «Развитие источников электронов с сеточными плазменными эмиттерами на основе дугового разряда низкого давления с полым анодом», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

### Актуальность выбранной темы.

Радиационные технологии достаточно прочно закрепились в структуре промышленного производства. В них используются источники ускоренных электронов с энергией от десятков киловольт до десяти мегавольт. В связи с этим возникают вопросы об оптимальных методах производства, правильном выборе параметров ускорителей, выборе наиболее перспективных способов обработки. Поэтому разработка ускорителей электронов с низкой энергией электронов (от десятков кВ до 200 кВ) для процессов облучения пучками электронов, в том числе и пучками большого сечения, является востребованной и актуальной. Она представляет не только практический, но и научный интерес. В указанном энергетическом диапазоне источники электронов с сеточными плазменными эмиттерами (СПЭ) обладают существенными достоинствами по сравнению с ускорителями другого типа (трансформаторного типа, DC, RF и т.д.). В связи с этим развитие и создание источников электронов с СПЭ является адекватной и актуальной задачей не только для Института сильноточной электроники СО РАН, но и для мирового научного сообщества. Итоги работы были получены в процессе выполнения грантов РНФ, РФФИ, программ Президента РФ, государственных заданий. Таким образом формируется новое научно-техническое направление.

### Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Работа посвящена изучению физических процессов работы, разработке и усовершенствованию источников электронов с СПЭ на основе дуги низкого давления. Автором проведено исследование опыта реализации систем плазменной эмиссионной электроники. В результате предлагаемые в диссертации подходы являются оригинальными, достаточная степень обоснованности результатов диссертации подтверждается корректным использованием общеизвестных методов отечественной и зарубежной науки, компьютерным моделированием. Основные защищаемые положения, т.е. результаты работы, сопоставлялись с измерениями при испытаниях и компьютерном моделировании. Конечно же, главным итогом является успешный запуск

систем с СПЭ типа «Соло», «Дуэт», «Килоампер». На этих устройствах сейчас отрабатываются не только физические процессы в плазменном разряде, но и производится проверка надежности, работоспособности, т.е. материаловедческие и радиационные исследования конструкционных материалов.

#### Значимость для науки и практики

В диссертационной работе представлены результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость. Теоретическая значимость заключается в том, что разработаны и реализованы аналитические и цифровые программные модели динамического изменения мощности пучка в течение импульса субмиллисекундной длительности.

С точки зрения практической значимости обосновано использование современной элементной базы; предложены конструктивные решения источников электронов на базе СПЭ; разработаны и реализованы источники электропитания, работающие в широком диапазоне напряжений и мощностей; созданы, верифицированы и внедрены алгоритмы стабилизации тока пучка; уменьшения и компенсации потерь в фольге выпускного окна. Создано специальное диагностическое оборудование для исследования параметров эмиссионной плазмы.

Таким образом новизна и практическая значимость диссертационной работы не вызывают возражений. Цель, задачи и выводы работы согласно автореферату сформулированы довольно ясно и полно.

#### Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты работы могут использоваться в организациях, занимающихся разработкой и изготовлением установок для генерации электронных пучков с использованием СПЭ. Эти ускорители могут использоваться на предприятиях РФ для решения прикладных задач по модификации или, даже, утилизации различных материалов. Отдельные результаты могут использоваться в учебном процессе.

#### Содержание диссертации, ее завершенность.

Согласно автореферату диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Структура работы соответствует поставленным целям и задачам. Она обладает внутренним единством, т.е. содержание глав логически связано. По реферату чувствуется большой объем и масштаб выполненных исследований, что привело к увеличенному размеру работы. Автореферат изложен доступным языком и достаточно полно отражает суть проведенных исследований.

### Личный вклад автора.

Согласно автореферату основные исследования по теме диссертации выполнены автором лично, либо при его непосредственном руководстве. В автореферате аргументировано и взвешенно сформулированы основные положения диссертации, её цель, задачи и выводы, научная новизна и практическая значимость. Набор экспериментальных методов вполне обоснован и информативен, что позволяет не сомневаться в достоверности результатов. Основные результаты и положения диссертационной работы опробованы на представительных научных конференциях и изложены в 54 работах, 21 статья, опубликована в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

В процессе прочтения реферата чувствуется широкая физическая эрудиция автора. Она обусловлена широким спектром проблем, решаемых в процессе создания источника.

### К тексту автореферату имеются следующие замечания.

При обосновании актуальности работы, автор упускает достаточно важный параметр данного типа источников, а именно – низкая энергия. Т.е. технологическая ниша для данных машин лежит в пределах 20 - 200 кВ. Величина пробега электронов здесь невелика и происходит в основном поверхностная обработка. В тоже время пучки большого сечения подобных машин не имеют альтернативы для массового применения. Об этом следовало бы упомянуть.

Следовало бы указать среднюю мощность пучка для серийных машин, поскольку именно она определяет производительность. Аналогично важной является и величина максимальной мощности электронного пучка, а этот аспект в автореферате не обсуждается.

Ускорители предполагаются для массового применения. Поэтому достаточно важными параметрами являются: срок службы, длительность непрерывной работы, эффективность. В ускорителях трансформаторного типа эффективность составляет 70-90%, а данных об эффективности ускорителей с СПЭ в автореферате не приведено. В качестве показателя стабильности работы источника электронов предложен показатель  $S$ , равный количеству пробоев на 1000 импульсов. Его величина составляет 12, что совершенно непонятно, так как неизвестна частота следования импульсов. Гораздо правильнее использовать число незапланированных отключений в интервал времени, например, за смену или несколько часов. Для ускорителей, работающих в промышленности это количество составляет 1-2 в смену.

В качестве ресурса перестраиваемых источников с СПЭ приводится цифра  $10^7$  импульсов, однако непонятна частота и какому временному интервалу это соответствует.

Непонятна величина минимальной пороговой величины  $E_{пор}$ . Удельные потери энергии в фольге монотонно возрастают с уменьшением

энергии и не ясно, что такое  $E_{пор}$ . Либо это энергия, когда пробег равен толщине фольги, либо нечто другое.

Шестая глава посвящена вопросам использования источников электронов с СПЭ в научных и технических целях, в ней освящены некоторые применения. Было бы более разумным вынести эту главу в приложение.

В основных результатах утверждается: разработаны современные и модифицированы ранее используемые системы электропитания источников электронов с СПЭ на основе дугового разряда. В автореферате же лишь говорится о «контролируемом изменении управляющего напряжения в течении импульса» и «простоте управления током в ускоряющем промежутке за счет изменения тока разряда СПЭ» и немного о стабилизации тока пучка. Следовало бы более подробно описать системы электропитания.

В целом, не смотря на указанные замечания к автореферату, данная диссертационная работа выполнена на современном научном уровне, посвящена решению актуальной научно-технической задачи, которая может быть востребована при эксплуатации и внедрении ускорителей электронов соответствующей технологической ниши в промышленности или иных электрофизических установках. Диссертационная работа в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор – Воробьев Максим Сергеевич заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Доктор технических наук,  
Старший научный сотрудник,  
Главный научный сотрудник,  
Институт Ядерной физики им. Будкера,  
630090, ак. Лаврентьева, 11  
89139489705,  
kuksanov47@mail.ru

Куксанов Николай Константинович

Дата: 03.11.2022

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных,  
необходимых для работы диссертационного совета 24.2.415.03

Куксанов Н.К.

Подпись Куксанова Н.К. заверяю:  
Ученый секретарь ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н.



Резниченко Алексей Викторович