



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИСЭ СО РАН

д.ф.-м.н.

И. В. Романченко

«19» марта 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Диссертация «УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ПУШКАХ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ» выполнена в лаборатории вакуумной электроники ИСЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Кизириди Павел Петрович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника лаборатории вакуумной электроники.

В 2012 г. окончил ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук Озур Григорий Евгеньевич; основное место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вакуумной электроники (ЛВЭ).

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация Кизириди П.П. относится к области физики и техники генерирования сильноточных электронных пучков и посвящена поиску и разработке новых методов управления параметрами низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в диодах со взрывоэмиссионным катодом. Такие пучки широко используются для модификации поверхностных слоёв материалов (в основном, металлических) методом импульсного нагрева.

Личный вклад автора состоит в подготовке и проведении экспериментальных исследований, анализе и систематизации полученных данных, выполнении численных расчетов и моделирования с помощью средств вычислительной техники. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы по работе. Обсуждение задач исследований, методов их решения, анализ полученных результатов и формулировка выводов проводились совместно с научным руководителем и соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые, на основе систематических исследований показана эффективность гибридного разряда, сочетающего сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, как метода формирования плазменного анода с максимумом концентрации заряженных частиц на периферии плазменного столба. Использование такого плазменного

анода позволяет значительно улучшить равномерность распределения плотности энергии по сечению сильноточного электронного пучка.

2. Разработан и успешно испытан широкоапертурный взрывоэмиссионный катод с резистивной развязкой эмиттеров, выполненный на основе объемных резисторов, проволочные выводы которых используются в качестве эмиттеров. Продемонстрирована его устойчивая работа в сильноточном плазмонаполненном диоде. Для данного катода среднеквадратичный разброс плотности энергии пучка от импульса к импульсу, как правило, ниже, а скорость нарастания тока на переднем фронте импульса на 20–30% выше аналогичных величин, полученных в случае наиболее часто используемого многопроволочного (медно-оплётчного) катода. Данный катод также отличается улучшенной однородностью распределения плотности энергии по сечению пучка по сравнению с тем же медно-оплётчным катодом.

3. Впервые предложен и реализован эффективный способ инициирования взрывной эмиссии с помощью встроенных в катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы. Отличительной чертой способа является то, что и срабатывание источников плазмы, и ускорение электронов пучка к коллектору осуществляется одним и тем же высоковольтным импульсом. Средняя плотность эмиссионного тока созданного по этому способу катодного узла примерно в 1,5–1,7 раза превосходит аналогичную величину, характерную для традиционной схемы пушки с плазменным анодом и медно-оплётчным взрывоэмиссионным катодом. Благодаря независимости инициирования взрывной эмиссии от величины зазора между катодом и анодом (коллектором) и наполняющей этот зазор среды, данный катодный узел может успешно использоваться для генерирования сильноточных электронных пучков и без предварительного заполнения пространства между катодом и коллектором плазмой, т.е. в режиме вакуумного или газонаполненного диода.

4. Показана возможность управления распределением плотности энергии по сечению пучка с помощью ферромагнитных тел (концентраторов магнитного поля), располагаемых непосредственно за коллектором (мишенью) и стягивающих на себя силовые линии ведущего магнитного поля. Меняя размеры, форму концентраторов и магнитную проницаемость их материала, можно осуществлять необходимое перераспределение плотности энергии (тока) в поперечном сечении, а также фокусировку пучка. При этой фокусировке потерь тока пучка и энергии пучка в импульсе не наблюдалось, несмотря на значительный угловой разброс электронов, характерный для взрывоэмиссионных источников низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

1. Разработаны методы, улучшающие однородность распределения плотности энергии по сечению сильноточного электронного пучка, которые могут применяться как по отдельности, так и комбинироваться друг с другом в зависимости от условий и поставленных задач.

2. Создан широкоапертурный ($\sim 20 \text{ см}^2$ на настоящий момент) взрывоэмиссионный катод с резистивной развязкой металлических эмиттеров, обладающий более стабильными (от импульса к импульсу) параметрами и показывающий более продолжительную (минимум в пять раз) безотказную работу по сравнению с другими широкоапертурными взрывоэмиссионными катодами, используемыми в источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

3. Новый катодный узел сильноточной электронной пушки, включающий взрывоэмиссионный катод и встроенные в него резистивно развязанные дуговые источники плазмы, инициируемые пробоем по поверхности диэлектрика, может работать в режиме вакуумного или газонаполненного диода, что позволяет существенно упростить конструкцию источника низкоэнергетических сильноточных электронных пучков и повысить его надежность.

4. Разработан и успешно применен в эксперименте метод, позволяющий осуществить эффективную обработку низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком массивных немагнитных металлических изделий. Суть метода заключается в размещении на поверхности облучаемого изделия, толщина которого сравнима или превосходит глубину проникновения силовых линий импульсного ведущего магнитного поля, кольцевого или рамочного постоянного магнита. При этом направление силовых линий поля постоянного магнита внутри кольца (рамки) должно совпадать с направлением силовых линий импульсного ведущего магнитного поля.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, сопоставлением экспериментально полученных результатов с численными оценками и компьютерными расчетами, непротиворечивостью полученных результатов, а также реализацией научных положений и выводов в экспериментах по модификации поверхностных слоёв металлических материалов.

Ценность научных работ соискателя заключается, прежде всего, в разработанных им методах управления распределением плотности энергии по сечению сильноточного электронного пучка, в разработке и реализации нового высокоэффективного способа «организации» взрывной электронной эмиссии с помощью встроенных в катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы. Последнее выглядит особенно перспективным, поскольку намного облегчает, например, формирование радиально сходящихся низкоэнергетических сильноточных электронных пучков без использования плазменного анода. Формировать плазменный анод в коаксиальной геометрии ускоряющего промежутка чрезвычайно затруднительно, поэтому появление управляемого взрывоэмиссионного катода является существенным шагом в физике и технике генерирования сильноточных электронных пучков.

Диссертация соответствует требованиям п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней»: на все заимствованные материалы и результаты даны соответствующие ссылки; в Заключение приведены номера ссылок на работы соискателя, включенные в список литературы.

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Материалы диссертации адекватно и полно изложены в научных работах соискателя.

Диссертация «УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ПУШКАХ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ» Кизириди Павла Петровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Заключение принято на расширенном заседании лаборатории вакуумной электроники. Заседание проводилось в формате «онлайн» на платформе «Zoom».

Присутствовало на заседании 50 чел., среди них 9 чел. (не включая соискателя) из числа 12-ти штатных научных сотрудников ЛВЭ, а также 2 приглашенных сотрудника ИСЭ СО РАН (доктора технических наук Окс Е.М. и Юшков Г.Ю.). Остальные участники: сотрудники ИСЭ СО РАН, в том числе доктора физико-математических наук Королёв Ю.Д., Кошелев В.И., Ломаев М.И., Пегель И.В., доктор технических наук Коваль Н.Н., кандидаты физико-математических наук Сорокин Д.А., Белоплотов Д.В., кандидаты технических наук Соловьёв А.А., Савкин К.П., Николаев А.Г., Шандриков М.В., другие сотрудники ИСЭ СО РАН; сотрудники Томского университета систем управления и радиоэлектроники: доктор технических наук Климов А.С., кандидаты технических наук Юшков Ю.Г., Бакеев И.Ю.

Право решающего голоса имели 11 человек (9 штатных научных сотрудников ЛВЭ и 2 чел. приглашённых).

Результаты голосования: «за» — 11 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол № 1 от 04 марта 2021 г.

Батраков Александр Владимирович
Заведующий лабораторией вакуумной
электроники ИСЭ СО РАН,
кандидат физико-математических наук

