

На правах рукописи



Кизириди Павел Петрович

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ
В ПУШКАХ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Научный руководитель: **Озур Григорий Евгеньевич**,
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Ремнёв Геннадий Ефимович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский поли-
технический университет», заведующий научно-
производственной лабораторией «Импульсно-
пучковых, электроразрядных и плазменных техно-
логий», в.н.с. Исследовательской школы физики
высокоэнергетических процессов НИ ТПУ

Соковнин Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, Федеральное государ-
ственное бюджетное учреждение науки Институт
электрофизики Уральского отделения Российской
академии наук, в.н.с. группы электрофизических
установок

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учрежде-
ние науки Институт ядерной физики имени
Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Новосибирск

Защита состоится «09» июня 2021 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР и на сайте:
<https://postgraduate.tusur.ru/urls/lflub0cl>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук,
профессор



Акулиничев Ю.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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, экологии. Основными преимуществами пучково-плазменных технологий являются их разнообразие, высокая энергетическая эффективность и экологическая чистота.

Особое место среди методов поверхностной модификации занимают методы, основанные на использовании импульсных высокоинтенсивных пучков заряженных частиц, которые позволяют выделить практически всю энергию пучка в тонком поверхностном слое (от долей до десятков микрон), доводя его до плавления и частичного испарения. При этом происходит интенсивная очистка поверхности от нежелательных примесей, инородных включений, растворенных газов, и её полировка. Благодаря высоким скоростям нагрева и охлаждения (до 10^9 К/с) в поверхностном слое могут происходить такие структурно-фазовые превращения, которые не могут быть реализованы в стационарном режиме (например, формирование неравновесных поверхностных сплавов в системах «пленка-подложка», измельчение кристаллической структуры металлов и сплавов)¹.

Перечисленные эффекты позволяют улучшить многие функциональные свойства обрабатываемых изделий: коррозионную стойкость, износостойкость режущего инструмента, узлов трения и штампов, усталостную прочность, а также повысить электрическую прочность вакуумной изоляции в различных высоковольтных устройствах и генераторах мощного СВЧ излучения.

Среди большого количества установок, предназначенных для генерации интенсивных пучков заряженных частиц, следует выделить источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков (НСЭП). Использование сравнительно небольших (до 40 кВ) ускоряющих напряжений обеспечивает целый ряд преимуществ по сравнению с источниками высокоэнергетических электронных пучков и мощных ионных пучков, а также импульсными лазерами: рентгенобезопасность, простота обеспечения высоковольтной изоляции и, как следствие, лучшая надежность и относительно небольшая стоимость источника².

Несмотря на значительный прогресс в области разработки и создания источников НСЭП, исследования и опыт эксплуатации данных источников показали ряд проблем, требующих решения, а именно:

- при достаточно однородных макро-распределениях анодной плазмы и эмиссионной катодной плазмы, распределение плотности энергии пучка на

¹ Ротштейн В.П. и др. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками // Новосибирск: Наука. – 2019. – 347 с.

² Озур Г.Е. и др. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом: Монография // Новосибирск: Наука. – 2018. – 176 с.

мишени имеет ярко выраженный максимум в центральной части, что обусловлено действием электрического и магнитного полей самого пучка в процессе транспортировки;

- существует необходимость улучшения стабильности эмиссионных характеристик катода и повышения ресурса его работы;

- разработанные (и уже ставшие традиционными) «схемы» генерации НСЭП не всегда подходят для решения некоторых новых задач поверхностной модификации материалов.

Цель диссертационной работы – поиск и разработка новых методов управления параметрами низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в пушках со взрывоэмиссионным катодом.

Задачи диссертационной работы:

- разработка новых методов формирования плазменного анода с максимумом концентрации заряженных частиц на периферии, что позволит улучшить однородность пучка в поперечном сечении;

- разработка и создание новых широкоапертурных взрывоэмиссионных катодов, обладающих более стабильными токовыми параметрами и высоким ресурсом работы;

- поиск методов управления распределением плотности энергии по сечению пучка для повышения его однородности с помощью изменения конфигурации ведущего магнитного поля в области мишени.

Научная новизна работы:

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 плазмоннаполненном 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 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. 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 ценность 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.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются 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.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Использование в сильноточной электронной пушке со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом гибридного разряда, сочетающего сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, локализованными по окружности кольцевого анода, позволяет значительно улучшить однородность распределения плотности энергии по сечению пучка за счет увеличения концентрации заряженных частиц на периферии плазменного столба. В однородном ведущем магнитном поле при диаметре эмитирующей части катода 6,2 см диаметр области однородного (на уровне 0,9 от максимального значения) распределения плотности энергии составляет 4,5–5 см для случая плазменного анода на основе гибридного разряда и лишь 2,5–3 см для случая плазменного анода на основе сильноточного отражательного разряда.

2. В сильноточной электронной пушке с плазменным анодом применение резистивной развязки эмиттеров широкоапертурного взрывоэмиссионного катода позволяет равномерно распределить эмиссионные центры по его поверхности. Катод, выполненный на основе объемных резисторов (например, типа ТВО), проволочные выводы которых используются в качестве эмиттеров, обладает повышенной скоростью нарастания тока на переднем фронте импульса (в среднем на 20–30%), как правило, меньшим среднеквадратичным разбросом плотности энергии от импульса к импульсу и увеличенным (минимум в пять раз) ресурсом работы по сравнению с наиболее часто используемым многопроволочным медным катодом. Ключевым условием использования резистивной развязки эмиттеров в пушке с плазменным анодом является тщательная изоляция катодной подложки от контакта с анодной плазмой.

3. Катодный узел, сочетающий взрывоэмиссионный катод со встроенными в него резистивно развязанными дуговыми источниками плазмы, питание которого осуществляется от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как срабатывание источников плазмы, так и ускорение электронов пучка к коллектору, обладает улучшенными эмиссионными характеристиками. Средняя плотность эмиссионного тока данного узла примерно на 50–70% выше значений, достигаемых в пушке с плазменным анодом и традиционно используемым многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом. Созданный катодный узел может быть использован для генерирования низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в режимах как вакуумного, так и газонаполненного диода.

4. При облучении немагнитных металлических мишеней управление распределением плотности энергии по сечению низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, транспортируемого в импульсном ведущем магнитном поле, может осуществляться коррекцией этого поля в области мишени. В случае облучения тонкой мишени, это реализуется расположением непосред-

ственно за ней ферромагнитных тел оптимальных размеров и форм, стягивающих на себя силовые линии ведущего магнитного поля. При облучении массивной мишени, толщина которой сравнима или превосходит глубину проникновения силовых линий импульсного ведущего магнитного поля, коррекция этого поля осуществляется размещением вблизи обрабатываемой поверхности мишени кольцевого или рамочного постоянного магнита, направление силовых линий которого внутри кольца (рамки) совпадает с направлением силовых линий импульсного ведущего магнитного поля.

Апробация результатов работы

Результаты работ докладывались и обсуждались на: 25-ом и 27-ом Международных Симпозиумах по разрядам и электрической изоляции в вакууме (*ISDEIV*) (Томск, Россия, 2012; Сучжоу, Китай, 2016); Международной конференции по потокам энергии и радиационным эффектам (*EFRE*) (Томск, Россия, 2014, 2016, 2018, 2020); Международной конференции по газоразрядной плазме и ее применениям (*GDP*) (Томск, Россия, 2013, 2015, 2019), 24-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков (Томск, Россия, 2018).

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, полученных результатов и выводов проводилось совместно с научным руководителем и соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 18 работах, из которых 8 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 9 полных текстов докладов в трудах Международных и Всероссийских конференций и симпозиумов, а также 1 статья в тематическом спецвыпуске журнала «Известия вузов. Физика». Автором совместно с коллегами получены патент РФ на изобретение и положительное решение по заявке на полезную модель.

Структура диссертации. 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, 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 низкоэнергетического сильноточного электронного пучка в пушке с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом.

Раздел 1.1 посвящен методам формирования плазменного анода. Первый из них основан на использовании точечных источников дуговой или искровой плазмы. Второй метод заключается в ионизации рабочего и/или остаточного газа с помощью сильноточного отражательного (пеннинговского) разряда. Перечислены достоинства и недостатки описанных методов.

В разделе 1.2 рассмотрены основные механизмы возбуждения взрывной эмиссии и подходы к созданию катодов сильноточных электронных пушек и обеспечению условий их эффективной работы. Представлены результаты исследования динамики нестационарного прикатодного слоя численными методами. Отмечено, что предварительное заполнение диода плазмой умеренной концентрации (10^{12} – 10^{13} см⁻³) улучшает работу катода за счёт усиления электрического поля и стимулирования эмиссии ионной бомбардировкой и делает возможным использование чисто металлических взрывоэмиссионных катодов большой площади (от 10 см²) при относительно низких (до 30 кВ) уровнях ускоряющего напряжения.

Раздел 1.3 посвящен процессам формирования и транспортировки низкоэнергетического сильноточного электронного пучка в плазмонаполненном диоде. Представлены результаты исследований протекания тока в нестационарном двойном слое. Рассмотрены вопросы ограничения тока сильноточного электронного пучка собственным объёмным зарядом, вопросы зарядовой и токовой нейтрализации пучка, а также влияния электрического и магнитного полей пучка на его транспортировку.

В разделе 1.4 рассмотрены проблемы однородности НСЭП и стабильности работы широкоапертурных взрывоэмиссионных катодов. Показано, что однородной эмиссии катода и равномерного распределения плотности ионного тока по сечению плазменного столба недостаточно для генерирования однородного по сечению пучка. В процессе транспортировки он деформируется и приобретает ярко выраженный максимум плотности энергии в приосевой области.

В разделе 1.5 приведены выводы по первой главе и сформулированы задачи исследований.

Во **второй главе** представлены разработанные и исследованные нами 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.

Раздел 2.1 посвящен гибриднему разряду на основе сильноточного отражательного разряда (ОР) и вакуумных дуг. Для зажигания данного разряда разработан анодный узел (рис. 1), состоящий из кольца из нержавеющей стали со встроенными в него по окружности 12-ю дуговыми источниками плазмы (ДИП). Кольцо служит анодом как для пеннинговской разрядной ячейки, так и для ДИП, что позволяет использовать один генератор для питания обоих разрядов. Катодами ДИП являются медные стержни, вставленные в керамические трубки. При подаче на анод импульса напряжения положительной полярности происходит искровой пробой по торцевой поверхности керамических трубок,

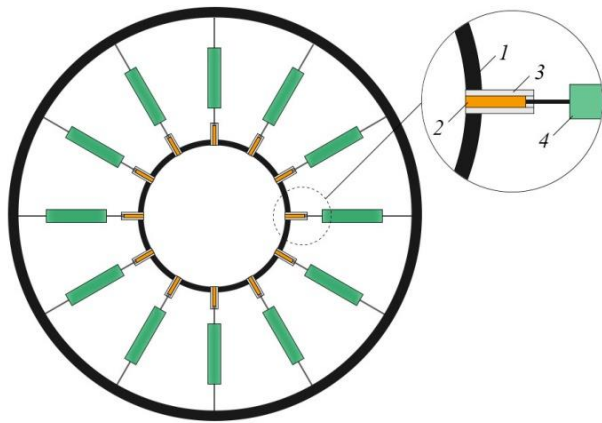


Рис. 1 Конструкция анодного узла для зажигания гибридного разряда. 1 – анодное кольцо, 2 – катод дугового источника плазмы, 3 – керамическая трубка, 4 – резистор ТВО-2

быстро переходящий в дуговую стадию. Появление плазмы дуговых источников стимулирует последующее зажигание высокопоточного ОР.

Выполнены исследования пространственной структуры свечения и динамики гибридного разряда. Измерены распределения концентрации заряженных частиц и плотности энергии по сечению плазменного столба и пучка, соответственно. Описан принцип изучения радиального профиля плотности энергии $W(r)$

с помощью тепловизионных измерений.

Показано, что распределение концентрации заряженных частиц, $n_a(r)$, с максимумом на периферии плазменного столба наблюдается практически с самого начала разряда и сохраняется на протяжении всего импульса. Увеличение по сравнению с приосевой областью может составлять 2,5 раза (рис. 2). Более выраженного перепада концентрации частиц в радиальном направлении можно добиться при помощи вспомогательного кольцевого экрана, ограничивающего распространение плазмы дуговых источников.

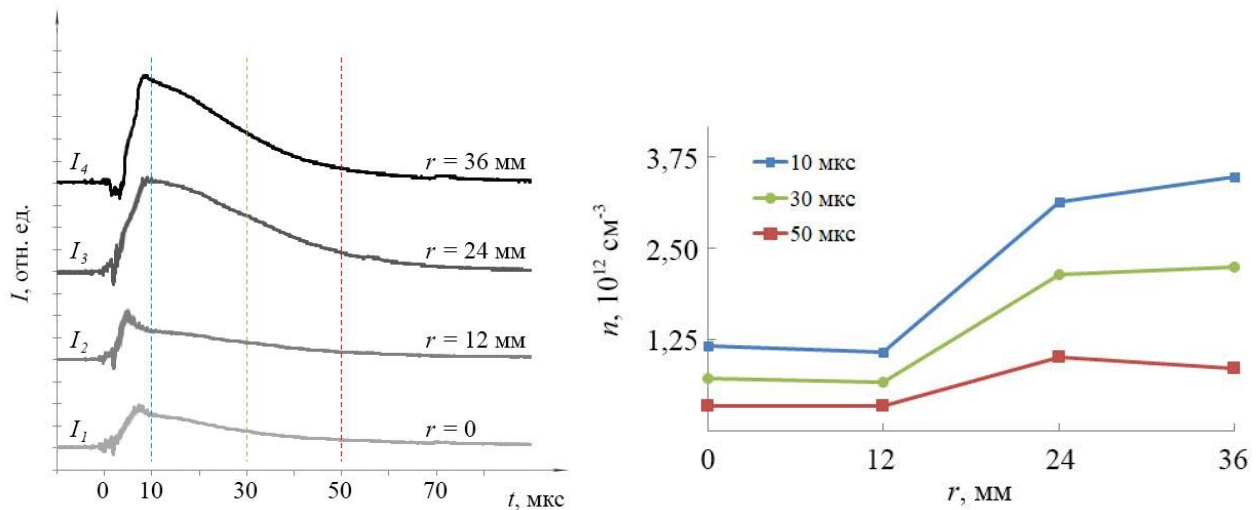


Рис. 2. Осциллограммы токов, измеренных двойными зондами ($I_1 - I_4$, 0,025 А/дел) и радиальные профили концентрации плазмы для различных моментов времени после начала разряда. $p = 0,5$ мТорр, $B_z = 0,11$ Тл, $U_0 = 6,7$ кВ

Установлено, что в отсутствие пучка переход отражательного разряда в высокопоточную стадию, как правило, происходит через 10–20 мкс после подачи напряжения (около 5 кВ) на анод. Увеличение анодного напряжения оказывает большее влияние на сокращение времени перехода, чем давление рабочего газа, равно как и на интегральную яркость свечения разряда.

Показано, что применение гибридного разряда позволяет примерно в 2 раза увеличить диаметр однородного распределения плотности энергии по сечению пучка (по уровню 0,9) в сравнении со случаем использования сильноточного ОР (рис. 3).

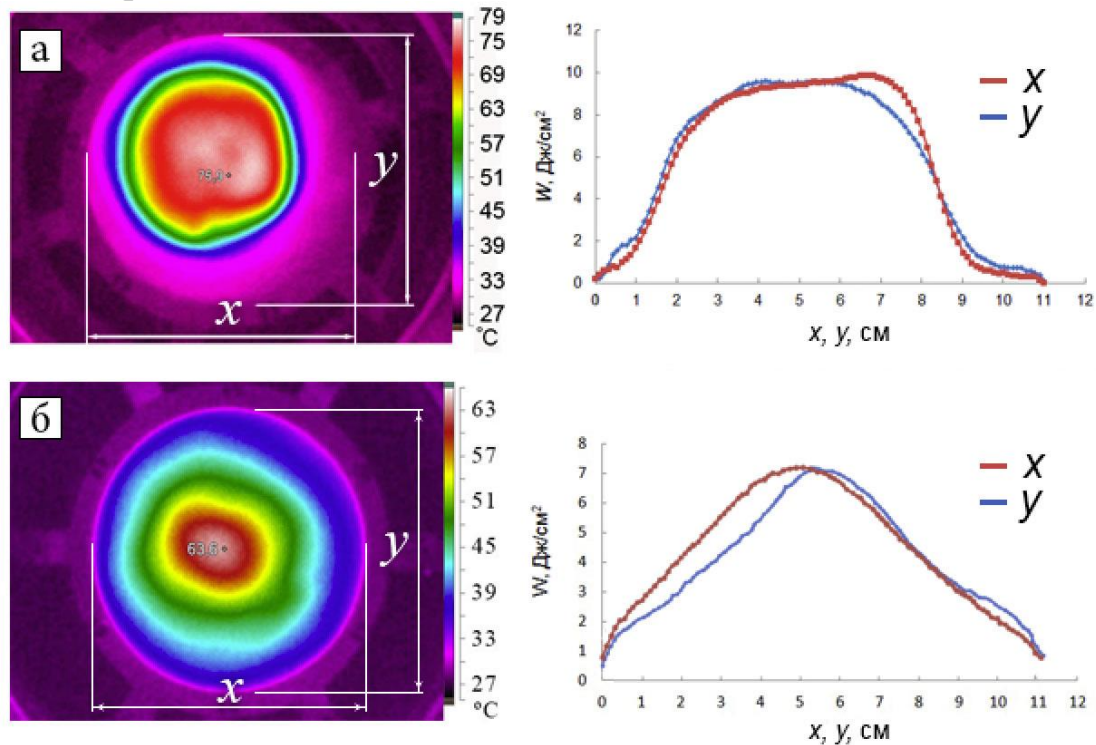


Рис. 3. Термограммы и соответствующие им распределения плотности энергии по сечению пучка. Катод из медной оплётки $\text{Ø}62$ мм. $p = 0,3$ мТорр, $l = 20$ см, $U_{ac} = 30$ кВ, $B_z = 0,106$ Тл.
а) – гибридный анод, б) – кольцевой анод

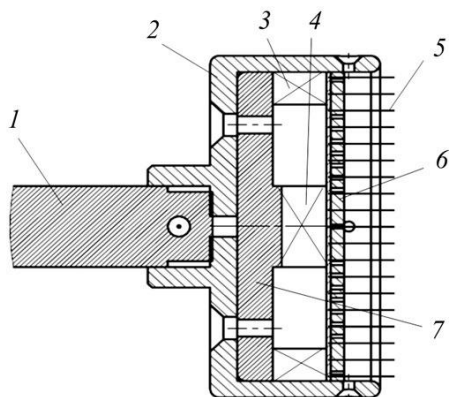


Рис. 4. Сборочный чертеж катодного узла.
1 — катододержатель, 2 — обойма, 3 — кольцевой постоянный магнит $\text{Ø}76 \times \text{Ø}60 \times 12$, 4 — дисковый постоянный магнит $\text{Ø}20 \times 10$, 5 — эмиттер, 6 — подложка, 7 — магнитопровод. Материал магнитов: Nd–Fe–B

ном зазоре между боковой поверхностью катода и стенкой корпуса пушки; зажигание МР на торцевой поверхности (эмитирующей части) катода и появление катодных пятен; появление одиночного ярко выраженного катодного пятна,

В разделе 2.2 представлены результаты исследования комбинированного разряда, сочетающего магнетронный и сильноточный отражательный разряды. Магнетрон, встроенный во взрывоэмиссионный катод (рис. 4), генерирует кольцевое облако плазмы вблизи катода, которая увеличивает плотность ионного тока на периферии столба плазмы при последующем зажигании сильноточного ОР.

При исследовании пространственной структуры свечения и динамики магнетронного разряда (МР) с помощью скоростной видеосъёмки определены три основные стадии его горения (рис. 5): появление свечения в радиальном зазоре между боковой поверхностью катода и стенкой корпуса пушки; зажигание МР на торцевой поверхности (эмитирующей части) катода и появление катодных пятен; появление одиночного ярко выраженного катодного пятна,

которое длительное время привязано к точке и крайне редко перемещается по поверхности катода. Длительность каждой из стадий зависит от давления рабочего газа и конструкции (вида) эмитирующей части катода. Эксперименты показали возможность достаточно стабильного зажигания разряда при сравнительно низких давлениях аргона (0,5–1 мТорр).

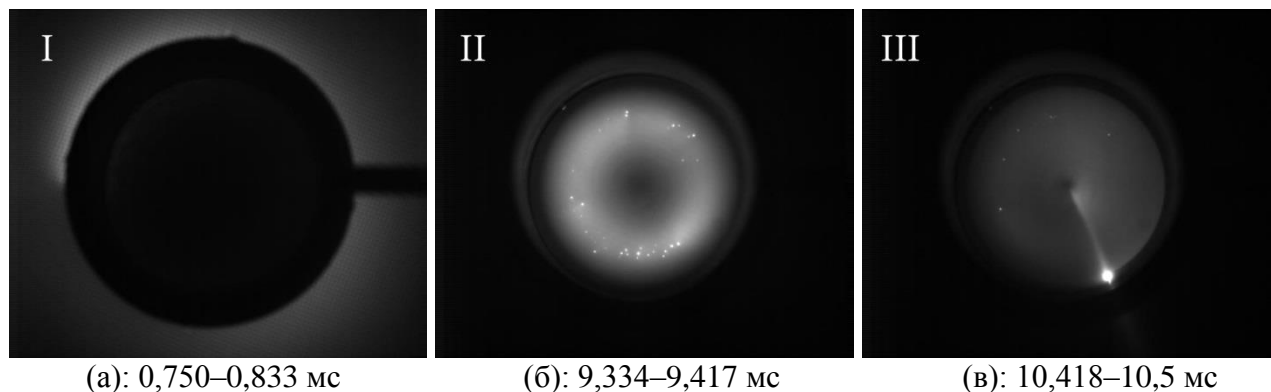


Рис. 5. Стадии горения магнетронного разряда

Установлено, что наложение продольного магнитного поля, необходимого для зажигания отражательного разряда и транспортировки сильноточного электронного пучка, после появления плазмы на торцевой поверхности взрывоэмиссионного катода приводит к переключению МР в продольном направлении, в сторону коллектора пучка.

Показано, что применение комбинированного разряда позволяет 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 распределения плотности энергии по сечению пучка.

В разделе 2.3 рассмотрен импульсный индукционный высокочастотный разряд низкого давления.

Эксперименты по исследованию разряда и его применению для генерации пучка проводились в электронной пушке, схема которой представлена на рис. 6. Импульс ВЧ (13,56 МГц) напряжения, $U_{ВЧ}$, амплитудой до 5 кВ и длительностью до 8,5 мс подавался на индуктор 2. Другой конец индуктора заземлялся через диафрагму 11, которая также выполняла несущую функцию.

Показана принципиальная возможность формирования плазменного анода с помощью ВЧ разряда при $p \geq 0,5$ мТорр. Использование вспомогательной слаботочной (1–2 А) искры способствует улучшению стабильности зажигания разряда и делает свечение плазмы более интенсивным (рис. 7).

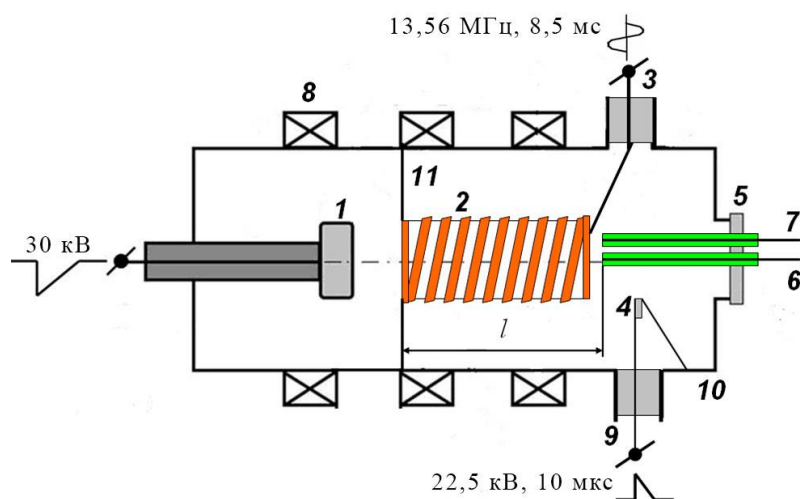


Рис 6. Схема эксперимента. 1 – взрывоэмиссионный катод; 2 – индуктор; 3 – ввод ВЧ напряжения; 4 – вспомогательный искровой промежуток; 5 – фланец; 6,7 – зонды; 8 – соленоид; 9 – высоковольтный ввод питания искры; 10 – корпус пушки; 11 – диафрагма

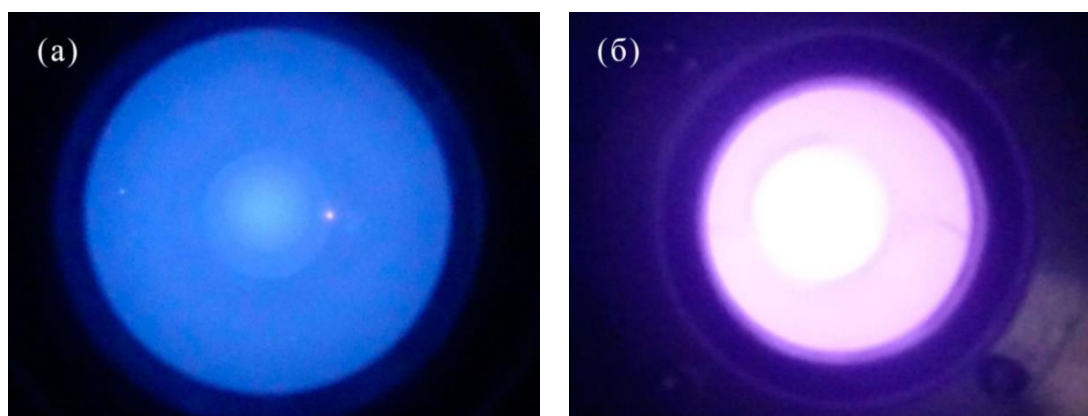


Рис. 7. Фотографии свечения ВЧ разряда. $U_{вч} = 4,8$ кВ. Вспомогательный искровой разряд: (а) – не используется; (б) – используется

С помощью зондовых измерений установлено, что концентрация электронов плазмы внутри индуктора сравнительно низка (не более $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и практически не изменяется с ростом давления (в диапазоне 0,5–5 мТорр). Вне индуктора концентрация резко падает уже на расстоянии 1–2 см от кромки, что затрудняет работу взрывоэмиссионного катода, делает её крайне нестабильной. Расположение катода внутри индуктора позволяет немного улучшить его работу, однако и в этом случае плотность энергии генерируемого пучка не превышает 2 Дж/см^2 , что является недостаточным для обработки большинства металлических изделий в режиме плавления поверхностного слоя.

По результатам исследований сделан выбор в пользу первого из вышеперечисленных разрядов.

В разделе 2.4 приведены выводы по главе.

Третья глава посвящена вопросу улучшения стабильности работы широкоапертурных взрывоэмиссионных катодов.

В разделе 3.1 рассмотрены созданные нами катоды с резистивной развязкой чисто металлических эмиттеров. Предложено два варианта конструкции катода. В первом катоде эмиттерами служат проволочные выводы резисторов

ТВО-1, во втором – нихромовые проволоки, вставленные в керамические трубки (рис. 8).

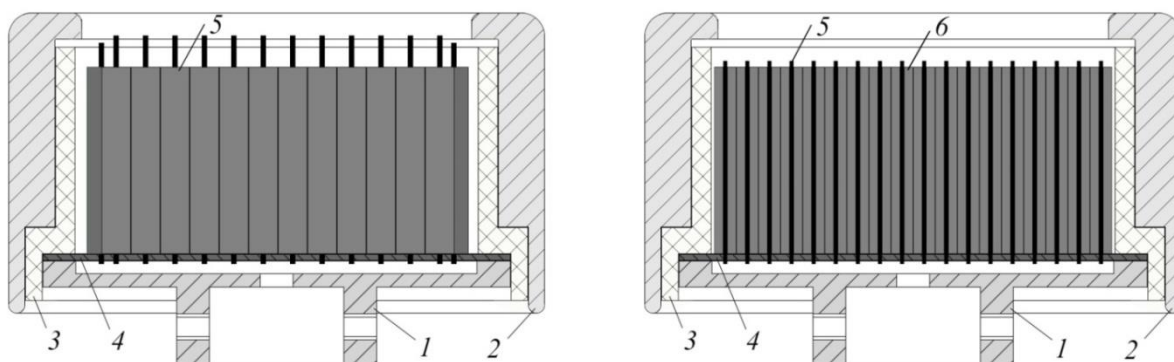


Рис. 8. Конструкции взрывоэмиссионных катодов на основе резисторов ТВО-1 (а) и нихромовых проволок (б). 1 – катододержатель; 2 – экранирующий электрод; 3 – фторопластовая обойма; 4 – латунный диск; 5 – резистор ТВО-1 (а) или нихромовая проволока $\varnothing 100$ мкм (б); 6 – керамическая трубка (б)

Представлены результаты исследования интегрального свечения плазмы эмиссионных центров катода, его характерные осциллограммы тока и напряжения (рис. 9). Показано, что независимо от типа используемого в эксперименте плазменного анода, катодные пятна стабильно наблюдаются практически на всех эмиттерах. Установлено, что созданные катоды (по сравнению с наиболее часто используемыми многопроволочными медными катодами) обладают большей скоростью нарастания тока на переднем фронте импульса (в среднем на 20–30%), а их применение позволяет уменьшить как среднеквадратичный разброс плотности энергии пучка от импульса к импульсу, так и отношение её максимального значения к среднему значению в серии импульсов.

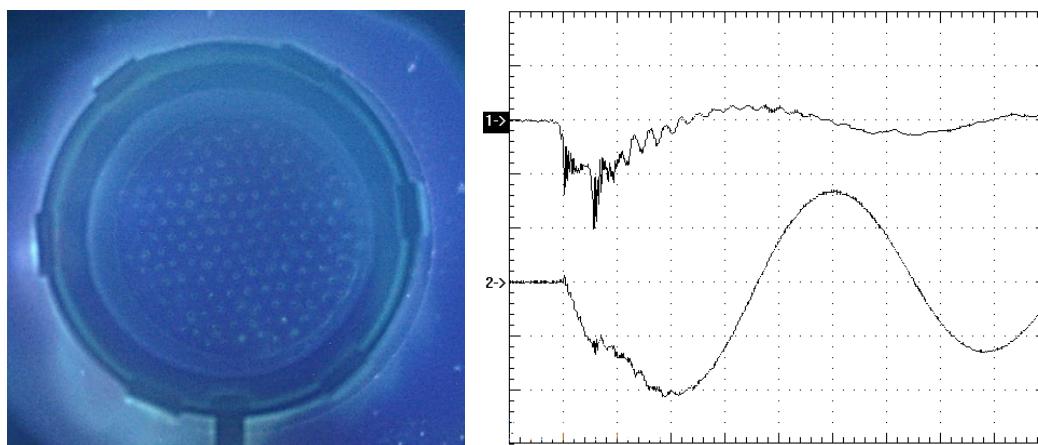


Рис. 9. Фотография свечения (слева) и осциллограммы импульсов (справа) ускоряющего напряжения (Ch1, 20 кВ/дел), тока катода (Ch2, 30 кА/дел). Горизонтальная шкала: 1 мкс/дел. $p = 0,4$ мТорр; $B_z = 0,106$ Тл; $U_{ac} = 30$ кВ. Кольцевой анод

Получены распределения плотности энергии по сечению НСЭП, формируемого в плазмонаполненном диоде (рис. 10). При сравнении созданных катодов между собой сделан вывод о том, что по совокупности характеристик (параметров) наиболее предпочтительным является катод на базе резисторов ТВО-1, ресурс работы которого на данный момент превышает 50 тысяч импульсов

(при токовой нагрузке $0,001 \text{ Кл/см}^2$), а его эмиссионные свойства остаются на прежнем (высоком) уровне.

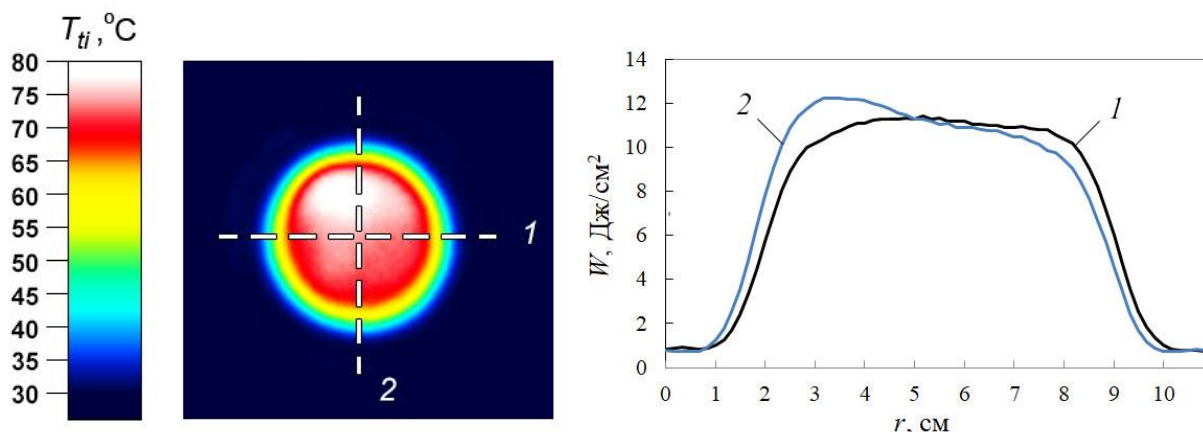


Рис. 10. Термограмма и соответствующие ей распределения плотности энергии пучка в двух сечениях. $p = 0,4 \text{ мТорр}$; $B_z = 0,106 \text{ Тл}$, $U_{ac} = 30 \text{ кВ}$. Плазменный анод на основе гибридного разряда. Катод на базе резисторов ТВО-1

В разделе 3.2 описывается разработанный нами способ инициирования взрывной эмиссии с помощью встроенных в катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы. Представлено схематичное устройство нового катодного узла (рис. 11), питание которого осуществляется от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как срабатывание источников плазмы, так и ускорение электронов пучка к коллектору.

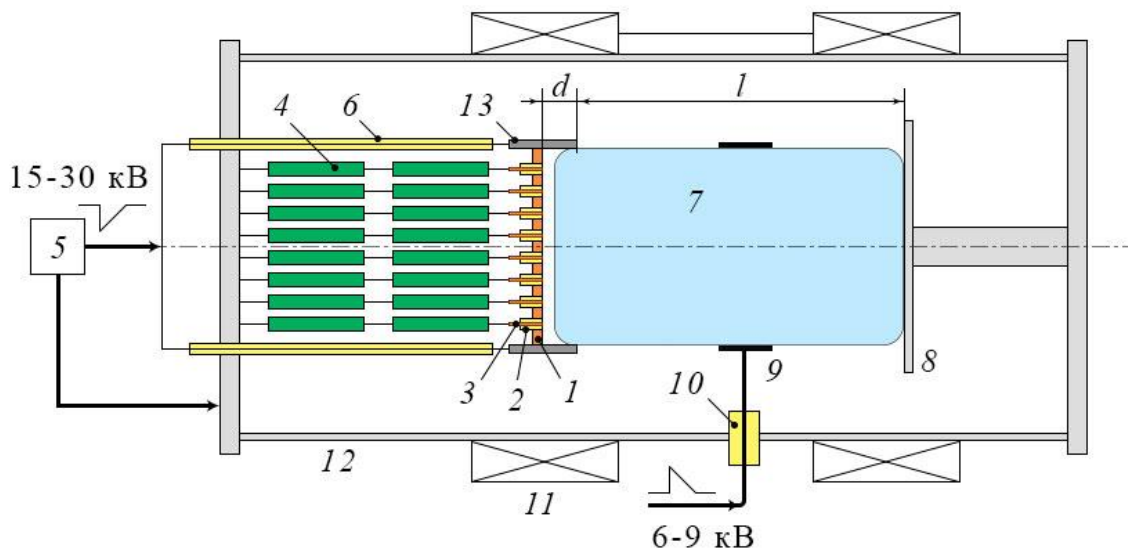


Рис. 11. Принципиальная схема электронной пушки и ее катодного узла. 1 – медный диск (катод), 2 – керамическая трубка, 3 – медный электрод, 4 – резистор ТВО-2, 5 – генератор высоковольтных импульсов, 6 – изоляторы высоковольтного катодного ввода, 7 – анодная плазма, 8 – коллектор, 9 – кольцевой анод, 10 – изолятор анодного ввода, 11 – импульсный соленоид, 12 – корпус пушки, 13 – экранирующий электрод

Установлено, что предложенный способ инициирования взрывной эмиссии, реализованный в новом катодном узле, обеспечивает повышенную (примерно в 1,5–1,7 раза) среднюю плотность эмиссионного тока по сравнению с традиционной схемой пушки с плазменным анодом и многопроволочным мед-

ным взрывоэмиссионным катодом. При этом распределение плотности энергии по сечению пучка выглядит более однородным.

Показано, что созданный катодный узел может успешно использоваться для генерирования сильноточных электронных пучков и без предварительного заполнения пространства между катодом и коллектором плазмой от постороннего источника, т.е. в режиме вакуумного или газонаполненного диода. При этом, как и в случае плазмонаполненного диода, катодный узел демонстрирует стабильную работу, о чем свидетельствует высокая повторяемость осциллограмм тока и напряжения от импульса к импульсу.

В разделе 3.3 приведены выводы по главе.

В **четвертой главе** исследованы методы 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 (рис. 12).

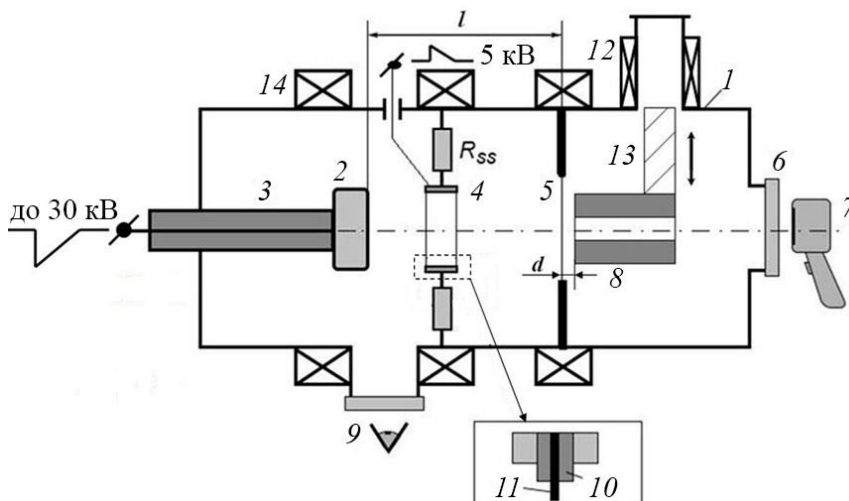


Рис. 12. Схема эксперимента. 1 – корпус; 2 – взрывоэмиссионный катод; 3 – изолятор; 4 – анодный узел; 5 – фольговый коллектор; 6 – ИК окно из CaF_2 ; 7 – тепловизор; 8 – концентратор; 9 – окно для визуального наблюдения и фотографирования; 10 – керамическая трубка; 11 – катод дугового источника плазмы; 12 – катушка электромагнита; 13 – якорь электромагнита; 14 – секционированный соленоид. $R_{ss} = 110 \Omega$ – сопротивление в цепи дугового источника

С помощью тепловизора выполнены количественные измерения распределения плотности энергии для концентраторов различных размеров. При использовании в эксперименте концентратора и гибридного разряда на основе сильноточного ОР и вакуумных дуг получен однородный по сечению пучок диаметром $\sim 5,5$ см (рис. 13).

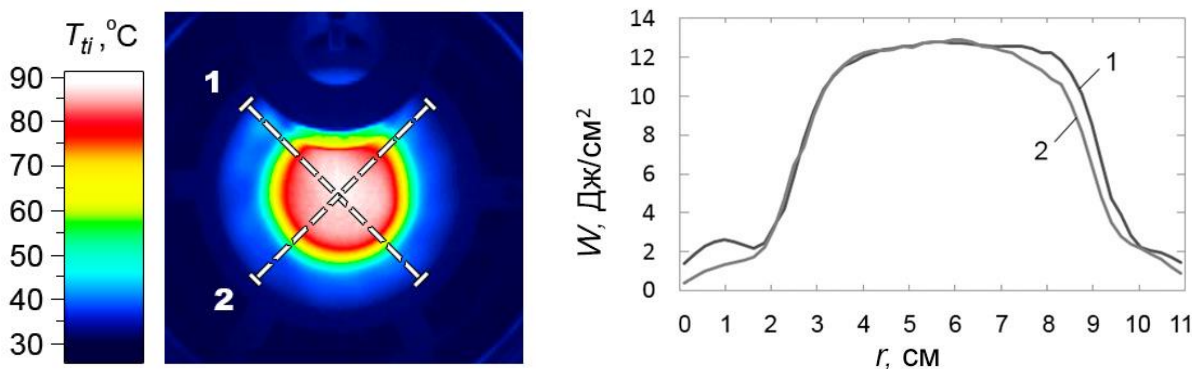


Рис. 13. Термограмма (слева) и соответствующие ей распределения плотности энергии по сечению пучка (справа). $B_z = 0,106$ Тл, $l = 22,5$ см, $d = 5$ мм, концентратор № 3, гибридный анод

Установлено, что наличие концентратора не уменьшает ток пучка и величину полной энергии пучка, приходящейся на мишень, что свидетельствует об отсутствии существенных потерь электронов за счёт отражения от «магнитной пробки». Наоборот, расположение концентратора за мишенью приводит к увеличению плотности энергии пучка в центральной его части диаметром около 7 см на 20–30% за счёт стягивания периферийных электронов пучка ближе к центру. При сравнении экспериментальных данных с расчётами сделан вывод о том, что полученные результаты могут стать основой для расчётов плотности энергии пучка при обработке изделий из магнитных материалов.

В разделе 4.2 предложен и исследован метод, позволяющий осуществлять эффективную обработку сильноточным электронным пучком массивных немагнитных металлических изделий, толщина которых значительно превосходит

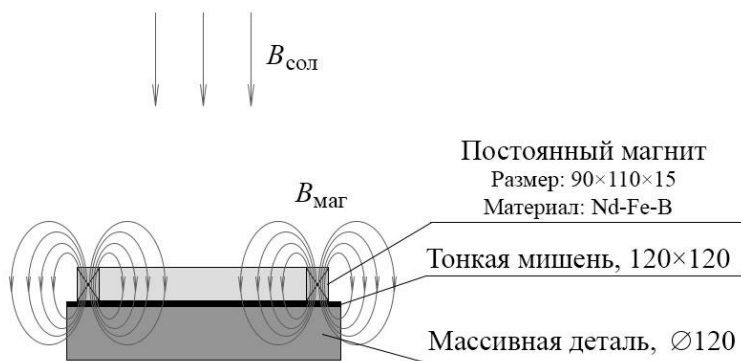


Рис. 14. Мишенная сборка

глубину проникновения силовых линий импульсного ведущего магнитного поля. Суть метода заключается в расположении на поверхности мишени рамочного или кольцевого постоянного магнита, силовые линии магнитного поля которого внутри рамки/кольца совпадают с направлением силовых линий ведущего поля (рис. 14). Эффективность метода оценивалась по автографам пучка (рис. 15).

Эффективность метода оценивалась по автографам пучка (рис. 15).

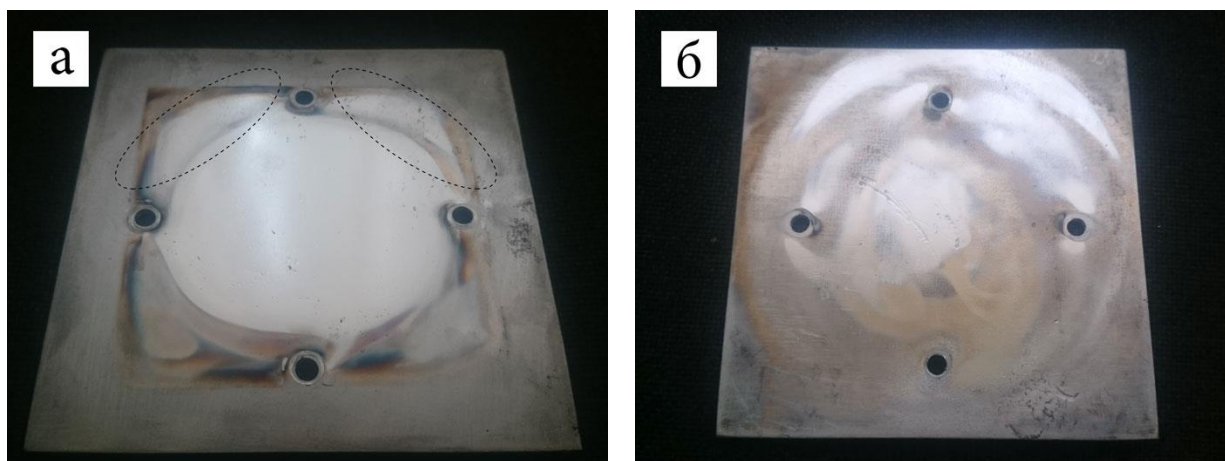


Рис. 15. Автографы на массивной мишени из дюралюминия: (а) – установлен рамочный постоянный магнит; (б) – магнит отсутствует

Показано, что использование постоянного магнита позволяет не только сделать пучок вновь сфокусированным (отпечаток близок по виду к тому, который был получен на тонкой мишени), но и трансформировать его к квазиквадратному виду (если применяется рамочный магнит). Особенно заметна такая трансформация при облучении мишеней из материалов, требующих для импульсного плавления относительно небольшую плотность энергии, например, из титана.

Возможность трансформации поперечного профиля плотности энергии пучка подтверждается и тепловизионными измерениями (рис. 16).

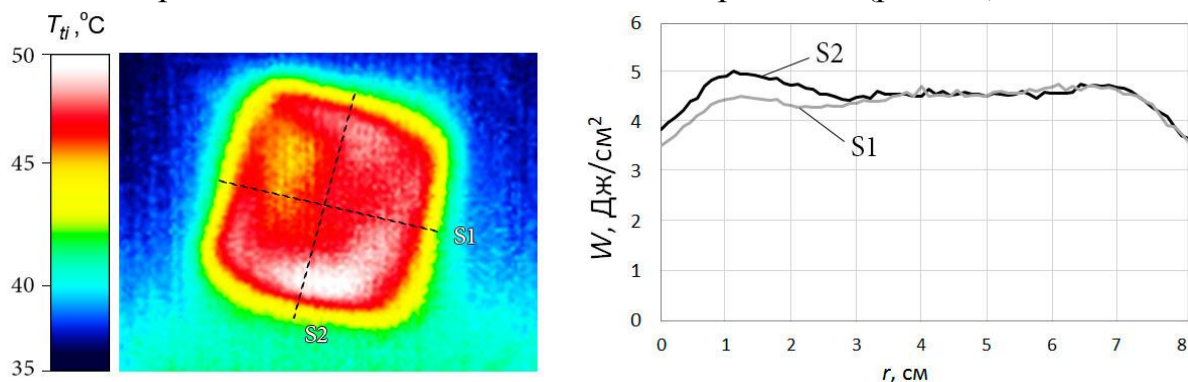


Рис. 16. Термограмма (слева) и соответствующие ей распределения плотности энергии (справа). Мишень из нержавеющей стали толщиной 200 мкм. Используется сборный рамочный магнит размером 100×80×15. $U_{ГВИ} = 25$ кВ

Во второй части *раздела 4.2* изложены результаты выполненных в среде COMSOL Multiphysics численных расчётов, в которых исследовалась конфигурация результирующего магнитного поля в различные моменты времени от начала протекания тока в соленоиде в области расположения массивной медной мишени при отсутствии и наличии на её поверхности постоянного рамочного (кольцевого) магнита. Расчёты подтвердили возможность коррекции ведущего магнитного поля предложенным методом и удовлетворительное согласие с результатами экспериментов.

В *разделе 4.3* приведены выводы по главе.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что использование плазменного анода с максимумом концентрации заряженных частиц на периферии плазменного столба, позволяет значительно улучшить равномерность распределения плотности энергии по сечению пучка, генерируемого в сильноточной электронной пушке со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом. При этом установлено, что наиболее перспективным (на данный момент) способом создания плазменного анода с указанным распределением частиц является гибридный разряд, сочетающий сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, локализованными у анода отражательного разряда. Более выраженного перепада концентрации плазмы в радиальном направлении можно добиться при помощи вспомогательного металлического кольцевого экрана, ограничивающего распространение плазмы дуговых источников в этом направлении.

2. При исследовании динамики свечения импульсного магнетронного разряда, зажигаемого в сильноточной электронной пушке, в которой во взрывоэмиссионный многоэмиттерный катод встроен планарный магнетрон, установлено, что свечение вначале появляется в радиальном зазоре между боковой поверхностью катода и стенкой корпуса пушки и лишь через несколько миллисекунд – на торцевой (рабочей) поверхности катода. Последующее наложение ведущего магнитного поля приводит к переключению магнетронного разряда в продольном направлении, т.е. в сторону коллектора пучка. Генерация пучка в пушке с плазменным анодом, созданным с использованием только магнетронного разряда, пока не удалась.

3. Формирование плазменного анода с помощью индукционного импульсного ВЧ разряда осуществимо вплоть до давлений 0,5 мТорр при использовании вспомогательной слаботочной искры. Согласно зондовым измерениям, концентрация электронов плазмы, формируемой импульсным ВЧ разрядом, сравнительно низка (не более $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и практически не изменяется с ростом давления. При этом плазма в большей степени сосредоточена внутри индуктора. 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 (см. раздел 3.2) может быть перспективным, но это требует дальнейших исследований.

4. Разработаны и успешно испытаны в сильноточном плазмонаполненном диоде широкоапертурные взрывоэмиссионные катоды с резистивной развязкой эмиттеров: катод из нихромовых проволок и катод из резисторов ТВО-1, проволочные выводы которых используются в качестве эмиттеров. Данные катоды (по сравнению с многопроволочными медными) обладают большей скоростью нарастания тока на переднем фронте импульса (в среднем на 20–30%), а их применение позволяет уменьшить как среднеквадратичный разброс плотно-

сти энергии пучка от импульса к импульсу, так и отношение её максимального значения к среднему значению в серии импульсов. Последний параметр является особенно важным, например, при формировании поверхностных сплавов на металлических изделиях с памятью формы. По совокупности свойств, наиболее подходящим является катод на базе резисторов ТВО-1, как обеспечивающий лучшую однородность распределения плотности энергии по сечению пучка. Подтверждённый ресурс работы этого катода (в безмасляном вакууме) составил не менее 50 000 импульсов без ухудшения его эмиссионных свойств, что практически на порядок превышает ресурс наиболее часто использовавшегося ранее многопроволочного медного катода.

5. Создан и успешно испытан катодный узел сильноточной электронной пушки с многоканальным иницированием эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика. Отличительной чертой данного узла является его питание от одного генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего как срабатывание резистивно развязанных дуговых источников плазмы, встроенных во взрывоэмиссионный катод, так и ускорение электронов пучка к коллектору. Средняя плотность эмиссионного тока созданного катода примерно на 50–70% выше значений, обеспечиваемых традиционной схемой пушки с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом. Новый катодный узел может быть использован для генерирования сильноточных электронных пучков в режимах как вакуумного, так и газонаполненного диода.

6. В созданных катодах появляется возможность управления распределением плотности энергии по сечению пучка путём изменения сопротивления в цепи каждого эмиттера (в случае катода с резистивной развязкой) или дугового источника плазмы (в случае катодного узла с многоканальным иницированием эмиссии). Но проверка этой возможности требует дальнейших исследований.

7. Показано, что при облучении немагнитных металлических мишеней, управление распределением плотности энергии по сечению низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, транспортируемого в импульсном ведущем магнитном поле, может осуществляться коррекцией этого поля в области мишени. В случае облучения тонкой мишени, это реализуется расположением непосредственно за ней стягивающих на себя силовые линии ведущего магнитного поля ферромагнитных тел оптимальных размеров и форм. При облучении массивной мишени, толщина которой сравнима или превосходит глубину проникновения силовых линий ведущего магнитного поля, коррекция ведущего магнитного поля осуществляется размещением вблизи обрабатываемой поверхности мишени кольцевого или рамочного постоянного магнита, направление силовых линий которого внутри кольца (рамки) совпадают с направлением силовых линий импульсного магнитного поля. Возможность такой коррекции ведущего магнитного поля подтверждена численными расчётами, выполненными в среде COMSOL Multiphysics.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кизириди, П.П. Формирование нерелятивистских сильноточных электронных пучков в пушке с плазменным анодом на основе комбинированного разряда / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, Л.А. Зюлькова, А.В. Батраков // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 6/2. – С. 42–48.
2. Kiziridi, P.P. The High-Current Electron Gun with Plasma Anode Based on a Combined Discharge / P.P. Kiziridi, G. E. Ozur // Proc. 25th Int. Symp. on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum. – Tomsk, Russia, September 7–12, 2012. – P. 607–610.
3. Kiziridi, P.P. The High-Current Electron Gun with Plasma Anode Based on a Combined Discharge / P.P. Kiziridi, G. E. Ozur // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 10/3. – С. 180–183.
4. Кизириди, П.П. Исследование распределения плотности энергии нерелятивистского сильноточного электронного пучка с помощью тепловизора / П.П. Кизириди, А.Б. Марков, Г.Е. Озур, В.П. Фролова // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 3/2. – С. 114–117.
5. Кизириди, П.П. Формирование плазменного анода в сильноточной электронной пушке с помощью гибридного разряда / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 11. – С. 151–155.
6. Кизириди, П.П. Характеристики сильноточной электронной пушки с плазменным анодом на основе гибридного разряда / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // ЖТФ. – 2020. – Т. 90. – № 2. – С. 312–317.
7. Ozur, G.E. Characteristics of a Plasma Anode Based on Hybrid Discharge for the Use in a High-Current Electron Gun / G.E. Ozur, P.P. Kiziridi // Proc. of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – Tomsk, 2020. – P. 178-180.
8. Kiziridi, P.P. High-Current Electron Gun with a Planar Magnetron Integrated with an Explosive-Emission Cathode / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur // Vacuum. – 2017. – V. 143. – P. 444–446.
9. Кизириди, П.П. Динамика импульсного магнетронного разряда в сильноточной электронной пушке / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, Л.А. Зюлькова, С.А. Попов, С.А. Шевелёв, М.А. Алёхин. // ЖТФ. – 2017. – Т. 87. – № 11. – С. 1641–1648.
10. Kiziridi, P.P. The formation of a plasma anode in a Penning discharge cell combined with a planar magnetron / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur, L.A. Zyulkova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – P. 022003.
11. Ozur, G.E. Low-Pressure Pulsed RF Discharge for the Formation of a Plasma Anode of a High-Current Electron Gun / G.E. Ozur, P.P. Kiziridi // Proc. of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – Tomsk, 2020. – P. 174–177.
12. Kiziridi, P.P. Explosive-emission cathode with resistive decoupling for a high-current plasma-filled diode / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – V. 652. – P. 012008.

13. Kiziridi, P.P. Improvement the Stability of Operation of a High-Current, Plasma-Filled Electron Gun / P.P. Kiziridi, G.E. Ozur, E.V. Yakovlev // Proc. 27th Int. Symp. on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum. – Suzhou, China, September 18–23, 2016. – V. 2. – P. 766–769.

14. Кизириди, П.П. Взрывоэмиссионные катоды с резистивной развязкой для сильноточных плазмонаполненных диодов / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // ПТЭ. – 2019. – № 4. – С. 67–72.

15. Кизириди, П.П. Катодный узел сильноточной электронной пушки с многоканальным иницированием эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46. – № 15. – С. 47–50.

16. Положительное решение по заявке на полезную модель № 2020117311. Сильноточная электронная пушка / Г.Е. Озур, П.П. Кизириди. – Заявл. 14.05.2020. – Решение от 16.02.2021.

17. Кизириди, П.П. Тепловизионная диагностика нерелятивистского сильноточного электронного пучка, транспортируемого в режиме "пассивной фокусировки" / П.П. Кизириди, А.В. Батраков, Г.Е. Озур // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9/3. – С. 66–70.

18. Кизириди, П.П. Перераспределение плотности энергии низкоэнергетического сильноточного электронного пучка с помощью ферромагнитных вставок / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 11/3. – С. 244–248.

19. Кизириди, П.П. О профиле низкоэнергетического сильноточного электронного пучка, управляемом с помощью ферромагнитных вставок / П.П. Кизириди, Г.Е. Озур // ЖТФ. – 2015. – Т. 85. – № 6. – С. 132–136.

20. Патент РФ № 2688190. Устройство для поверхностной обработки массивных металлических изделий / Г.Е. Озур, П.П. Кизириди, Е.В. Яковлев. – Заявл. 10.01.2018. – Оpubл. 21.05.2019.