

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Медовника Александра Владимировича** «**Плазменные источники электронов для генерации широкоапертурных импульсных пучков в форвакуумной области давлений**», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности **1.3.5 – физическая электроника**

Диссертационная работа посвящена **актуальной** проблеме исследования и разработки малогабаритных источников электронов, работающих в форвакуумной области давлений и создания научных основ технологий электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов, включая керамику, полимерные материалы.

Полученные Медовником А.В. экспериментальные результаты отличаются существенной новизной и представляют интерес с точки зрения дальнейшего развития и применения как широкоапертурных источников электронов, так и методов электронно-пучковой обработки диэлектрических и изолированных материалов в форвакуумной области давлений.

Автором проведен большой объем экспериментальных исследований, нацеленных на создание широкоапертурных импульсных источников электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом и дуговым разрядом, работающих в форвакуумной области давлений. Исследованы особенности и закономерности влияния повышенного давления на процессы инициирования тлеющего разряда с полым катодом и дугового разряда, формирования, транспортировки и взаимодействия с изолированной проводящей или диэлектрической мишенью. Важно отметить, что экспериментальные исследования сочетаются с простым, но в большинстве случаев эффективным моделированием, дающим хорошее согласие с результатами экспериментов.

В результате комплексных исследований показана возможность генерации широкоапертурных импульсных электронных пучков микро-миллисекундного диапазона длительностей в форвакуумной области давлений с использованием плазменных источников электронов при сочетании импульсных систем формирования эмиссионной плазмы на основе тлеющего разряда с полым катодом или дугового разряда с катодным пятном и постоянного ускоряющего напряжения. Показано, что наиболее стабильные характеристики электронного пучка с высокой равномерностью распределения плотности тока по его сечению достигаются в случае тлеющего разряда с полым катодом, в то время как для достижения более высоких удельных и интегральных параметров электронных пучков целесообразно применение дуговых разрядных систем.

В результате исследований Медовником А.В. установлено, что как в случае источников электронов на основе генерации плазмы тлеющим разрядом, так и дуговым разрядом существует два режима их функционирования. При дуговом разряде изменение режима работы источника определяется переходом функционирования катодного пятна первого рода к катодному пятну второго рода. При применении тлеющего разряда с полым катодом изменение режима работы источника определяется «эффектом переключения» электронного тока с анода на экстрактор в случае значительного увеличения тока пучка.

В работе показано, что плазма, формируемая в пространстве дрейфа электронного пучка, обеспечивает эффективную нейтрализацию его пространственного заряда и является источником обратного ионного потока, существенно влияющего на параметры электронного источника на основе тлеющего разряда с полым катодом в форвакуумной области давлений.

Детально изучены особенности и закономерности влияния различных параметров, включая ускоряющее напряжение, тип разрядной системы для генерации плазмы, наличие обратного ионного потока, тока пучка и его магнитного поля, а также перераспределяющих электродов на

неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка и эффективность его фокусировки.

В результате комплекса междисциплинарных исследований Медовником А.В. разработаны форвакуумные плазменные источники широкоапертурных импульсных электронных пучков в рабочем диапазоне давлений от нескольких единиц до 30 Па при ускоряющих напряжениях до 15 кВ и частоте повторения импульсов до 50 имп/с. В случае применения для генерации плазмы тлеющего разряда с полым катодом в источнике достигается формирование электронного пучка с током до 120 А, длительностью до 1 мс. Применение дугового разряда с катодным пятном обеспечило возможность увеличения амплитуды тока электронного пучка до 170 А, а длительности импульса до 20 мс.

Важно отметить, что разработки защищены семью патентами Российской Федерации и часть из них внедрена на двух предприятиях.

Несомненно, положительным моментом диссертации является тот факт, что наряду с комплексным исследованием характеристик самих источников электронов, сделана попытка разработки научных основ электронно-пучковой обработки диэлектрических и изолированных проводящих материалов. Показано, что в форвакуумной области давлений имеет место, как эффективная нейтрализация пространственного заряда электронного пучка, так и обеспечивается многократное снижение потенциала облучаемой мишени, способствующее эффективному вкладу энергии электронного пучка в диэлектрическую или изолированную проводящую мишень.

В целом, в результате широкомасштабных исследований решена важная научно-техническая проблема, состоящая в создании плазменных источников широкоапертурных импульсных электронных источников на основе тлеющего разряда с полым катодом и катодной дуги работающих в форвакуумной области давлений с параметрами электронного пучка,

достаточными для эффективной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических материалов.

**Достоверность результатов** диссертационной работы **не вызывает сомнения** и подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, широкой апробацией результатов работы на ряде международных конференций.

Результаты работы опубликованы в 28 статьях в хорошо известных рецензируемых научных журналах, в том числе в статьях, цитируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Содержание автореферата адекватно отражает диссертационную работу.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний.

1. На рисунке 2.26 приведены распределения потенциала в разрядном промежутке для трех различных моментов времени, но кривые не идентифицированы.

2. Модель процесса инициирования дугового разряда с катодным пятном не учитывает запыление поверхности изолятора продуктами взрывной эмиссии микроострий, что сужает возможность ее применения только для однократных пробоев.

3. При рассмотрении процессов эмиссии и перезарядки в условиях определяющей роли эффекта «переключения тока» используется модель повышения потенциала плазмы в разрядном промежутке, учитывающая влияние обратного потока ионов с током до 10 % от тока пучка, наличия

перезарядившихся ионов, доля которых очень мала, но не рассматривается влияние экстракции электронов с током до 120 А.

4. При рассмотрении модели фокусировки электронного пучка рассматривалось влияние собственного магнитного поля цилиндрического пучка на траектории электронов. Полученные результаты показали уменьшение радиуса пучка с 45 до 29 мм. Но эксперимент показал уменьшение радиуса в три раза, до 15 мм. Было бы целесообразно рассмотреть модель конического (фокусирующегося) пучка у которого магнитное поле увеличивается обратно – пропорционально радиусу пучка по мере его фокусировки.

5. При рассмотрении модели процессов нейтрализации заряда электронного пучка на изолированной проводящей мишени площадью от 250 до 500 см<sup>2</sup> и на диэлектрической мишени предполагается один и тот же механизм, основанный на потоке ионов из плазмы тлеющего разряда, возникающего между мишенью и заземленными стенками вакуумной камеры. Но получить ток ионов в несколько десятков ампер на диэлектрическую мишень малого диаметра, представляется чрезвычайно сложной задачей. В этой части следует продолжить исследования для выявления роли и доли электронного тока с поверхности облучаемого диэлектрика.

Замечания не носят принципиального характера и не снижают ценности полученных результатов.

В целом считаю, что диссертационная работа **Медовника Александра Владимировича «Плазменные источники электронов для генерации широкоапертурных импульсных пучков в форвакуумной области давлений»** по актуальности, объему экспериментального материала, важности полученных результатов, по уровню их обсуждения, научной новизне и практическому значению удовлетворяет всем требованиям,

которые предъявляются к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 - физическая электроника.

Заведующий научной лабораторией высокоинтенсивной имплантации ионов  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»

д.ф.-м.н, профессор

Рябчиков Александр Ильич

[ralex@tpu.ru](mailto:ralex@tpu.ru)

+7(3822)70-56-94

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 2 стр.4

10.11.2022г.

Подпись Рябчикова А.И. заверяю,

Ученый секретарь Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский политехнический университет»



Е.А. Кулинич

10.11.2022г.