

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность работы. Источники низкоэнергетических (10–40 кэВ) сильноточных электронных пучков (НСЭП) микросекундной длительности достаточно широко используются для модификации поверхностных слоев материалов, в основном, металлических. Высокая плотность энергии (до 15 Дж/см^2) и малая длительность импульса позволяют выделить практически всю энергию пучка в тонком поверхностном слое ($\sim 0,1\text{--}10 \text{ мкм}$), доводя его до плавления и даже частичного испарения. Происходит интенсивная очистка поверхности от нежелательных примесей, инородных включений, растворенных газов, а также сглаживание микрорельефа (полировка) облучаемого изделия (образца). Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения (до 10^9 К/с), в поверхностном слое можно осуществить такие структурно-фазовые превращения, которые не реализуются в стационарном режиме. Например, формирование неравновесных поверхностных сплавов из предварительно нанесённых покрытий, измельчение кристаллической структуры металлов и сплавов до субмикронного уровня и т.п. Все вышеперечисленные эффекты служат основой для улучшения функциональных свойств изделий самого различного назначения: от штампового инструмента до деталей искусственных насосов для перекачки крови.

Несмотря на значительный прогресс в области разработки, создания и применения источников НСЭП, перед соискателем Кизириди П.П. стояли достаточно традиционные, но от этого не менее важные задачи по развитию физики и техники генерирования НСЭП:

- улучшение однородности распределения плотности энергии по сечению пучка;
- повышение стабильности эмиссионных характеристик катода и ресурса его работы;
- поиск новых методов управления параметрами НСЭП применительно к некоторым новым задачам поверхностной модификации материалов, например, при обработке массивных металлических изделий.

Решение вышеперечисленных задач, стоявших перед соискателем, представляется, безусловно, **актуальным**.

Как следует из содержания диссертации, соискатель справился с решением поставленных задач и получил важные результаты, обладающие несомненной **научной новизной**:

1. Впервые на основе систематических исследований показана эффективность и гибкость 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 за счёт компенсации негативного действия собственного магнитного и электрического полей пучка, увеличивающих плотность энергии (тока) в его центральной части при транспортировке в плазменном канале.

2. Разработан и успешно испытан широкоапертурный взрывэмиссионный 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 медного катода.

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 такого катода в 1,5–1,7 раза превосходит соответствующую величину, характерную для традиционной схемы пушки с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывэмиссионным катодом. Благодаря независимости инициирования взрывной эмиссии от величины зазора между катодом и анодом (коллектором) и наполняющей этот зазор среды, данный способ 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. Этот результат представляется самым важным в диссертации, поскольку не только существенно улучшает параметры НСЭП, формируемого в традиционной планарно-аксиальной геометрии, но и позволяет генерировать радиально сходящиеся/расходящиеся НСЭП, для которых создание эффективного плазменного анода встречает значительные трудности.

4. Автором также 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 этом потеря тока пучка и энергии пучка в импульсе не наблюдалось, несмотря на значительный угловой разброс электронов, характерный для взрывоэмиссионных источников низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

Практическая ценность рассматриваемой диссертации состоит в следующем:

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 ($\sim 20 \text{ см}^2$) взрывоэмиссионный катод с резистивной развязкой металлических эмиттеров, обладающий более стабильными (от импульса к импульсу) параметрами и показывающий более продолжительную безотказную работу по сравнению с другими широкоапертурными взрывоэмиссионными катодами, используемыми в источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков. Следует отметить, что испытания катода (на базе резисторов ТВО-1) на ресурс проводилось в достаточно жестких условиях, а именно: при интенсивном массопереносе с нержавеющей коллектора на катод, а, как известно, нержавеющая сталь обладает низкими эмиссионными свойствами в сильных электрических полях.

3. Новый катодный узел сильноточной электронной пушки, включающий взрывоэмиссионный катод и встроенные в него резистивно развязанные дуговые источники плазмы, иницируемые пробоем по поверхности диэлектрика, способен функционировать в режиме вакуумного или газонаполненного диода, что позволяет существенно упростить конструкцию источника низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, разнообразить геометрию ускоряющего зазора, повысить надежность пушки.

4. Разработан и успешно применен метод, позволяющий осуществить эффективную обработку низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком массивных немагнитных металлических изделий, толщина которых сравнима или превосходит глубину проникновения силовых линий импульсного ведущего магнитного поля. Это достигается путем размещения на поверхности облучаемого изделия 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.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, **обоснованы** и доказаны.

Достоверность результатов диссертации подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, непротиворечивостью полученных результатов между собой и с литературными данными, корреляцией экспериментально полученных результатов с

численными оценками и компьютерными расчётами, реализацией научных положений и выводов в экспериментах по модификации поверхностных слоёв металлических материалов. Это также подтверждается публикациями соискателя и апробацией полученных результатов на представительных научных форумах: опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 9 полных текстов докладов в трудах Международных и Всероссийских конференций и симпозиумов, 1 статья в тематическом выпуске журнала «Известия вузов. Физика»; получены патент РФ на изобретение и положительное решение по заявке на полезную модель.

Диссертация логично структурирована: первая глава представляет собой обзор литературы; оригинальные главы излагаются в последовательности, соответствующей последовательности процессов в электронной пушке: вторая глава посвящена формированию плазменного анода необходимой конфигурации (с увеличенной на периферии концентрацией ионов), третья глава – процессам возбуждения взрывной электронной эмиссии, четвёртая глава – управлению распределением плотности энергии при транспортировке пучка путем изменения конфигурации ведущего магнитного поля.

Диссертация аккуратно оформлена, содержит минимум стилистических погрешностей и опечаток.

Автореферат адекватно и полно отражает содержание диссертации.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Автор не сослался на ранние работы по катодам с резистивной развязкой эмиттеров для накачки CO₂ лазеров атмосферного давления (Beaulieu A.L., Appl. Phys. Lett., 1970, V.16, #2, p.p. 504-505? <https://doi.org/10.1063/1.1653083>)
2. Утверждение автора (с.5) : " При таких условиях средняя плотность тока пучка, j_e , должна составлять 10^2-10^3 А/см². Единственным видом электронной эмиссии, способным обеспечить такую плотность тока на большой площади, является взрывная эмиссия." сомнительно, данные параметры обеспечивают и плазменные катоды различного типа (Я.Е Красик // Исследования плазменных катодов в лаборатории импульсной мощности и физики плазмы / Изв. вузов. Физика. 2020. № 10. DOI: 10.17223/00213411/63/10/1)
3. Автор широко использует понятие однородного и широкоапертурного пучка, но не дал определения этих терминов, кроме как на стр. 9 - широкоапертурный это ~ 20 см².
4. Автор использует " обладающий более стабильными (от импульса к импульсу) параметрами и показывающий более продолжительную безотказную работу по сравнению с другими" без указания конкретных цифр, что нежелательно для диссертации на степень в технических науках.
5. Автор использует неудобные для чтения записи например типа: " 10^2-10^3 А/см²", хотя в системе СИ есть возможности для записи вида . 0,1–1 кА/см² :):

Указанные замечания не перечёркивают, однако, полученных в диссертационной работе результатов, сущность защищаемых научных положений и общего положительного впечатления от неё. Диссертация Кизириды П.П. может

быть квалифицирована как законченная научная работа, выполненная на высоком уровне и соответствующая требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, Кизириди Павел Петрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН), доктор технических наук Соковнин
Сергей Юрьевич

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106,
Тел.: (343) 267-86-82, e-mail: sokovnin@ier.uran.ru

21.04.2021 г.  С. Ю. Соковнин

«Подпись С. Ю. Соковнина удостоверяю»

Учёный секретарь ИЭФ УрО РАН,

Кандидат физико-математических наук

Тел.: (343) 2678818....., e-mail: sokovnin@ier.uran.ru

Е. Е. Кокорина

