

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 537.533; 533.9.03; 621.384

ГОЛУБЕВ
Юрий Петрович

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКАМИ
БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новополоцк 2003

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
ГРУЗДЕВ В.А.
(УО «Полоцкий государственный университет», заведующий кафедрой физики)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
КУНДАС С.П.
(УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», проректор по учебной работе, информатизации и международным связям)

доктор физико-математических наук
АСТАШИНСКИЙ В.М.
(ГНУ «Институт молекулярной и атомной физики» НАН Беларуси, заведующий сектором физики плазменных ускорителей)

Оппонирующая организация – ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится 27 июня 2003 г. в 12 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.19.03 при УО «Полоцкий государственный университет». Отзывы на автореферат направлять по адресу: Блохина, 29, Новополоцк, 211440, тел. ученого секретаря 8(0214)551047, факс (+375214)550679.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2003 г.

Ученый секретарь совета К 02.19.03,
кандидат технических наук, доцент

В.М. Константинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Электронно-лучевые технологии (ЭЛТ) являются перспективными в области приборо- и машиностроения, а в ряде случаев и единственно возможными. С помощью сфокусированных электронных пучков диаметром порядка 1 мм и плотностью мощности от 10^8 до 10^{10} Вт/м² можно осуществлять электронно-лучевую сварку материалов толщиной от 0,1 до 100 мм, с общим энерговыделением, значительно меньшим, чем при любом другом способе сварки. Менее интенсивные по плотности мощности электронные лучи (10^6 – 10^8 Вт/м²) используются для модификации поверхностных слоев материалов. Для решения таких технологических задач как нагрев, закалка, наплавка, отжиг, спекание порошков, пайка высокотемпературными припоями и других, для которых требуется термическое воздействие электронного пучка на значительные площади вплоть до фазовых переходов при низком энерговыделении в изделие, находят применение пучки большого сечения (ПБС). Их применение эффективно для обработки поверхностей сложной конфигурации, для которых не допускаются коробления и другие дефекты, которые могут быть обусловлены большим энерговыделением.

Однако использование возможностей ЭЛТ ограничено применением в пушках, генерирующих технологический электронный пучок термокатодов, функционирующих только в условиях высокого вакуума (что повышает подготовительное время на 70–90% от всего рабочего цикла), имеющих незначительный срок службы (10–100 ампер-часов). Ремонт и обслуживание термокатодных пушек сопряжены со значительными трудностями и большими затратами, т.к. требуют специального оборудования и дорогостоящих материалов (тантал, вольфрам). Альтернативой традиционным термокатодным пушкам являются пушки с плазменным эмиттером, обладающие значительно большим ресурсом, меньшей стоимостью, относительной простотой в изготовлении и обслуживании.

Таким образом, выбор темы исследований обусловлен необходимостью разработки плазменных источников электронов (ПИЭЛ) с пучками большого сечения, функционирующих как в импульсном, так и стационарном режимах, для реализации ряда перспективных электронно-лучевых технологий для чего необходимы комплексные исследования физических процессов, сопровождающих работу ПИЭЛ в указанных режимах.

Создание эффективного плазменного эмиттера большой площади с требуемой плотностью тока эмиссии на основе тлеющего разряда (импульсного или стационарного), который характеризуется повышенной стабильностью эмиссионных свойств, в связи с отсутствием законченной теории ПИЭЛ предполагает проведение ряда исследований: характеристик разряда в различных электродных системах, условий формирования импульсного тлеющего разряда, параметров формируемой эмитирующей плазмы, физиче-

ских процессов переключения заряженных частиц в пучок большого сечения, способов повышения электрической прочности промежутка ускорения при повышенных давлениях.

Связь работы с научными программами, темами. Исследования проводились в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ, выполненных в Полоцком государственном университете в 1999–2002 гг по темам: «Исследование условий формирования в плазменных источниках электронов электронных пучков большого сечения с заданным распределением тока» (№ гос. регистрации 2000906), «Разработка экспериментального образца источника электронов с пучком большого сечения» (№ гос. регистрации 2000908), «Исследование сверхплотных аномальных тлеющих стационарных и импульсных разрядов в больших объемах» (№ гос. регистрации 2001347), в рамках гранта Министерства образования Беларуси «Электронно-лучевой энергокомплекс на базе пушек с плазменным эмиттером» (№ гос. регистрации 2001343), а также Государственной программы фундаментальных исследований по заданию «Плазмодинамика 24» – «Теоретические и экспериментальные исследования эффективности переключения электронного тока в плазменных источниках электронов с замагниченной эмитирующей плазмой» (№ гос. регистрации 2002801).

Цель работы – создание ПИЭЛ с высокой стабильностью эмиссионных свойств в широком диапазоне рабочих условий, обеспечивающих генерацию электронных пучков большого сечения с параметрами, необходимыми для реализации электронно-лучевых технологий в машино- и приборостроении.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие конкретные задачи:

провести анализ способов получения эмитирующей плазменной поверхности большой площади, разработать газоразрядные системы для получения эмитирующей плазмы с требуемыми параметрами (плотность и ее распределение по сечению);

изучить типичные характеристики газовых разрядов в разработанных электродных структурах, провести моделирование процессов формирования эмитирующей плазмы, исследовать параметры и эмиссионные свойства формируемой эмитирующей плазмы;

изучить особенности переключения электронного тока из плазмы в пучок большого сечения и механизмы возмущения плазмы, предложить способы стабилизации эмиссионного тока при повышенных рабочих давлениях;

исследовать характеристики управления параметрами электронных пучков в разработанных ПИЭЛ, провести эксплуатационные испытания источников при реализации электронно-лучевого воздействия на материалы.

Объектом исследования являются электродные структуры, в которых возбуждается газовый разряд, плазма газового разряда, электронный пучок

большого сечения. **Предмет исследования** – взаимосвязь характеристик разрядов, параметров и эмиссионных свойств эмитирующей плазмы, условий переключения и ускорения электронов из газоразрядной плазмы и параметров пучка большого сечения, а также свойства поверхностей после электроно-лучевого воздействия.

Гипотеза состоит в том, что эффективная генерация пучков большого сечения с параметрами, необходимыми для реализации ряда электронно-лучевых технологий, возможна при помощи плазменных источников электронов на основе тлеющих разрядов с осцилляцией электронов. Такие параметры возможно обеспечить в ПИЭЛ с использованием разрядных структур с расширением плазмы или с формированием разряда в системе большого объема.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использован комплексный подход, включающий анализ проблемы, проведение теоретических исследований, разработку физических и аналитических моделей (моделирование на ЭВМ) и экспериментальные исследования.

Основными методами исследований являлись различные модификации метода зондовых измерений. Распределение и величина индукции магнитного поля в электродных структурах изучалась с помощью датчиков Холла. Параметры плазмы, формируемой в электродной структуре источника, определялись методом одиночного ленгмюровского зонда. Эмиссионные свойства плазмы исследовались при помощи зонда-коллектора. Структура и свойства материалов после электронно-лучевого воздействия изучались с помощью методов оптической микроскопии, макро- и микродюриметрии.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем:

На основе численного моделирования процессов в расширителе плазмы (экспандере) впервые установлено, что при некотором критическом давлении $p_{кр}$ плазмообразующего газа, экспандер газоразрядной структуры переходит в активный режим. В этом режиме (при $p > p_{кр}$) объемная ионизация плазменными электронами вносит основной вклад в образование заряженных частиц в экспандере в сравнении с диффузией зарядов из основной области разряда.

Показана возможность формирования кратковременного тлеющего разряда за счет десорбции газа, адсорбированного электродами разрядной системы. Такой разряд обеспечивает плотность тока пучка, достаточную для технологического применения.

Впервые установлено, что возмущение плазмы отбором электронов из экспандера в эмиссионный канал малого диаметра при формировании узких пучков может оказывать стабилизирующее действие на эмиссионный ток в результате эволюции пристеночных слоев в процессе отбора в экспандере и эмиссионном канале.

Впервые предложен способ двухсеточной стабилизации эмитирующей плазменной поверхности в ПИЭЛ с пучком большого сечения при повышенных давлениях, основанный на ограничении влияния вторичной пучковой плазмы, образующейся в ускоряющем промежутке, на эмитирующую способность плазмы.

На основе полученных результатов разработаны и созданы конструкции плазменных источников электронов, генерирующие электронные пучки различного сечения со стабильными параметрами, достаточными для осуществления технологий поверхностного электронно-лучевого воздействия.

Практическая и экономическая значимость результатов.

Результаты, полученные в работе, позволяют расширить диапазон условий стабильной работы плазменных источников электронов, и как следствие, увеличить область применения электронно-лучевых технологий.

Достигнутые параметры разработанных источников позволяют осуществлять термическую обработку поверхностей большинства материалов машиностроения в широком диапазоне температур вплоть до оплавления.

Реализация результатов данной работы будет способствовать решению задачи освоения новых и высоких технологий, применение которых обусловлено необходимостью повышения качества продукции предприятий машино- и приборостроительного профиля, снижения энерго- и материалоемкости производства. В частности, создание электронно-лучевого оборудования на базе пушки с плазменным эмиттером, позволит исключить импорт подобного дорогостоящего оборудования, снизить до 40–50 % энергоемкость и до 50–60 % материалоемкость производства сложнопрофильных изделий ответственного назначения в промышленности по сравнению с традиционными технологиями.

Результаты работы внедрены в учебный процесс и использованы при выполнении гранта Белорусского фонда фундаментальных исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически установленные условия работы экспандера обеспечивают его переход к активному режиму, который характеризуется увеличением концентрации заряженных частиц за счет усиления объемных ионизационных процессов, что приводит к увеличению эффективности ПИЭЛ.

2. Возмущение плазмы, возникающее при формировании узких электронных пучков вследствие отбора электронов, приводит к ограничению роста площади эмитирующей плазменной поверхности с повышением ускоряющего напряжения, что обеспечивает стабилизацию эмиссионного тока.

3. Предложенный двухсеточный метод стабилизации плазменной эмитирующей поверхности при получении пучков большого сечения позволяет расширить диапазон рабочих давлений ПИЭЛ в область больших значений за счет создания между плазмой и ускоряющим промежутком эквипотенци-

ального пространства двумя сетками эмиттерного электрода, что обеспечивает высокую эффективность и стабильность эмиссии электронов.

4. Разработанные и созданные конструкции ПИЭЛ формируют в стационарном и импульсном режимах пучки большого сечения и пучки сложной конфигурации с параметрами, обеспечивающими реализацию электронно-лучевых технологий термической модификации поверхностей различных материалов.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертационной работы отражает личный вклад соискателя в исследования, проводимые авторским коллективом. Постановка экспериментов, их проведение, анализ полученных результатов, выполнение расчетов проводились автором лично. Научный руководитель, профессор В.А. Груздев осуществлял общее руководство, определял цели, ставил задачи, принимал участие в обсуждении результатов. Компьютерное моделирование формирования плазмы в экспандере, исследование стабилизации эмитирующей поверхности и обсуждение результатов проведены совместно с В.Г. Залесским. Разработка и изготовление источников питания, проведение зондовых измерений осуществлялось совместно с инженером Д.А. Антоновичем. Анализ структуры и свойств поверхностей материалов, дюрометрические, микроструктурные исследования и обсуждение их результатов проведены совместно с А.С. Снарским.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на V Республиканской конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гродно, 23–25 апреля 2000 г.), III Международной конференции «Физика плазмы и плазменные технологии – ФППТ-3» (Минск, 18–22 сентября 2000 г.), IV Международной научно-технической конференции «Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов» (Гродно, 11–13 октября 2000 г.), Международной научно-технической конференции «Упрочнение, восстановление и ремонт на рубеже веков» (Новополоцк, 17–19 апреля 2001 г.), VI Республиканской конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Витебск, 17–19 октября 2001 г.), Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 4–7 февраля 2003 г.).

В 2002 г. решением комиссии по организации и проведению Республиканского конкурса на лучшее изобретение, полезную модель и рационализаторское предложение среди молодых новаторов Республики Беларусь присуждена третья премия в номинации «Лучшая полезная модель» (Постановление Президиума Республиканского совета ВОИР от 17.06.2002).

Опубликованность результатов. Основное содержание диссертации отражено в 11 научных работах, из них 2 статьи опубликованы в международных научных журналах, 1 в сборнике научных трудов, 5 в сборниках материалов конференций; также 2 работы опубликованы в сборниках тезисов

(рефератов) докладов и 1 в описании к патенту на полезную модель. Общее количество страниц опубликованных материалов – 46.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 194 страницы, в том числе 112 иллюстраций на 67 страницах, 4 таблицы на 3 страницах, приложения на 6 страницах. Список использованных источников на 12 страницах включает в себя 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований по выбранной теме, в виде аннотации изложено состояние вопроса, определены основные направления исследований.

В **первой главе** рассмотрены принципы построения плазменных источников электронов для получения пучков большого сечения. Проведен обзор возможностей реализации электронно-лучевого воздействия на большие площади расфокусированным пучком, сканирующим сфокусированным пучком, а также термокатодными пушками с дискретными (проволочными) катодами и цельным катодом большой площади. Отмечены достоинства и недостатки указанных способов формирования ПБС. Анализ литературных данных показал, что перспективной альтернативой термокатадам в электронных источниках с ПБС являются плазменные эмиттеры. Это подтверждается значительным количеством работ, посвященных теории и практике электронных источников такого типа, в частности публикациями Ю.Е. Крейнделя, В.А. Груздева, П.М. Щанина, Н.Г. Ремпе, А.А. Новикова и др. Отмечено, что исследование и разработка электродных структур для генерации *ионных* ПБС проводятся уже несколько десятков лет, что отражено в работах М.Д. Габовича, Е.М. Окса, А.П. Семенова, Г.Ю. Юшкова, Л.П. Вересова и др. Однако прямое использование таких структур для получения электронных ПБС затруднено, в связи с существенным различием процессов переключения ионного и электронного токов в газоразрядных структурах и систем ускорения ионов и электронов (работы А.В. Жаринова, Ю.А. Коваленко, Ю.Е. Крейнделя, С.П. Никулина, Н.В. Гаврилова).

Дан анализ типичных конструкций электронных источников с ПБС и акцентировано внимание на целях формирования плазмы в них. В частности представлены конструкции, описанные в работах М.А. Завьялова (термокатодные источники с ПБС, плазменные процессы в которых являются сопутствующими, а плазма формируется в результате ионизации остаточного газа электронами пучка), Г.А. Месяца, Д.И. Проскуровского, С.П. Бугаева (источники с поверхностным разрядом и взрывной эмиссией), А.А. Новикова (источники на основе высоковольтного тлеющего разряда), Ю.Е. Крейнделя,

В.А. Груздева, В.Я. Мартенса, Е.М. Окса, Н.Н. Коваля (источники с инициируемым разрядом в большом объеме и источники с полым катодом и расширителем плазмы).

Во втором разделе изложены технологические возможности ПИЭЛ с ПБС. Представлены характеристики электронно-лучевого воздействия, полученные в работах Н.Н. Рыкалина, И.В. Зуева, А.А. Углова, А.А. Шипко, И.Л. Поболя и др., необходимые для реализации заданных технологий и режимов обработки, а также электрофизические и технические параметры плазменных источников электронов разных типов. В соответствии с этими критериями ПИЭЛ сгруппированы по их технологическим возможностям.

Опыт промышленного применения источников электронов с плазменными эмиттерами для электронно-лучевой сварки в составе технологических электронно-лучевых энергокомплексов на предприятиях России обобщен в последних публикациях Н.Г. Ремпе, И.В. Осипова, С.И. Белюка и др. Анализ результатов, представленных в этих работах, показал, что для реализации большинства (до 70 %) промышленных электронно-лучевых технологий достаточно мощности электронного пучка 1,5–3 кВт.

В заключении главы отмечено, что эффективным способом построения ПИЭЛ для генерации электронных пучков большого сечения может быть 1) схема с расширением плотной плазмы, формируемой в газоразрядной структуре со скрещенными $E \times H$ полями, в экспандер и формированием в нем эмитирующей плазменной поверхности; 2) структура с объемным разрядом. Однако теоретически обоснованные критерии определения параметров расширителя плазмы не разработаны. В частности если диаметр расширителя выбирается близким к требуемому диаметру электронного пучка, то длина расширителя обычно ничем не обосновывается и выбирается экспериментально. В еще меньшей степени в опубликованных работах рассматривается вопрос о влиянии размеров расширителя на интенсивность ионизационных процессов в нем.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и конкретные задачи исследования.

Вторая глава содержит результаты исследований исходной газоразрядной структуры малого объема, построенной на ее основе структуры с экспандером, а также системы для формирования объемного разряда. Предложена качественная модель разряда с экспандером на основе газоразрядной системы малого объема с осцилляцией электронов в скрещенных $E \times H$ полях (рис. 1). Модель учитывает диффузию частиц из основного разряда, генерацию зарядов в объеме и эмиссию зарядов на электроды и в ускоряющий промежуток.

Теоретически исследовано формирование плазмы в экспандере при следующих допущениях: двойной электрический слой в апертуре основного разряда не образуется, объемной рекомбинацией зарядов пренебрегаем, дав-

ление газа и размеры экспандера таковы, что движение заряженных частиц можно рассматривать в диффузионно-дрейфовом приближении, плазма квазинейтральна ($n_e \approx n_i \approx n$) и распределение частиц по энергиям является максвелловским.

В силу цилиндрической симметрии рассматривалась одномерная задача и считалось, что в радиальном направлении концентрация заряженных частиц и потенциал плазмы постоянны.

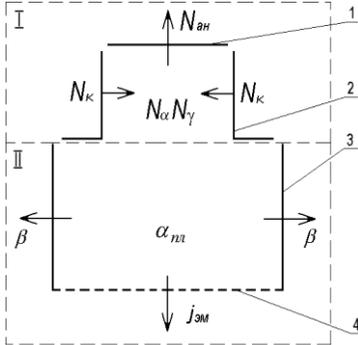


Рис. 1. Физическая модель разряда с экспандером:

1 – анод; 2 – катод; 3 – экспандер; 4 – эмиттерный электрод; N_α – число электронов, генерируемых плазменными электронами; N_γ – число электронов, генерируемых катодными γ -электронами; N_k – число электронов, эмитированных электродами; $N_{ам}$ – число электронов, уходящих на анод; $j_{эм}$ – плотность электронного тока эмиссии

Записана система, включающая уравнения непрерывности потоков электронов и ионов в диффузионно-дрейфовом приближении и уравнение баланса токов, найдено ее решение. Получено аналитическое выражение аксиального распределения плотности плазмы, формирующейся в газоразрядной структуре разряда с экспандером.

Экспериментально изучены характеристики разрядов и параметры плазмы в структуре с экспандером, представленной на рис. 2. (рабочий газ – воздух). Показано, что разряды в таких структурах являются приемлемыми для использования в эффективных ПИЭЛ с точки зрения затрачиваемой на формирование плазмы мощности.

На основе моделирования показано, что экспандер плазмы в ПИЭЛ с ПБС может переходить в активный режим при давлениях p больше некоторого критического $p_{кр}$. В диапазоне давления $p < p_{кр}$ плазма в экспандере формируется в основном только в результате диффузии из основной части разряда. При $p > p_{кр}$ преобладающий вклад в генерацию зарядов вносят объемные ионизационные процессы плазменными электронами, что ведет к увеличению концентрации заряженных частиц плазмы в экспандере. Получено оценочное выражение для критического давления, выражающее условие перехода экспандера в активный режим:

$$p_{кр} \approx \frac{2}{R\alpha_{нл0}} \sqrt{\frac{2T_e}{m_i}} \left[\frac{2}{5} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m_i}{\pi n_e}} \frac{\mu_{i0}}{\mu_{e0}} \right],$$

где R – радиус экспандера; $\alpha_{нл0}$ – число ионизаций плазменными электронами в единице объема экспандера в единицу времени, нормированное по

давлению; T_e – электронная температура; m_e , m_i – массы электрона и иона плазмообразующего газа; μ_{e0} , μ_{i0} – нормированные подвижности электронов и ионов.

Анализ результатов моделирования показал возможность формирования аксиального электрического поля в экспандере. Поскольку подвижность электронов значительно превышает подвижность ионов, формирующееся поле выполняет регулирующую функцию, возвращая компонент с большей подвижностью из экспандера в основную часть разряда. При повышенном давлении с увеличением объема экспандера, напряженность этого поля снижается, доля уходящих электронов уменьшается и таким образом увеличивается интенсивность ионизации плазменными электронами в объеме экспандера. Это может быть одним из механизмов, объясняющим повышение концентрации при прочих равных условиях в экспандере в активном режиме.

Установлено, что конструкция ПИЭЛ с экспандером обеспечивает высокую однородность распределения концентрации заряженных частиц по сечению экспандера, что, по-видимому, обусловлено более интенсивной диффузией зарядов из основного разряда в периферийные области экспандера. На рис. 3 показаны данные распределения в зависимости от длины экспандера L .

Показана возможность повышения давления газа в разряде в начальной стадии его развития за счет десорбции газа с охлаждаемых электродов разрядной системы и использования этого эффекта для значительного увеличения тока разряда в тлеющем режиме в течение коротких импульсов длительностью ~ 100 мкс (рис. 4).

Разработана конструкция газоразрядной системы с экспериментально оптимизированной конфигурацией электрического и магнитного полей, обеспечивающей формирование газового разряда в большом объеме с целью получения ПБС диаметром до 130 мм (рис. 5). Характеристики разряда и параметры плазмы свидетельствуют о достаточно высокой равномерности распределения концентрации по сечению (рис. 6).

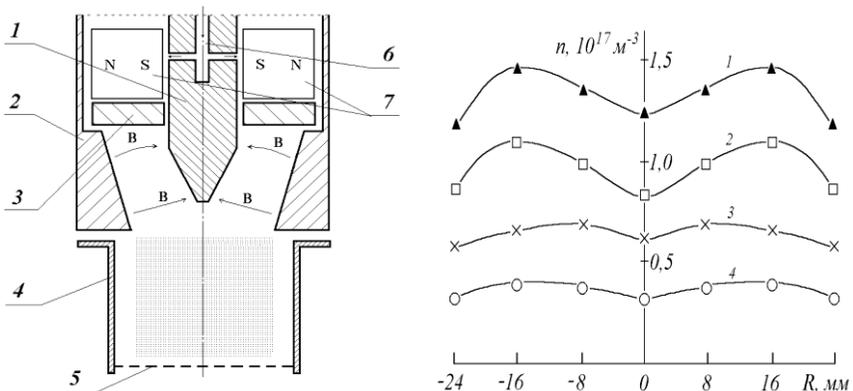


Рис. 2. Газоразрядная структура с экспандером в сечении:

- 1 – внутренний катод; 2 – внешний катод; 3 – анод; 4 – экспандер; 5 – эмиттерный электрод; 6 – отверстие для напуска газа; 7 – постоянные магниты

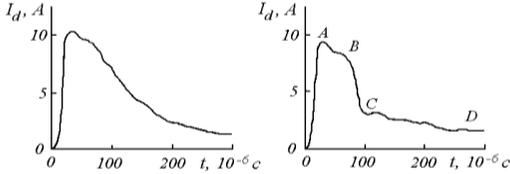


Рис. 3. Радиальное распределение концентрации заряженных частиц в торце экспандера:

- $I_d = 0,3$ А; 1 – $L = 0,02$ м;
2 – $L = 0,035$ м; 3 – $L = 0,05$ м;
4 – $L = 0,08$ м; $p = 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока при разных давлениях:

- а – $p = 10^{-2}$ мм рт.ст.;
б – $p = 10^{-3}$ мм рт.ст.

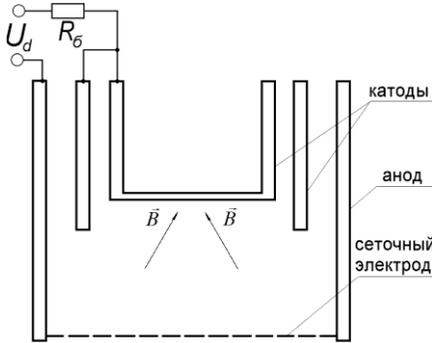


Рис. 5. Газоразрядная система большого объема в сечении

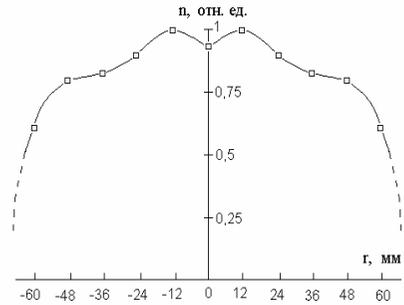


Рис. 6. Радиальное распределение концентрации заряженных частиц по сечению (у сеточного эмиттерного электрода)

Третья глава включает в себя исследования электронного тока из плазмы в ускоряющий промежуток и механизмов возмущения плазмы при отборе электронов. В частности на основе анализа механизмов переключения электронного тока из плазмы показано, что при значительной эффективности извлечения необходимо учитывать возмущение плазмы при отборе электронов. Теоретически исследованы физические процессы, обеспечивающие возмущение плазмы при отборе электронов, и влияние возмущения на условия отбора электронов.

Эксперименты по исследованию переключения электронного тока в структурах проводились при извлечении в эмиссионный канал малого диаметра для формирования узких пучков, а также в режиме односеточной и двухсеточной стабилизации для формирования ПБС.

Показано и экспериментально подтверждено, что возмущение плазмы при больших величинах эффективности извлечения оказывает положительное влияние на условия эмиссии электронов и стабилизирует эмиссионный ток из плазмы в эмиссионный канал малого диаметра.

Так, стабильность эмиссии с открытой плазменной границы при большой эффективности извлечения может быть достигнута за счет физических процессов в ПИЭЛ, в частности путем выбора условий, при которых ограничивается рост площади эмитирующей поверхности с увеличением извлекающего напряжения. Подтверждением ограничения величины эмиссионного тока при возмущении является также тот факт, что в этой области ускоряющих напряжений достигает насыщения эффективность извлечения α , причем при величинах $\alpha < 1$.

Для формирования плазменной поверхности большого сечения применен известный метод сеточной стабилизации. Повысить эффективность ПИЭЛ с сеточной стабилизацией можно снизив степень влияния процессов в ускоряющем промежутке на условия эмиссии, в частности за счет уменьшения коэффициента проницаемости сетки. С другой стороны геометрическая прозрачность сеточного электрода ξ должна быть максимальной, поскольку эмиссионный ток в отсутствие значительного возмущения плазмы не может превышать величину $I_e \approx \xi I_d$. Для повышения стабильности эмиссионных свойств ПИЭЛ с ПБС, предложен метод двухсеточной стабилизации. Суть метода заключается в создании между плазмой и ускоряющим промежутком эквипотенциального пространства двумя сетками эмиттерного электрода.

Установлено, что в таких ПИЭЛ с двухсеточной стабилизацией возможно использование сеточных эмиттерных электродов с высокой геометрической прозрачностью, что обеспечивает высокую эффективность эмиссии электронов, и позволяет повысить рабочее давление в ускоряющем промежутке за счет ограничения степени влияния поля ускоряющего электрода на эмитирующую плазму в условиях образования в ускоряющем промежутке вторичной плазмы (виртуального ускоряющего электрода). Рис. 7 иллюстрирует снижение степени возмущения эмитирующей плазмы отбором из нее электронов при двухсеточной стабилизации (рис. 7, кривая 3).

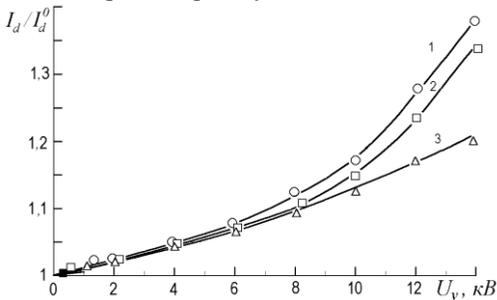


Рис. 7. Степень возмущения тока разряда от ускоряющего напряжения:

- 1 $-\xi = 0,64$; 2 $-\xi = 0,44$;
- 3 — двойная сетка $\xi = 0,64$;
- 1 $-p = 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.;
- 2, 3 $-p = 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

Четвертая глава посвящена созданию конструкций, проведению испытаний и использованию в различных областях источников электронов с пучками большого сечения диаметром до 50 мм (ПИЭЛ с экспандером, рис. 8) и до 130 мм (ПИЭЛ с объемным разрядом, рис. 9).

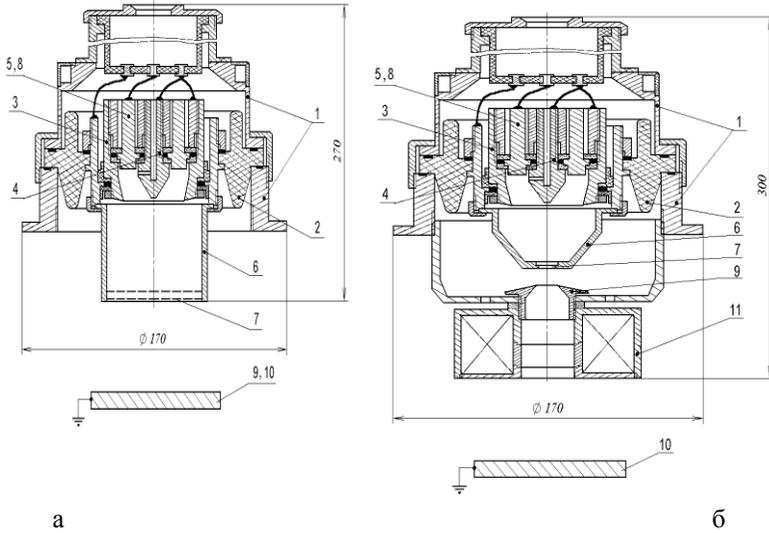


Рис. 8. Плазменный источник электронов с цилиндрическим экспандером (а) и с конусным экспандером (б) в разрезе:

1 – корпус; 2 – изолятор; 3 – внешний катод; 4 – внутренний катод; 5 – анод; 6 – экспандер; 7 – эмиттерный электрод; 8 – магниты; 9 – ускоряющий электрод (экстрактор); 10 – мишень; 11 – фокусирующая линза

Разработанные образцы ПИЭЛ обеспечивают генерацию электронных пучков с регулируемой плотностью мощности до 10^9 Вт/м². Неравномерность распределения эмиссионного тока по сечению не превышает 10 %. Рабочее давление источников повышено до $8 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Одна из конструкций защищена патентом Республики Беларусь на полезную модель.

Предложенный и реализованный в разработанных источниках метод получения электронных пучков с сечением, отличным от кругового, позволяет генерировать без существенных потерь мощности линейчатые, кольцевые, широкие и точечные пучки с заданной плотностью сечения и требуемой плотностью мощности, необходимой для реализации электронно-лучевых технологий.

Экспериментально исследованы рабочие характеристики источников электронов в стационарном и импульсном режимах. Проведены эксплуатационные испытания ПИЭЛ, которые показали возможность их использова-

ния для реализации электронно-лучевых технологий. Параметры, обеспечиваемые разработанными источниками позволяют считать, что они могут служить в качестве технологических ПИЭЛ при создании отечественных электронно-лучевых энергокомплексов.

Сравнение характеристик разработанных источников с параметрами, необходимыми для реализации различных методов поверхностного электронно-лучевого воздействия, показывает, что разработанный ПИЭЛ с экпандером позволяет осуществлять закалку из твердого и жидкого состояния, наплавку и поверхностное легирование, обработку материалов с предварительно нанесенными покрытиями, а при выполнении ряда условий обеспечить получение аморфного слоя.

ПИЭЛ с объемным разрядом может быть использован для оплавления в режиме рафинирования на небольшую глубину, в плазмохимии, микроэлектронике, для инициирования разряда в широкоапертурных ионных источниках а также в других технологиях, где требуется электронно-лучевое воздействие с относительно невысокой плотностью мощности и тока.

Особенностью работы ПИЭЛ при повышенных рабочих давлениях является образование вторичной плазмы в ускоряющем промежутке. Режим работы со значительным объемом вторичной плазмы можно считать полезным при электронно-лучевой обработке неплоских деталей, например зубьев шестерен, т.к. вторичная плазма обеспечивает эквипотенциальность пространства в области рельефа обрабатываемой детали и равномерную плотность мощности электронного пучка на рельефной детали. Кроме этого эффект формирования вторичной плазмы у поверхности обрабатываемой детали может эффективно использоваться в технологических процессах термической обработки детали, совмещенной с плазмохимическим воздействием, стимулированным электронным пучком.

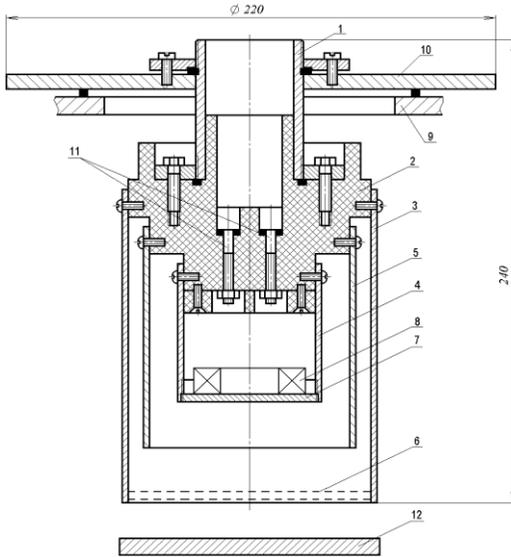


Рис. 9. Плазменный источник электронов в разрезе:

- 1 – корпус; 2 – изолятор;
- 3 – анод; 4 – первый катод;
- 5 – второй катод; 6 – эмиттерный электрод; 7 – крышка;
- 8 – магнит; 9 – крышка вакуумной камеры; 10 – крепежный фланец; 11 – винты;
- 12 – ускоряющий электрод

Проведены совместные с кафедрой технологии конструкционных материалов ПГУ эксплуатационные испытания ПИЭЛ по электронно-лучевой обработке покрытий системы Fe-B-C-W-Mo-Cr-V, полученных плазменной наплавкой на подложках из стали Ст3, стали 45ХН4МФА и предназначенных для упрочнения режущего инструмента.



а



б

Рис. 10. Внешний вид ПИЭЛ с экспандером (а), на основе объемного разряда (б)

Для обработки выбрана конструкция плазменного источника электронов с конусным экспандером (рис. 8 б), обеспечивающая требуемые плотности мощности при заданной площади воздействия и устойчивую работу при повышенных рабочих давлениях (до $0,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.), т.к. в этом случае имеет место интенсивное газоотделение, связанное с процессами рафинирования и дегазации расплава. Испытания упрочненного инструмента проведены при наружном продольном тчении стали 40X (твердость 180–200 НВ). Обработанные покрытия обладают высокой твердостью до 1000–1100 НВ, удовлетворительной сопротивляемостью хрупкому разрушению, износостойкостью при трении скольжения в 7–10 раз превышающей износостойкость данных материалов без электронно-лучевой обработки.

По договору о научно-техническом сотрудничестве между РУП «Минский тракторный завод» и УО «Полоцкий государственный университет» проведено поверхностное упрочнение деталей из стали 45 и стали 40X (исходная твердость 200...220 НВ). Образцы подвергнуты электронно-лучевому воздействию с параметрами: ширина воздействия – 10...12 мм, плотность мощности – $(1...5) \cdot 10^7$ Вт/м² (ускоряющее напряжение 16...20 кВ, ток пучка 40...80 мА), которые позволяли проводить закалку поверхностного слоя без оплавления и с оплавлением. Твердость поверхности после воздействия по ширине упрочненной зоны составляет 38...45 HRC₃ (350...430 НВ). МикродюрOMETрические и металлографические исследования образцов после упрочнения показали, что в результате воздействия на образцах сформированы приповерхностные слои при закалке из твердого состояния толщиной 250...300 мкм, микротвердостью 350...480 НВ; при закалке из жидкого состояния толщиной 700...750 мкм, микротвердостью 320...490 НВ. Проведенные работы свидетельствуют о перспективности применения электронно-лучевого воздействия с целью закалки поверхностей деталей тракторов, изготавливаемых на РУП «Минский тракторный завод».

Таким образом, эксплуатационные испытания ПИЭЛ показали возможность их использования для реализации электронно-лучевых технологий. Параметры, обеспечиваемые разработанными источниками и исследования по электронно-лучевому воздействию на материалы позволяют считать, что источники позволяют реализовать требуемые режимы электронно-лучевой обработки от закалки до плавления поверхностного слоя заданной толщины. Конструкции ПИЭЛ могут служить в качестве источников электронов при создании энергокомплексов для электронно-лучевой сварки и модификации поверхностей материалов в машино-, приборостроения и электронике. Применение разработанных источников позволит расширить использование электронно-лучевых упрочнительно-восстановительных технологий в промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и созданы конструкции плазменных источников на основе газоразрядных систем с осцилляцией электронов в скрещенных $E \times H$ полях, формирующие круговые пучки различной площади (от сфокусированных до диаметром 130 мм) и пучки с сечением, отличным от кругового (линейчатые, кольцевые и др.). Предложена структурная схема питания ПИЭЛ. Источники обеспечивают плотность мощности до 10^9 Вт/м² для точечных пучков сечением ~ 1 мм² и до 10^8 Вт/м² для пучков сечением 20 см² (в импульсном режиме), неравномерность распределения плотности эмиссионного тока по сечению $\Delta j_e/j_e \approx 10\%$, повышенную стабильность эмиссионных свойств при рабочих давлениях до $8 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст., управление током эмиссии за счет изменения разрядного тока, а также за счет подачи смещения на эмиттерный электрод. [1, 2, 3, 5, 9, 10].

2. Предложены, созданы и исследованы газоразрядные системы тлеющего разряда с осцилляцией электронов в скрещенных $E \times H$ полях на основе расширения плазмы в экспандер и на основе объемного разряда для получения эмитирующей плазменной поверхности большой площади [1, 2, 6, 7, 8].

3. Проведены комплексные (теоретические и экспериментальные) исследования разряда с экспандером. Методом численного моделирования установлены условия, обеспечивающие работу экспандера в активном режиме, когда основную роль в формировании плазмы играют плазменные электроны в сравнении с вкладом за счет диффузии частиц из основной части разряда. Предложен механизм, поясняющий рост концентрации заряженных частиц в экспандере в активном режиме при прочих равных условиях за счет формирования аксиального электрического поля. Реализована высокая однородность концентрации в экспандере за счет диффузии частиц из основного разряда преимущественно в периферийные области экспандера. Разряды обладают приемлемыми характеристиками с точки зрения мощности, затрачиваемой на формирование эмитирующей плазмы. [1, 4, 6].

4. Проведены экспериментальные исследования и теоретический анализ условий существования импульсного тлеющего разряда. Впервые показана возможность импульсного повышения давления газа в начальной стадии разряда в 8–10 раз за счет десорбции газа с электродов разрядной структуры и использования этого эффекта для значительного увеличения тока разряда в тлеющем режиме в течение импульсов длительностью ~ 100 мкс [1, 4, 6, 7].

5. Установлено, что возмущение плазмы при больших значениях эффективности извлечения положительно влияет на условия эмиссии электронов и стабилизирует эмиссионный ток из плазмы в эмиссионный канал малого диаметра. Стабильность эмиссии с открытой плазменной границы при большой эффективности извлечения может быть достигнута путем выбора условий, ограничивающих увеличение площади эмитирующей поверхности

с повышением извлекающего (ускоряющего) напряжения. При формировании пучков большого сечения увеличение рабочего давления ПИЭЛ с сохранением стабильности тока эмиссии достигается за счет использования двухсеточного метода стабилизации эмитирующей границы плазмы. Первая сетка ограничивает проникновение поля ускоряющего электрода в область присеточного слоя между плазмой и второй сеткой. Такое ограничение реализуется даже в случае возникновения вторичной плазмы – виртуального ускоряющего электрода, значительно повышающего напряженность ускоряющего поля [1, 2, 5, 9, 11].

6. Параметры разработанных источников электронов показывают возможность эффективного использования ПИЭЛ для реализации электронно-лучевых технологий модификации свойств поверхностей. Электронно-лучевая обработка наплавленных покрытий системы Fe-B-легирующие элементы повышает твердость до 1000–1100 НВ при удовлетворительной сопротивляемости хрупкому разрушению. Износостойкость при трении скольжения в 7–10 раз превышает износостойкость данных покрытий без электронно-лучевой обработки. Покрытия прошли апробацию для упрочнения режущего инструмента. Проведена электронно-лучевая поверхностная закалка из жидкого и твердого состояния деталей тракторов из стали 45 и стали 40 X. Сформированы приповерхностные слои толщиной до 0,7 мм и твердостью до 480 НВ. Результаты свидетельствуют о перспективности применения электронно-лучевого воздействия с целью упрочнения поверхностей деталей тракторов, изготавливаемых на РУП «Минский тракторный завод». Конструкции ПИЭЛ могут служить в качестве источников электронов при создании энергокомплексов для электронно-лучевой сварки и модификации поверхностей материалов в машино-, приборостроении и электронике. Применение разработанных источников позволит расширить использование перспективных электронно-лучевых технологий в промышленности [1, 2, 3, 5, 8, 10, 11].

Соискатель выражает благодарность В.Г. Залесскому за полезные консультации, поддержку и помощь, оказанные при выполнении данной работы.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:**

Статьи в научных журналах

1. Груздев В.А., Залесский В.Г., Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.
2. Груздев В.А., Залесский В.Г., Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Плазменные источники электронов – перспективные устройства для электронно-лучевых технологий // Мир технологий. – 2003. – № 1. – С. 45–54.

Статьи в сборниках научных трудов

3. Залесский В.Г., Антонович Д.А., Голубев Ю.П., Маняк А.Г. Плазменный электронно-ионный источник для термической модификации поверхностей материалов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 369–372.

Статьи в сборниках материалов конференций

4. Gruzdev V.A., Zaleski V.G., Antonovich D.A., Goloubev Yu. P. Plasma source of charged particles based on superdense pulse glow discharge // Proc. III Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, September 18–22, 2000. – Vol. I. – P. 60–63.
5. Груздев В.А., Залесский В.Г., Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Импульсный плазменный источник электронов // Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов: Материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф.: В 2 ч. Ч. II / Под ред. А.И. Свириденка, А.А. Михалевича. – Гродно: ГрГУ, 2001. – С. 19–25.
6. Голубев Ю.П., Антонович Д.А. Особенности импульсного разряда в плазменном источнике электронов с пучком большого сечения // V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь: Материалы науч. конф., 25–27 апр. 2000 г., Гродно. В 5 ч. Ч. 5. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 6–11.
7. Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Источник питания для иницируемого импульсного сильноточного газового разряда // V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь: Материалы науч. конф., 25–27 апр. 2000 г., г. Гродно. В 5 ч. Ч. 5. – Гродно: ГрГУ, 2000. – С. 74–77.
8. Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Система электропитания газоразрядной структуры плазменного источника электронов с пучком большого сечения // VI Республиканская научная конференция студентов и аспирантов

Беларуси: Тез. докл. науч. конф. В 2-х частях. Часть I / Ред. кол.: Г.И. Михасев (гл. ред.). – Витебск: Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2002. – С. 4–6.

Тезисы докладов на конференциях

9. Груздев В.А., Залесский В.Г., Антонович Д.А., Голубев Ю.П. Импульсный плазменный источник электронов // Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов: Тез. докл. IV-й Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 11–13 окт. 2000 г. – Гродно, 2000. – С. 54.
10. Голубев Ю.П., Залесский В.Г., Снарский А.С. Применение плазменного источника электронов для упрочняющей обработки поверхностей // Наука – образованию, производству, экономике: Рефераты докладов междунар. Науч.-тех. Конфер. В 2-х томах. Т. I / Под ред. Б.М. Хрусталева – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – С. 15.

Патенты

11. Патент ВУ 469 U, МПК Н 01J 3/04, выдан 8.11.2001. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / Груздев В.А., Залесский В.Г., Голубев Ю.П. // – № u20010194; Заявл. 31.07.2001; Оpubл. 30.03.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства РБ. – 2002. – № 1(32). – С. 221–222.

РЭЗІЮМЭ

ГОЛУБЕЎ Юрий Пятровіч

ПЛАЗМАВЫЯ КРЫНІЦЫ ЭЛЕКТРОНАЎ З ПУЧКАМІ ВЯЛІКАГА СЯЧЭННЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННА-ПРАМЯНЁВЫХ ТЭХНАЛОГІЙ

Ключавыя словы: электронна-прамянёвыя тэхналогіі, плазмовыя крыніцы электронаў, газавы разрад, экспандэр (расшыральнік) плазмы, эмісійныя характарыстыкі, двухсетачная стабілізацыя.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца электродныя структуры, у якіх узбуджаецца газавы разрад, плазма газавага разраду, электронны пучок вялікага сячэння. Прадмет даследавання – узаемасувязь характарыстык разрадаў, параметраў і эмісійных уласцівасцяў эмітуючай плазмы, умоваў пераключэння і паскарэння электронаў з газаразраднай плазмы і параметраў пучка вялікага сячэння.

Мэта работы – стварэнне плазмовых крыніц электронаў (ПКЭЛ) з высокай стабільнасцю эмісійных уласцівасцяў у шырокім дыяпазоне рабочых умоваў, якія забяспечваюць генерацыю электронных пучкоў вялікага сячэння з параметрамі, дастатковымі для рэалізацыі электронна-прамянёвых тэхналогій ў машына- і прыборабудаванні.

Прапанаваны электродныя структуры з расшырэннем шчыльнай плазмы ў экспандэр, а таксама схема на аснове разраду ў вялікім аб'ёме. Узнікненне і гаранне імпульснага тлеючага разраду ў даследаванай газаразраднай структуры можна растлумачыць з дапамогай сарбцыйных механізмаў паглынання і вылучэння газу з ахалоджаных электродаў.

Аналіз распрацаванай мадэлі працэсаў у экспандэры паказаў магчымасць яго пераходу ў актыўны рэжым пры ціску вышэй крытычнага. Атрыманы ацэначны выраз для крытычнага ціску.

Прапанавана двухсетачная сістэма стабілізацыі рэжыма адбору электронаў. Наяўнасць эквіпатэнцыйнай міжсетачнай прасторы абмяжоўвае пранікненне поля паскараючага электрода ў зону прысетачнага падзення патэнцыялу нават у выпадку ўзнікнення другой плазмы.

Распрацаваныя ПКЭЛ забяспечваюць генерацыю лінейных, кальцавых, шырокіх і кропкавых пучкоў зададзенай плошчы сячэння і шчыльнасцю магутнасці, дастатковай для рэалізацыі электронна-прамянёвых тэхналогій (10^6 – 10^9 Вт/м² у залежнасці ад рэжыму). Канструкцыі могуць выкарыстоўвацца ў тэхналагічных энергакомплексах для электронна-прамянёвай зваркі і апрацоўкі паверхняў пры павышаным рабочым ціску.

Распрацаваныя крыніцы выкарыстаны для апрацоўкі з мэтай ўмацавання загадзя нанесеных пакрыццяў. Здзейснена таксама ўмацаванне паверхняў дэталей, якія выпускаюцца на РУП «Мінскі трактарны завод».

РЕЗЮМЕ

ГОЛУБЕВ Юрий Петрович

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКАМИ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, плазменные источники электронов, газовый разряд, экспандер (расширитель) плазмы, эмиссионные характеристики, двухсеточная стабилизация.

Объектом исследования являются электродные структуры, в которых возбуждается газовый разряд, плазма газового разряда, электронный пучок большого сечения. Предмет исследования – взаимосвязь характеристик разрядов, параметров и эмиссионных свойств эмитирующей плазмы, условий переключения и ускорения электронов из газоразрядной плазмы и параметров пучка большого сечения.

Цель работы – создание плазменных источников электронов (ПИЭЛ) с высокой стабильностью эмиссионных свойств в широком диапазоне рабочих условий, обеспечивающих генерацию электронных пучков большого сечения с параметрами, достаточными для реализации электронно-лучевых технологий в машино- и приборостроении.

Предложены электродные структуры с расширением плотной плазмы в экспандер, а также схема на основе разряда в большом объеме. Возникновение и горение импульсного тлеющего разряда в исследованной газоразрядной структуре можно объяснить с помощью сорбционных механизмов поглощения и выделения газа с охлаждаемых электродов.

Анализ разработанной модели процессов в экспандере показал возможность его перехода в активный режим при давлении выше критического. Получено оценочное выражение для критического давления.

Предложена двухсеточная система стабилизации режима отбора электронов. Наличие эквипотенциального межсеточного пространства ограничивает проникновение поля ускоряющего электрода в область присеточного падения потенциала даже в случае возникновения вторичной плазмы.

Разработанные ПИЭЛ обеспечивают генерацию линейных, кольцевых, широких и точечных пучков с заданной площадью сечения и плотностью мощности, достаточной для реализации электронно-лучевых технологий (10^6 – 10^9 Вт/м² в зависимости от режима). Конструкции могут использоваться в составе технологических энергокомплексов для электронно-лучевой сварки и обработки поверхностей при повышенном рабочем давлении.

Разработанные источники использованы для упрочняющей обработки предварительно нанесенных покрытий. Осуществлено упрочнение поверхностей деталей, выпускаемых РУП «Минский тракторный завод».

SUMMARY

HOLUBEU Yury

PLASMA ELECTRON SOURCES WITH LARGE CROSS-SECTION BEAMS FOR ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES

Key words: electron-beam technologies, plasma electron sources, gas discharge, expander of plasma, emission characteristics, double-grid stabilization.

Object of current research is electrode structures which generate gas discharge, plasma of discharge, large cross-section electron beam. Subject of the research is discharge characteristics, emitting plasma parameters and emission properties, conditions of switch and acceleration of electrons from gas discharge plasma and parameters of large cross-section electron beam.

The aim of this work is to create plasma electron sources (PES) with high stability of emission structures in a wide diapason of working conditions. PES should maintain generation of large cross-section electron beams with parameters sufficient for realization of electron-beam technologies in mashine- and device-building.

Electrode structures with expansion of dense plasma into an expander have been suggested. Also a scheme based on high volume discharge has been put forward. Creation and burning of pulse glow discharge in gas discharge system can be explained by gas desorption from cooling surface of electrodes.

The analysis of developed model of processes in an expander demonstrated possibility of its transition into active regime when pressure is higher that critical. An approximate formula for critical pressure has been developed.

Double grid system for stabilization of electron selection regime have been suggested. Existence of equipotential intergrid space limits penetration of accelerating electrode field into the sheath of pre-grid potential drop even in case of creation of secondary plasma.

Developed PES maintain generation of linear, ring-shaped, wide and narrow cross-section beams with power density sufficient for realization of electron-beam technologies (10^6 – 10^9 W/m² depending of regime).

Constructions could be used within technological unit for electron beam welding and treatment of surfaces in elevated working gas pressure.

Developed sources have been used for hardening treatment of coatings. Hardening parts surfaces produced by Minsk tractor plant have been done.

ГОЛУБЕВ Юрий Петрович

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПУЧКАМИ БОЛЬШОГО
СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.05.2003. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100. Заказ

Отпечатано на ризографе УО «ПГУ»
211440, Новополоцк, ул. Блохина, 29