

Минобрнауки России

«УТВЕРЖДАЮ»

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11,  
г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 20.04.2021

№ 15311 – 44/6215.1-681

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института ядерной  
физики им. Г. И. Будкера Сибирского  
отделения Российской академии наук

доктор физ.-мат.наук,  
академик РАН П.В. Логачев



2021 г.

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

О направлении отзыва на диссертацию

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 темы диссертации

Актуальность работы определяется потребностью в получении новых инструментов для поверхностной обработки материалов и повышении их параметров. Цель выполненной диссертационной работы вполне современна. Модификация поверхностных слоев материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы является одним из важных направлений развития науки и техники, которое с каждым годом находит всё больше областей применения и позволяет решать обширный круг задач в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и других отраслях. Основными преимуществами пучково-плазменных технологий являются их разнообразие, высокая энергетическая эффективность и экологическая чистота. Применение импульсных высокоинтенсивных пучков заряженных частиц для поверхностной модификации материалов позволяет проводить очистку поверхностей, их полировку, формирование неравновесных поверхностных сплавов из предварительно нанесённых покрытий, измельчение кристаллической структуры металлов и сплавов до субмикронного уровня и т.д.

Среди источников таких пучков следует выделить источники низкоэнергетических (до 40 кВ) сильноточных (до 25 кА) электронных пучков (НСЭП). Они имеют целый ряд преимуществ: рентгенобезопасность, простота обеспечения высоковольтной изоляции и, как следствие, лучшая надежность и относительно небольшая стоимость источника.

Несмотря на значительный прогресс в области разработки и создания источников НСЭП, достигнутый к моменту начала работы соискателя Кизириди П.П., перед ним

стояли достаточно традиционные задачи, направленные на дальнейшее развитие физики и техники генерирования НСЭП, а именно:

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

Решение поставленных задач является актуальным для применения полученных результатов при разработке нового класса источников технологических пучков. Цель диссертационной работы, как это сформулировано автором, заключалась в поиске и разработке новых методов управления параметрами низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в пушках со взрывоэмиссионным катодом.

### **Полученные результаты и их новизна**

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. Для генерации низкоэнергетических пучков 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. Получено, что 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 для 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, зажигаемых высоковольтным импульсом ускоряющего напряжения диода. Средняя плотность эмиссионного тока катода, созданного по этому способу, примерно в 1,5–1,7 раза превосходит аналогичную величину, характерную для традиционной схемы пушки с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывоэмиссионным 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.
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. Метод реализован в том числе для массивных немагнитных металлических мишеней и импульсного ведущего поля.

### **Научная и практическая значимость работы**

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 безотказную работу по сравнению с другими широкоапертурными взрывоэмиссионными катодами, используемыми в источниках низкоэнергетических сильноточных электронных пучков.

3. Возможность работы нового катодного узла сильноточной электронной пушки, включающего взрывоэмиссионный катод и встроенные в него резистивно развязанные дуговые источники плазмы, инициируемые пробоем по поверхности диэлектрика, в режиме вакуумного или газонаполненного диода 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, толщина которых сравнима или превосходит глубину проникновения силовых линий импульсного ведущего магнитного поля. Суть метода заключается в размещении 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.

Важным результатом стало комбинированное использование в сильноточной электронной пушке многоострийного взрывоэмиссионного катода с резистивными развязками и плазменного анода в режиме гибридного разряда, сочетающего сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, локализованными по окружности кольцевого анода, генерирующими плазму. Проведены исследования, позволившие улучшить параметры диода и электронного пучка, а также достичь устойчивой работы катода икратно увеличить его рабочий ресурс.

Перечисленные выше результаты имеют большое практическое значение для создания и эксплуатации источников электронных пучков, предназначенных для решения технологических и материаловедческих задач. Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в таких организациях как НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург), Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург), Хунаньский университет г. Чанша (КНР), а также в других научных организациях и инновационных предприятиях, в которых проводятся исследования и разработки в области электрофизики, физики пучков заряженных частиц, воздействия интенсивных электронных пучков на металлические материалы.

### **Достоверность научных результатов**

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, сопоставлением экспериментально полученных результатов и численных оценок, непротиворечивостью полученных результатов, а также реализацией научных положений и выводов в экспериментах по модификации поверхностных слоёв металлических материалов.

Основные положения и выводы диссертационной работы достаточно широко и полно апробированы на профильных Международных и Всероссийских конференциях. Кроме того, материалы исследований опубликованы в 18 научных статьях, из которых 8 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 положительное решение Роспатента по заявке на полезную модель.

### Общая оценка содержания работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Приложения с общим объемом 143 страницы, содержит 89 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 143 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и достоверность, отмечается личный вклад автора, представлена структура диссертации.

**В первой главе**, представляющей собой литературный обзор, изложены принципы генерирования НСЭП в пушке с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом. Рассмотрены методы формирования плазменного анода на основе дуговых (точечных) источников плазмы и на основе объемной ионизации рабочего газа с помощью сильноточного отражательного (пеннинговского) разряда. Рассмотрены также механизмы возбуждения взрывной эмиссии под плазмой, создания катодов сильноточных электронных пушек, основные явления и закономерности формирования и транспортировки низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в плазмонаполненных диодах.

**Во второй главе** представлены разработанные и исследованные соискателем методы формирования плазменного анода и результаты их применения при генерировании НСЭП. Суть данных методов сводится к созданию плазменного столба с максимумом заряженных частиц на периферии, что необходимо для улучшения однородности пучка на мишени (коллекторе).

*Раздел 2.1* посвящен гибриднему разряду на основе сильноточного отражательного разряда (ОР) и вакуумных дуг, локализованных по окружности кольцевого анода ОР. Исследованы пространственная структура свечения и динамика гибридного разряда. Измерены распределения концентрации заряженных частиц и плотности энергии по сечению плазменного столба и пучка, соответственно. Описан принцип измерений радиального профиля плотности энергии пучка с помощью тепловизионной диагностики. Показано, что распределение концентрации заряженных частиц с максимумом на периферии плазменного столба наблюдается практически с самого начала импульса тока разряда и сохраняется на протяжении всего импульса. Увеличение по сравнению с приосевой областью может составлять 2,5 раза. Это позволило примерно в 2 раза (до 5 см) увеличить диаметр однородного распределения плотности энергии по сечению пучка (по уровню 0,9) в сравнении со случаем использования сильноточного ОР без вакуумных дуг.

*В разделе 2.2* представлены результаты исследования комбинированного разряда, сочетающего разряд в планарном магнетроне, встроенном во взрывоэмиссионный катод, генерирующем кольцевое облако плазмы вблизи катода, и сильноточный ОР. Их применение позволило увеличить концентрацию плазмы на периферии плазменного столба по сравнению с его центральной частью примерно в 1,2–1,5 раза, однако этого оказалось недостаточно для ощутимого улучшения однородности распределения плотности энергии по сечению пучка.

*Раздел 2.3* посвящен исследованию возможности использования импульсного (несколько миллисекунд) индукционного ВЧ разряда низкого давления для формирования плазменного анода. Показана возможность зажигания такого разряда вплоть до давлений

аргона около 0,5 мТорр при использовании вспомогательной слаботочной искры. Согласно зондовым измерениям, концентрация электронов плазмы, создаваемой импульсным ВЧ разрядом, сравнительно низка (не более  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и практически не изменяется с ростом давления. Недостаток концентрации плазмы затрудняет работу взрывоэмиссионного катода, делает её крайне нестабильной. Тем не менее, использование плазменного анода на основе импульсного индукционного ВЧ разряда в сочетании с управляемым взрывоэмиссионным катодом, описанным в разделе 3.2, может быть перспективным.

Основной вывод автора по данной главе заключается в том, что, на настоящий момент, наиболее перспективным способом создания плазменного анода с максимумом концентрации заряженных частиц на периферии, обеспечивающим улучшение однородности пучка, является гибридный разряд, сочетающий сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, локализованными у поверхности анода отражательного разряда.

**Третья глава** посвящена вопросу улучшения стабильности работы широкоапертурных взрывоэмиссионных катодов.

В разделе 3.1 рассмотрены катоды с резистивной развязкой чисто металлических эмиттеров. Автором исследовано два варианта такого катода. В первом катоде эмиттерами служат проволочные выводы резисторов ТВО-1, во втором – нихромовые проволоки, вставленные в керамические трубки. Показано, что данные катоды обладают увеличенной скоростью нарастания тока на переднем фронте импульса (в среднем на 20–30%), уменьшенным среднеквадратичным разбросом плотности энергии пучка от импульса к импульсу, увеличенным (в несколько раз ресурсом) по сравнению с многопроволочным медным катодом, наиболее часто используемым в источниках НСЭП. С учётом улучшенной однородности распределения плотности энергии по сечению пучка предпочтению отдано катоду на базе резисторов ТВО-1.

В разделе 3.2 описан способ инициирования взрывной эмиссии с помощью встроенных в катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы. Показано, что новый катодный узел, созданный по этому способу, обеспечивает среднюю плотность эмиссионного тока примерно на 50–70% выше значений, обеспечиваемых традиционной схемой пушки с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом. Отличительной чертой данного узла является его питание от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как срабатывание дуговых источников плазмы, так и ускорение электронов пучка к коллектору. Новый катодный узел может быть использован для генерирования сильноточных электронных пучков в режимах как вакуумного, так и газонаполненного диода. Результат, представленный в данном разделе, можно считать наиболее важным в рассматриваемой диссертации.

**Четвертая глава** посвящена методам управления сильноточным электронным пучком с помощью изменения конфигурации ведущего магнитного поля.

В разделе 4.1 представлены результаты экспериментов по управлению распределением плотности энергии по сечению пучка с помощью концентраторов магнитного поля, расположенных за тонкой металлической мишенью. Показано, что использование концентраторов магнитного поля позволяет перераспределять плотность тока (энергии) по сечению сильноточного электронного пучка и сделать его более однородным в поперечном сечении. Наличие концентратора не уменьшает величину полной энергии пучка, приходящейся на мишень, что свидетельствует об отсутствии существенных потерь электронов за счёт отражения от «магнитной пробки».

В разделе 4.2 предложен и исследован метод, позволяющий осуществлять эффективную обработку сильноточным электронным пучком массивных немагнитных металлических изделий, путём расположения на поверхности мишени рамочного или

кольцевого постоянного магнита, силовые линии магнитного поля которого внутри рамки/кольца совпадают с направлением силовых линий импульсного ведущего магнитного поля. Возможность корректировки силовых линий ведущего магнитного поля с помощью постоянного рамочного (кольцевого) магнита подтверждена численными расчётами соискателя, выполненными в среде COMSOL Multiphysics.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследований, выражены благодарности, перечислены номера ссылок на работы соискателя.

Рассматриваемая диссертация обладает внутренним единством, написана простым и ясным языком с минимумом стилистических погрешностей.

### **Замечания**

Положительно характеризуя работу в целом, можно сделать следующие замечания:

1. В обзоре литературы (Глава 1) отсутствуют описание и ссылки на метод резистивной развязки многоострижных эмиттеров, ранее исследованный и использованный в ряде высоковольтных ускорителей, разработанных в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в 70-е – 80-е годы прошлого столетия. Есть две ссылки на него, как на «второй метод» на странице 85 диссертации. При изучении вопроса о создании катодов с резистивной развязкой эмиттеров автору следовало бы привести больше примеров и ссылок на использование этого принципа.
2. На графиках, полученных неоднократными измерениями, не отмечены «усы», характеризующие статистические погрешности (рис.2.16, 2.19, 2.30б, 2.31б, 2.35), что не всегда позволяет отделить закономерные зависимости от ошибок измерений.
3. При исследовании импульсного ВЧ разряда (раздел 2.3) автор приводит выкладки, демонстрирующие возможность усиления процессов ионизации (а значит и возбуждения) на периферии плазменного анода. Однако на интегральной фотографии свечения плазмы (стр. 79, рис. 2.36б), такого усиления не видно – свечение внутри индуктора однородно. Возможно, это связано с избыточной засветкой регистратора излучения, но автор никак не комментирует это противоречие.

### **Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» по пунктам 9 и 10.**

Диссертационная работа П.П. Кизириди **«Управление параметрами низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в пучках со взрывозмиссионным катодом»** является завершённым научным исследованием по актуальной тематике. Несмотря на сделанные замечания, работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, содержит интересные электротехнические решения. Результаты проведенных автором исследований представляют как научный, так и практический интерес. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Работа соответствует требованиям ВАК и, в частности, п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 24.09.2013 года), а ее автор – Кизириди Павел Петрович заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании семинара лаборатории физики плазмы ИЯФ СО РАН 06.04.2021г., протокол № 8

Председатель семинара: Бурдаков Александр Владимирович, д.ф.-м.н., г.н.с., советник директора ИЯФ СО РАН, +7 (383) 329-46-02; [A.V.Burdakov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Burdakov@inp.nsk.su)

Проект отзыва составил: Астрелин Виталий Тимофеевич, к.т.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН, +7 (383) 329-49-24; [V.T.Astrelin@inp.nsk.su](mailto:V.T.Astrelin@inp.nsk.su)

Подписи А.В. Бурдакова и В.Т. Астрелина заверяю

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН: Аракчеев Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н., +7 (383) 329-47-99; [A.S.Arakcheev@inp.nsk.su](mailto:A.S.Arakcheev@inp.nsk.su)

