Министерство образования Республики Беларусь УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК <u>537.533; 621.384, 621.785</u> 2 ГР 20160830 от 08.04.16

> УТВЕРЖДАЮ Проректор по научной работе к.т.н., доцент _____ Д.О. Глухов "_20_"_декабря _2018 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОПЕРВЕАНСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ»

(заключительный)

задание 3.4.02 / ГБ 1416

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Материалы в технике»

Задание «Разработка комбинированных ресурсосберегающих технологий, в том числе аддитивных, изготовления и поверхностного модифицирования деталей машиностроения, наземного транспорта и сельскохозяйственной техники с использованием электронно-ионно-плазменной обработки»

Начальник ОСНИ		Т.В. Гончарова	
	« <u>20</u> » <u>декабря</u> 2018 г.		
Руководитель НИР,			
к.т.н., доцент	<u>«20» декабря</u> 2018 г.	Д.А. Антонович	
Ответственный исполнитель			
к.т.н., доцент	<u>«20» декабря</u> 2018 г.	Ю.П. І олубев	

Новополоцк 2018

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ				
Гуководитель работы, гавный научный сотрудник, к т.н., доцент	 <u>«20» декабря</u> 2018 г.	Антонович Д.А. (общее руко- водство, введение, раздел 1, за- ключение)		
тавный научный сотрудник, д.т.н., профессор	 <u>«20»</u> декабря 2018 г.	Груздев В.А. (введение, разде- лы 1, 2, заключение)		
Исполнители: Стветственный исполнитель, едущий научный сотрудник, .т.н., доцент	 <u>«20»</u> декабря 2018 г.	Голубев Ю.П. (раздел 1 – 3)		
Младший научный сотрудник	<u>«20»</u> декабря 2018 г.	Солдатенко П.Н. (разделы 2, 3)		
Младший научный сотрудник	<u>«20»</u> декабря 2018 г.	Абраменко С.Н. (раздел 3)		
Нормоконтролер	«20» декабря 2018 г.	Ищенко Л.В.		

РЕФЕРАТ

Отчет <u>66</u> с., <u>47</u> рис., <u>-</u> табл., <u>47</u> ист.

ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ПЛАЗМЕННЫЕ ЭМИТТЕРЫ, ЛЕКТРОННО- И ИОННОЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ^ТОТОКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ВЫСОКОПЕРВЕАНСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАРЯЖЕН-НЫХ ЧАСТИЦ

Объектом исследований являются потоки заряженных частиц, эмитированные из плазмы, эрмируемой в газоразрядных структурах, с параметрами, достаточными для реализации технологий модификации поверхностей и других родственных технологий.

Цель работы – разработка плазменных источников электронов, для реализации комбинирозанных ресурсосберегающих технологий электронно-ионно-плазменной обработки поверхностных поев, инженерии изделий и формирования композиционных покрытий на материалах для повышения их твёрдости, износо- и коррозионной стойкости, контактной выносливости и усталостной почности при изгибе.

В результате выполнения работы выявлены наиболее перспективные, отличные от традиционных, области применения плазменных источников заряженных частиц. Разработан и исслерован ряд конструкций плазменных электронно-ионных источников. Показана возможность их применения для разработки высокопервеансного источника заряженных частиц. Предложены способы повышения первеанса в плазменных электронно-ионных источниках. Предложен вариант построения системы электропитания для формирования коротких импульсов тока пучка.

Область применения: новые конструкции высокопервеансных источников с плазменным эмиттером позволят разработать на их основе комбинированные ресурсосберегающие технологии электронно-ионно-плазменной обработки поверхностных слоев, реализовать технологии модификации поверхности деталей машиностроения, а так же разработать и реализовать аддитивные технологии в области машино- и приборостроения.

Основные показатели: Создание новых конструкций высокопервеансных источников с плазменным эмиттером и разработка комбинированных ресурсосберегающих технологий электронно-ионно-плазменной обработки поверхностных слоев на их основе позволит снизить себесто-имость продукции за счёт сокращения длительности процесса ионно-плазменной обработки, снизить энергозатраты, а также повысить эксплуатационные характеристики изделий за счёт создания поверхностного покрытия с требуемыми свойствами.

Степень внедрения: результаты исследований планируется использовать для создания отечественных электронно-ионно-лучевых энергокомплексов различного технологического назначения и для разработки новой технологии модификации поверхностей различных материалов и сплавов. Полученные новые научные результаты используются при подготовке научных кадров в рамках магистратуры и аспирантуры.

содержание

Введение	5
1. Области, перспективные к применению высокопервеансных	
источников заряженных частиц	7
1.1 Высокоэнергетичные пучки заряженных частиц 8	8
1.2 Низкоэнергетичные пучки заряженных частиц	11
2. Плазменные источники для формирования пучков заряженных частиц	14
2.1 Плазменный источник для формирования высокоэнергетичных	
пучков заряженных частиц	14
2.2 Плазменный источник для формирования низкоэнергетичных	
пучков заряженных частиц	21
2.3 Общие принципы формирования пучков большого сечения в плазменных ис-	
точниках заряженных частиц 2	23
2.4 Макет источника электронов с повышенным первеансом	41
3. Формирование наносекундных импульсов тока пучка в плазменных эмиссионных	
системах на основе разряда в скрещенных Е×Н полях 4	44
3.1. Условия формирования эмитирующей плазмы в ПИЭЛ 4	44
3.2 Анализ существующих конструкций высоковольтных источников питания	
импульсного напряжения наносекундного диапазона	47
3.3 Разработка возможных вариантов электронной схемы 5	54
Заключение	61
Список использованных источников	63

введение

Развитие промышленности требует создания деталей с поверхностными слоями, обладаюг ими комплексом заданных свойств [1-11]. К наиболее распространенным методам поверхностной обработки применительно к конструкционным материалам можно отнести ионное модифицир эвание и электронно-лучевое воздействие [1-11]. Одним из путей существенного повышения эксв туатационных свойств поверхностей является использование комбинированных методов инженерии поверхности. При этом сложение двух видов обработки, как правило, обеспечивает появлеие новых эффектов, не принадлежащих каждому отдельному способу.

В промышленно развитых странах мира сегодня уделяется огромное внимание созданию г цитивных технологий и оборудования для их реализации. Что касается развития этого направления в Беларуси, можно упомянуть лишь об использовании небольшого количества устройств т ехмерной печати (принтеров, печатающих полимерными материалами), в основном по потребиельским параметрам близких к бытовой аппаратуре. Разработок по изготовлению металлических зделий с помощью аддитивных технологий в Беларуси чрезвычайно мало, в то время как область применения таких технологий стремительно расширяется.

При этом показана [1, 2, 10, 11] перспективность применения плазменных источников заряженных частиц для реализации комбинированных ресурсосберегающих технологий электронноионно-плазменной обработки поверхностных слоев, инженерии изделий и формирования композиционных покрытий на материалах с целью повышения их твёрдости, износо- и коррозионной стойкости, контактной выносливости и усталостной прочности при изгибе.

Современная теория и опыт применения плазменных источников ионных и электронных пучков показывают, что диодные структуры с плазменным эмиттерами зарядов автоматически обеспечивают повышенный первеанс при заданной плотности эмиссионного тока. Это обусловлено невозможностью формирования ленгмюровского минимума потенциала вблизи плазменного эмиттера вследствие возможности одновременной эмиссии из плазмы как электронов так и ионов. Эта возможность приводит к автоматическому перемещению каждого элемента поверхности эмитирующей плазмы до реализации условия нулевого градиента потенциала на всей поверхности. таким образом диод с плазменным эмиттером работает в режиме насыщения, когда ток эмиссии равен току анода диодного промежутка.

Дальнейшее повышение первеанса в диоде с плазменным эмиттером возможно за счет компенсации объемного заряда тока в диоде (электронном или ионном) зарядами другого типа во всем диодном промежутке. Такая ситуация реализуется, в частности, в возникающих при определенных условиях в плазме, двойных электрических слоях. Такие слои можно рассматривать как диоды с

плазменным эмиттером и плазменным анодом. Первеанс двойных электрических слоев можно читать максимальным для заданной плотности тока в слое (диода).

Существуют основания предполагать, что создание новых конструкций источников с плазменным эмиттером для реализации комбинированных ресурсосберегающих технологий электронно-ионно-плазменной обработки поверхностных слоев на их основе позволит снизить себестоимость продукции за счёт сокращения длительности процесса ионно-плазменной обработки, сниз ить энергозатраты, а также повысить эксплуатационные характеристики изделий за счёт создания поверхностного покрытия с требуемыми свойствами. Для решения этой задачи представляется срспективным разработка высокопервеансных источников низко- и высокоэнергетичных (в завичимости от области применения) пучков заряженных частиц. Поскольку анализ известных коно рукций плазменных источников заряженных частиц (электронов) и основных физических процессов в них показывает, что существует возможность модификации этих структур с целью создан ия более эффективных условий формирования плазмы и получения тока эмиссии, без существеного усложнения конструкции и изменения систем электропитания. Используя теорию электрогатических линз и известные принципы получения пучков большого сечения, например можно предложить систему формирования и ускорения электронных пучков, близкую по основным пап метрам к иммерсионным электростатическим линзам (источники первого типа) или газоразрядные структуры с двойными электрическими слоями (источники второго типа).

1. ОБЛАСТИ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ ВЫСОКОПЕРВЕАНСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Проведенный обзор литературных источников показал перспективность применения высокопервеансных источников заряженных частиц при разработке новых технологий в следующих бластях. Во-первых, это разработка ионной цементации и нитроцементации [2-4], которая обессечит контролированное формирование за время выдержки 2-3 ч диффузионного слоя толщиной 0-1,2 мм в случае цементации и 0,5-0,6 мм в случае нитроцементации с заданной твёрдостью RC 50-64 в зависимости от марки стали, а за время 12-15 ч формирование глубоких (более 3,5 мм) слоев. Благодаря преимуществам ионной цементации и нитроцементации перед традиционн ими технологиями детали после минимальных операций механической доводки готовы к эксплуатации.

Вместе с тем, дополнительно нанеся на поверхность детали с поверхностным слоем высогой твердости высоко- и сверхтвердые покрытия с микротвердостью от 20 до 85 ГПа толщиной от с этен нанометров до нескольких микрометров (что особенно актуально для режущего инструмента), можно обеспечить чрезвычайно низкий коэффициент трения (0,1 и ниже) и повышенную износостойкость изделий. Возможно осаждение многослойных многокомпонентных композиций, в апример, состоящих из чередующихся слоев нитридов, карбидов, оксидов, оксикарбонитридов и др. Такое комбинированное упрочнение придает изделиям (преимущественное применение – инструмент) необходимую конструкционную прочность, позволяет создавать на рабочей поверхности детали слои, обладающие высокой твердостью, износостойкостью, контактной выносливостью и усталостной прочностью при изгибе, низким коэффициентом трения. Указанные методы инженерии поверхности являются финишными.

Во-вторых, для изготовления некоторых типов деталей перспективным является использование плазменных покрытий с последующей их обработкой электронным лучом. В результате такой обработки происходят изменения в структуре покрытия и основы, значительно увеличивается адгезия, одновременно повышаются твердость и износостойкость. Наличие вакуума позволяет создавать покрытия из активных металлов и их сплавов (титан, цирконий и др.), а требуемый технологический ресурс электронного источника обеспечивается использованием плазменных эмиссионных систем.

В-третьих перспективным является также газодинамический метод нанесения покрытий с последующей ионно-плазменной обработкой с целью формирования многокомпонентных многослойных покрытий с заданными свойствами. Газодинамический метод заключается в обработке поверхности основы потоком сжатого воздуха с инжектированным в него напыляемым порошковым материалом (Al, Ti, Ni, Al-Ti, Ni-Ti с размером частиц от 20 до 200 мкм). За счет высоких ско-

ростей соударения (от 300 до 800 м/с) и, соответственно, деформации, материал порошка приобрезет повышенную пластичность, что позволяет частицам привариваться к основе, формируя качес венное покрытие без дополнительного подогрева воздуха и основы. Ионно-плазменная обработк таких покрытий позволит получать в поверхностном слое нитриды Al, Ti и др. материалов, что значительно повысит износо- и коррозионную стойкость деталей.

Полученные многокомпонентные и многослойные керамические покрытия могут быть исользованы в машиностроительной промышленности на инструментах (из быстрорежущих сталей, - зердосплавных и керамических), клапанах, эксцентриках, втулках и т.д. При этом очевидно, что - уименяемая технология определяет параметры необходимых пучков заряженных частиц.

1.1 Высокоэнергетичные пучки заряженных частиц

Существует большое количество вариантов изделий, для которых не обязательно получечие «кинжальных» швов, как при классической электронно-лучевой сварке, однако при этом треб лется очень высокое качество формируемых электронных пучков. Речь идет об изделиях с высоким качеством и надежностью сварных соединений, а также деталях из высокочистых и высокоактивных металлов. Данные направления требуют применения выкоэнергетичных пучков заряженных частиц. Ниже приведены некоторые возможные направления.

1.1.1 Электронно-лучевой переплав высокоактивных металлов

Одна из традиционных электронно-лучевых технологий - переплав высокоактивных металлов, который необходимо проводить в вакууме. При этом коэффициент использования мощности луча достигает 90 % [1-6]. При выполнении переплава металлов и сплавов удаляемые из них загрязнения и металлические пары попадают в электронно-лучевую пушку, в случае использования накаливаемых катодов они достаточно быстро выходят из строя. Практика показала, что металлургические процессы, связанные с интенсивным испарением, целесообразно проводить пушками с плазменным источником электронов.

Из технологических отходов высокоактивных металлов (циркония, титана, ниобия и др.) переплавом можно получать однородные по структуре отливки, которые пригодны для повторного использования, например в качестве катодов-мишеней. В качестве материала для электронно-лучевого переплава используется стружка циркония (T_{nn} =1855 °C) и титана (T_{nn} =1668 °C). Отработаны методы изготовления электронно-лучевой плавкой новых и регенерации изношенных катодов – мишеней для магнетронных и дуговых систем вакуумного распыления из чистых Ti, Zr, Hf, сплавов Ti и Zr с Cr, Al, B, Mo и др., в т.ч. из лома и стружки [2]. Катоды - мишени используются для получения методом конденсации с ионной бомбардировкой новых высокоэффективных покрытий.

1.1.2 Обращение с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ)

Анализ доступных данных по конструкциям стеллажей для мокрого и контейнеров для суу эго пристанционного хранения ОЯТ говорит о том, что для этих целей используют длинномери ые трубы из нержавеющих сталей толщиной 4,5-5,0 мм с высоким содержанием бора. Трубы изготавливают с помощью электронно-лучевой или лазерной сварки. Использование стеллажей с у потненным шагом расположения труб позволяет разместить и безопасно хранить в бассейнах з начительное количество ОЯТ [12].

Получены неразъемные соединения из нержавеющих высокобористых сталей аустенитного ферритного классов, используемых для изготовления труб контейнеров для мокрого или сухого гранения ОЯТ. 04Х14Т3Р1Ф-Ш (ЧС-82).

Отработан метод сварки изделий из высокобористых сталей аустенитного и ферритного классов толщиной 4,2 и 6 мм (рисунок 1) путем варьирования тока сварки [4, 12]. Полученные зав исимости представлены на рисунке 2.



8 7 6 5 4 3 2 1 0 25 30 35 45 Ic, MA • Глубина проплавления — • Ширина шва

Рисунок 1 – Образцы из стали, сваренные ЭЛС

Рисунок 2 – Зависимость глубины проплавления h и ширины сварного шва b для высокобористой аустенитной стали

На рисунке 3 приведена структура высокобористой аустенитной стали – основной металл (рисунок 3, а) и сварной шов (рисунок 3, б). Сварной шов состоит из аустенитных дендридов и боридной эвтектики в междендридном пространстве (рисунок 3, б). Оси дендридов имеют тенденцию интенсивного роста в направлении передачи тепла, т.е. перпендикулярно зоне расплава (рисунок 3, б). Зона термического влияния (ЗТВ) относительно небольшая (50 - 160 мкм). Наблюдается увеличение зерен аустенита и боридных частиц в ЗТВ из-за теплового воздействия при сварке. Полное растворение боридов имеет место в зоне расплава и вблизи ЗТВ. Степень растворения зависит от расстояния до зоны расплава и размера частицы. Частичное растворенные бориды окружены эвтектикой (рисунок 3, б).



Рисунок 3 – Высокобористая аустенитная сталь: а – основной металл; б – сварной шов

1.1.3 Создание сверхпроводящих высокочастотных резонаторов

Ведутся работы по созданию сверхпроводящих высокочастотных СВЧ ниобиевых 1,3 ГГц _P зонаторов методом электронно-лучевой сварки (рисунок 4, а). СВЧ резонаторы из особочистого лиобия для ускорителей заряженных частиц могут изготавливаться только с применением ЭЛС. Процесс ЭЛС обеспечивает сохранение исходной высокой чистоты металла сварного соединения ^г :], а также требуемую геометрию сварных соединений: полное проплавление с шириной шва *e*₁ и *e*₂ не менее 4 мм (рисунок 4, б).





б)

a)

1 – основной металл; 2 сварной шов

Рисунок 4 – 1,3 ГГц одноячеечный СВЧ ниобиевый резонатор (a) и изучаемая геометрия сварного шва (б);

Технология изготовления СВЧ резонаторов, используемая для наиболее масштабных строщихся и проектируемых в настоящее время ускорителей заряженных частиц, включает штампову полуячеек резонатора, их сварку между собой, а также с другими элементами конструкции [2, 4]. Наиболее ответственной операцией является сварка двух полуячеек по экватору. При получении сварных соединений СВЧ резонаторов высокие требования предъявляются к геометрии сварных швов и химической чистоте металла соединений, которая должна быть не хуже, чем у исходь эго ниобия. Последнее является залогом сохранения сверхпроводящих свойств особочистого ниобия и достигается путем травления свариваемых кромок перед сваркой в смеси кислот, соблюделем чистоты при хранении и транспортировании деталей перед сваркой. Получение требуемой геометрии сварных швов при сварке компонентов СВЧ ниобиевых резонаторов является непрос ой задачей и требует детального изучения взаимосвязей между параметрами режима ЭЛС и характеристиками сварных швов. Однако имеются публикации, свидетельствующие о получении д фектов при сварке экватора полуячеек, в том числе и при серийном изготовлении резонаторов с спользованием отработанных режимов сварки [3-6].

1.2 Низкоэнергетичные пучки заряженных частиц

Наряду с традиционными областями применения электронно-лучевых технологий в связи с расширением области применения плазмохимических технологий, таких как электронно-лучевое диспергирование, электронно-лучевое распыление диэлектрических материалов, литография и нанесение многослойных покрытий, усилился интерес к получению низкоэнергетичных пучков заряженных частиц с энергией до 5 кэВ. Новым и перспективным направлением представляется и электронно-лучевое ассистирование ионного воздействия, которое может быть реализовано с использованием плазменных источников электронов, поскольку плазма может эмитировать как электроны, так и ионы. Далее представлен ряд возможных областей применения таких пучков

1.2.1 Получение неразъемных соединений пайкой

Электронно-лучевой пайкой изготовлены соединения из кубического нитрида бора (КНБ) с твердыми сплавами, примененными для изготовления лезвийного инструмента.

Для качественной лезвийной обработки высокотвердых материалов вместо шлифования может успешно применяться лезвийная обработка инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ), полученным методом пайки. Выполнены исследования по проведению электроннолучевой пайки КНБ и поликристаллического алмаза (ПКА) и использованию такого инструмента.

Основным условием получения соединения керамики (СТМ) с металлом является смачивание материалов сплавом, для чего в его состав должен быть введен адгезионно-активный элемент,

например Ті. Пайка с нагревом лучом небольшой интенсивности дает возможность применения с дгезионно-активных припоев на основе Си и Ag при содержании до 5 мас. % Ті, обеспечивающих с лачивание соединяемых материалов, снижает опасность графитизации СТМ и обеспечивает его г ысокопрочное соединение с основой. В случае соединения «КНБ – припой Ag-Cu-In-Ti – твердый счлав ВК8» происходит взаимная диффузия элементов, входящих в состав КНБ, припоя и основы, в результате чего в КНБ формируется переходной слой толщиной от 4-6 до 10-14 мкм, состоящий и з соединений TiN, TiB₂, Ti₃B₄, Ti₂B₅.

Разработаны новые конструкции инструмента (рисунок 5), оснащенного КНБ и ПКА, с полшенной прочностью удержания СТМ, что существенно улучшает производительность и качество обработки деталей [10]. Это обусловлено высокой скоростью резания, сокращением времени на пег зналадку оборудования и возможностью получения низкой шероховатости поверхности. По сравнению с твердосплавным инструментом стойкость инструмента из ПКА больше до 50 раз (при точен ли сплава АЛ25). Изделия после лезвийной обработки инструментами, оснащенными СТМ, имеют . тероховатость поверхности до 0,05 - 0,63 мкм, сравнимую с поверхностью после шлифовки.



Рисунок 5 – Некоторые типы изготавливаемых инструментов, оснащенных ПКА и КНБ

1.2.2 Электронно-лучевое ассистирование ионного воздействия

Применение электронно-лучевого нагрева в процессах нанесения покрытий позволяет получать бездефектные слои с более высокими пластическими характеристиками, чем при методах наплавки на воздухе. Это обусловлено рафинирующим действием высокого вакуума.

Электронно-лучевой нагрев позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства деталей с плазменными, газопламенными, электродуговыми покрытиями. В результате электронно-лучевого нагрева в покрытии и основе происходят структурные и фазовые превращения, ведущие к значительному увеличению адгезии и одновременному возрастанию твердости и износостойкости. Последовательное использование различных методов для формирования требуемой структуры поверхностного слоя металла получило название инженерия поверхности второго поколения [4, 13-16]. Электронно-лучевая обработка может обеспечить оплавление только покрытия, расплавлеи че только слоя у поверхности основы, а также оплавление и покрытия и основы. Первый вариант и элесообразен, когда предварительно нанесенное покрытие имеет достаточно хорошую адгезию к с нове, а оплавление проводится для устранения пористости. Второй вариант позволяет улучшить нчзкую адгезию нанесенного покрытия к основе, а само покрытие обладает приемлемой для экси туатации пористостью и необходимыми физико-механическими характеристиками. Третий вариант применяется, когда покрытие должно иметь близкую к 100% плотность и максимально возможную адгезию к основе. Для реализации оптимальных вариантов обработки требуется тонкая егулировка параметров нагрева – плотности энергии и времени воздействия.

Методы инженерии поверхности второго поколения связаны с изменением химического соа ава материала – электронно-лучевой наплавкой на основу износо-, коррозионностойкого и/или ачтифрикционного материала, нанесением покрытий, позволяющих значительно повысить эксп туатационные характеристики изделий. Применение комбинированного электронно-лучевого оздействия обеспечивает получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые евозможно получить с применением традиционных методов упрочнения. Проведены исследования по теоретическому и экспериментальному моделированию методов нанесения многофункциоильных слоев на основу из сталей и титановых сплавов, изучению структурно-фазовых преврацений в них. Используются различные методы предварительного осаждения традиционных покрытий, в исходном состоянии им присущи высокая пористость, малые прочность самого слоя, его адгезия к основе и износостойкость. Электронно-лучевая обработка таких покрытий приводит к благоприятным структурным и фазовым превращениям в покрытии и в основе, изменениям в свойствах осажденных слоев, релаксационным процессам в дефектном материале покрытия, формированию переходной диффузионной зоны. При оплавлении покрытия материал перекристаллизуется, устраняются поры, дефекты структуры, уменьшается шероховатость, происходит «скругление» выступающих микронеровностей. В результате повышается прочность сцепления и плотность покрытий, что обусловливает увеличение износо-, жаростойкости и других характеристик.

Электронно-лучевая обработка предварительно нанесенных на титановые сплавы плазменных покрытий TiO₂ и Ni-Ti, электролитических Cr и Ni, детонационных WC-Ni и WC-Co приводит к образованию между основой и покрытием диффузионной зоны, повышению твердости, адгезионной прочности до 210 - 220 МПа, предела выносливости, износостойкости поверхностных слоев по сравнению как со сплавами без покрытий, так и со слоями без электронно-лучевой обработки.

Электронно-лучевой нагрев сталей, предварительно подвергнутых ХТО, существенно повышает твердость и увеличивает толщину упрочненного слоя в 1,5-2,5 раза. Выполняется комплекс работ по разработке технологий и созданию оборудования ионного азотирования (ИА) в тлеющем разряде [3-7]. Твердость поверхности стали 40Х после ИПА с ЭЛ нагревом повышается с

4,5 до 8-6,5 ГПа (рисунок 6). Комбинированная технология упрочнения (ИПА совместно с элекэонно-лучевой закалкой) может обеспечить значительное повышение износостойкости.



Рисунок 6 – Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя стали 40Х: –после ИА, 2 – после электронно-лучевой закалки, 3 – после ИА и электронно-лучевой закалки

Таким образом, применение комбинированных методов ЭЛ упрочнения обеспечивает создание композиционных материалов с градиентом свойств по сечению от поверхности к основе. Достигаемое значительное повышение эксплуатационных характеристик изделий немонотонно зависит от интенсивности потоков электронов. Это позволяет предположить, что в некоторых областях параметров луча в композиционных материалах формируются специфические упорядоченные системы - диссипативные структуры. Результаты применения таких вариантов целесообразно связывать с синергетическими эффектами различных механизмов упрочнения.

2. ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

2.1 Плазменный источник для формирования высокоэнергетичных пучков заряженных частиц

На рисунке 7 приведена конструкция (а) и электродная структура (б) плазменного источника э ектронов [14] в котором реализованы принципы формирования эмиссионного тока за счёт создания условий переключения без осевой неоднородности плазмы с ограничением эффективности извлечеля как в более известных источниках электронов на основе полого катода [3, 4, 7, 8, 11, 15].





а – 1 – генератор плазмы; 2 – магнитная линза; 3 – корпус
б – 1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод;
5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод; *U*_d – напряжение горения разряда; *U*_{ac} – ускоряющее напряжение; *R*_b – балластное сопротивление; *B* – индукция магнитного поля
Рисунок 7 – Плазменный источник электронов: а – конструкция;
б – электродная структура

Разряд возбуждается в пространстве между катодами 1 и 2 (а) (область *I*, рисунок 1, б). Плазмообразующий газ подаётся в пространство между катодами, а перепад давлений, обеспечивается геометрией эмиссионного канала. Формирующаяся в разряде между катодами плазма диффундирует в область эмиссионного канала. Этому способствует дополнительные электроды 3 и 4 (с анодным или промежуточным потенциалом [14]), которые выполняют роль эмиттерного элек-

трода (см. рисунок 7). Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал в эмитэрном электроде с анодным (или близким к нему) потенциалом. Присутствие магнитного поля г рактически во всем объёме разрядной структуры способствует эффективной ионизации газа. В т кой электродной структуре исключается стадия инициирования разряда, что отражается на форме вольтамперных характеристик газоразрядной структуры (рисунок 8).



напуск газа, мПа·м³/с: 1 – 2,8; 2, 4 – 1,7; 3 – 1,25 Рисунок 8 – Вольтамперные характеристики газоразрядной структуры источника электронов

В области эмиссионного канала (область *II*, рисунок 7, б) магнитное поле имеет продольное оси канала направление индукции и не препятствует эмиссии электронов. Движение электронов в область *II* из области *I* осуществляется в слабом магнитном поле с поперечной компонентой вектора индукции, что в определённой мере ограничивает движение электронов в область эмиссионного канала (замагничивая только электроны) и затрудняет переключение электронного тока из плазмы в эмиссионный канал.

При возбуждении разряда эмиттерный электрод выполняет роль вспомогательного анода, и значение его потенциала не так критично для формирования газоразрядной плазмы, как потенциал эмиттерного электрода в разряде с полым катодом [14].

Экспериментальные результаты позволили сформулировать следующие способы управления эффективностью извлечения и стабильности эмиссионного тока в плазменном эмиттере данного типа, которые не реализуемы в плазменных источниках электронов на основе полого катода. Первый способ заключается в создании условий для перераспределения токов между эмиттерным электродом и эмиссионным каналом за счёт изменения параметров слоя пространственного заряда вблизи эмиттерного электрода. Это может быть обеспечено как автоматическим смещением потенциала эмиттерного электрода сопротивлением смещения (R_{cm}) в цепи соответствующего электрода, так и за счёт использования вставок в эмиттерный электрод в области эмиссионного канала

под плавающим потенциалом. Второй способ реализуется за счёт создания в эмитирующей плазме пектрических полей, обеспечивающих формирование потоков электронов в область эмиссионного канала. Интенсивность таких потоков определяется конфигурацией магнитного и электрического полей (смещением потенциала анода относительно эмиттерного электрода) в газоразрядной структуре и давлением газа (величиной напуска газа в разрядную камеру).

На рисунке 9 представлены типичные характеристики данного источника. К основному дос оинству данного источника можно отнести слабую зависимость эмиссионного тока от давления вплоть до 0,3 Па, (рисунок 9, в). Эта особенность реализуется как за счёт особой конфигурации вектродов разрядной камеры, так и вследствие дополнительной автостабилизации параметров электронного пучка включением сопротивления R в цепь эмиттерного электрода относительно анот. На рисунке 9, г, представлены также распределения плотности тока и плотности мощности электронного пучка по сечению. Анализ распределений показывает, что максимальное значения плотнос и мощности $q_{max} \approx 10^9$ Вт/м² и эффективный диаметр электронного пучка (который определяется на) ровне 0,1 q_{max}) соответствует типичным значениям плотности мощности электронных пучков, присняемых для электронно-лучевой сварки [3, 4, 8, 11]. Это, а также вид газовой характеристики свидетельствуют о возможности применения данного источника для сварки, в том числе и материалов с г рышенным газоотделением в процессе термообработки.



а – эмиссионная характеристика: ускоряющее напряжение 18 кВ; напуск газа 1,5 мПа·м³/с; давление, Па: 1, 2 – 0,04; 3 – 0,1; R_{cm} , кОм: 1 – 0; 2, 3 – 1; б – вольтамперная характеристика: напуск газа 1,5 мПа·м³/с; ток разряда 0,2 A; давление газа, Па: 1 – 0,04; 2 – 0,1; в – газовая характеристика: ускоряющее напряжение 16 кВ; напуск газа 1,5 мПа·м³/с; R_{cm} , кОм: 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1; г- распределение плотности тока и плотности мощности по сечению пучка: ускоряющее напряжение 18 кВ; напуск газа 1,5 мПа·м³/с; ток разряда 0,2 A; ток эмиссии 0,08 A; R_{cm} , кОм: 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0

Рисунок 9 – Основные характеристики плазменного источника электронов (а – г) и фото пучка в процессе сварки различных материалов (д, е)

В качестве системы электропитания разряда такого источника применялась представленная н иже система электропитания. Структурная схема которой приведена на рисунке 10.



 микроконтроллер; 2 – тиристорный регулятор; 3 – повышающий разделительный трансформатор; 4 – выпрямитель; 5 – емкостной фильтр; 6 – датчик тока

Рисунок 10 – Структурная схема блока электропитания разряда

Главным элементом данной системы является микроконтроллер (1). Микроконтроллер контролирует все процессы, от включения/выключения питания до точной подстройки тока разряда электронно-лучевой пушки. Микроконтроллер определяет два режима работы: ручной и автоматический. Так в ручном режиме оператор будет регулировать ток разряда вручную, регулируя напряжение на тиристорном регуляторе. Автоматический режим будет включать в себя два возможных режима: со стабилизацией (по току разряда или по току пучка) и без. В режиме без стабилизации оператор выставляет необходимое значение тока разряда вручную. В режиме со стабилизацией по току разряда микроконтроллер принимает заданным значением тока разряда действующее, после чего начинает следить за каждым его отклонением в режиме стабилизации, то есть увеличивает напряжение разряда, если ток упал ниже заданного и уменьшает, если ток превышает заданное значение. В режиме со стабилизацией по току пучка микроконтроллер так же принимает действующее значения тока и запоминает его заданным, после чего начинает выравнивать ток пучка увеличивая напряжение разряда от нуля до необходимого значения, при котором действующее значение тока достигнет заданного. После достижения этого значения микроконтроллер фиксирует напряжение разряда и поддерживает его до тех пор, пока не будет изменен режим работы или отключено питание

Тиристорный регулятор (2) использован в качестве ключа управления для повышающего эансформатора. Тиристорный регулятор будет должен формировать выходное напряжение во г сем диапазоне от 0 до 220 В. Трансформатор напряжения повышающий разделительный (3) выголняет сразу две функции: он повышает напряжение с 220 до 1000 В и служит гальванической развязкой между низковольтной и высоковольтной частями установки. Диодный мостовой выпрям итель (4) используется для выпрямления переменного питания. Емкостной фильтр (5) служит для с лаживания пульсаций на выходе трансформатора. Для реализации стабилизации используется датчик тока (6). Возможная функциональная схема электропитания приведена на рисунке 11.



А1 – элемент управления; А2 – формирователь сигнала обратной связи; А3 – электронно-лучевая пушка; А4 – высоковольтный блок; С1 – фильтр; R1 – датчик тока пучка; Т1 – трансформатор силовой, разделительный; Т2 – трансформатор обратной связи тока пучка; U1 – транзисторный регулятор переменного напряжения; U2 – выпрямитель

Рисунок 11 – Функциональная схема организации электропитания разряда, и ускоряющего напряжения

Управление схемы осуществляется микроконтроллером, выдающим со встроенного ЦАП управляющее напряжение от 0 до 10В на регулятор. В соответствии с уровнем входного управляющего сигнала регулятор будет выдавать пропорциональное значение переменного питания (от 0 до 220В). Регулятор управляет высоковольтной частью электронно-лучевой пушки. В качестве выпрямителя возможно применение стандартной мостовой схемы. Для реализации отрицательной обратной связи служит датчик тока, который измеряет действующий ток по генерируемому магнитному полю. Данный сигнал поступает на АЦП микроконтроллера, где и осуществляется управляется управляется истемой.

2.2 Плазменный источник для формирования низкоэнергетичных пучков эряженных частиц

Ранее проведенный траекторный анализ на основе численного моделирования системы сервичного формирования электронного пучка диаметром 15 – 25 мм на базе пакета прикладных рограмм ELIS [16, 17], для конструкции, описанной в [18-21] позволил сформулировать основные чоложения, позволяющие оптимизировать структуры для повышения их первеанса.

1. При минимальной приведенной напряженности поля в промежутке ускорения 1 кВ/мм и с реднем значении диаметра электрода-расширителя 20 мм плотность электронного тока в пучке несмотря на приемлемое токопрохождение через выходную апертуру недостаточна для достижен и приемлемой для реализации большинства технологий плотности тока в $j = 0.6 \cdot 10^3 \text{A/m}^2$.

2. Уменьшение длины полости в два раза для формирования эмитирующей поверхности с рлее высокой электронной концентрацией (плотность тока эмиссии $j = 2 \cdot 10^3 \text{ A/m}^2$) приводит к худшению токопрохождения через выходную апертуру и осаждению части тока пучка на усконющий электрод. Поэтому для формирования эмитирующей поверхности с более высокой концентрацией при фиксированном значении ускоряющего напряжения (до 5 кВ) приведенная напряи енность поля в ускоряющем промежутке должна быть увеличена до 2,5 кВ/мм, расстояние между элиттерным и ускоряющим электродами, должно быть при этом около 2 мм. При таких параметрах электронно-оптической системы (ЭОС) характеристики пучка (плотность тока $j=3\cdot10^3\text{ A/m}^2$, плотность мощности $1,5\cdot10^7\text{Bt/m}^2$) и токопрохождение приемлемы для достижения приемлемой для реализации большинства технологий плотности тока в $j = 0,6\cdot10^3\text{ A/m}^2$.

Численный анализ ЭОС, формирующей низковольтные пучки большого сечения, позволяет оптимизировать систему первичного формирования электронного пучка с целью генерации пучков с требуемой плотностью тока и мощности и приемлемым токопрохождением через выходную апертуру источника. Результаты численных расчетов позволили определить условия (геометрию ЭОС, электронную концентрацию плазмы), необходимые для формирования пучков с заданными свойствами (плотностью тока $10^3 - 10^4 \text{A/m}^2$ и плотностью мощности $5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7 \text{Bt/m}^2$) в триодной системе с «открытой» для ускоряющего поля плазменной поверхностью и цилиндрическим ускоряющим электродом.

Разрядная структура, разработанная с учетом результатов численного моделирования и ее внешний вид представлены на рисунке 12. В данном источнике основные процессы ионизации газа происходят в области, ограниченной внешним и внутренним катодами 1 и 2, и анодом 3. Магнитное поле формируется при помощи постоянных магнитов 6, расположенных между катодами. Причем необходимым условием для работы структуры, является направление вектора магнитной индукции. Оно должно иметь перпендикулярное направление, относительно рабочей поверхности катодов, т.к. благодаря этому происходит ограничение подвижности электронов из плазмы на нод, приводящее к повышению плотности плазмы в этой области. Через верхнее отверстие в г исширителе, плазма проникает в расширитель 9. Плазмообразующий газ в разрядную структуру ч эпускается через канал 8 в штуцере 5 и катоде 1. Применение дополнительного электрода 7, расположенного между внутренним катодом и расширителем, обеспечивает повышение эффективнос ти извлечения и стабильность эмиссионного тока [14].







1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – изоляторы; 5 – штуцер для напуска плазмообразующего газа; 6 – постоянные магниты; 7 – дополнительный электрод; 8 – отверстие для напуска газа; 9 – расширитель плазмы;
10 – ускоряющий электрод; 11 – фланец
Рисунок 12 – Разрядная структура (а) и внешний вид конструкции (б)

для формирования низкоэнергетичных пучков заряженных частиц

В данной конструкции (рисунок 12) за счет способности плазменного эмиттера эмитировать как ионы, так и электроны в зависимости от полярности ускоряющего заряды напряжения возможно реализовать поочередно-периодическое воздействии на распыляемую мишень ионного и электронного пучков. При этом частота переменного ускоряющего напряжения в электронноионной оптической системе с плазменным эмиттером определяется, в основном, временем формирования условий на мишени для образования микродуг, и в зависимости от распыляемого материала обычно должна быть в диапазоне от единицы до десятков килогерц. Разработка соответствующей системы электропитания и управления позволит расширить спектр возможных к применению технологий, реализуемых посредством данной системы.

При этом, необходимо отметить, что конструкция этой газоразрядной структуры предусматривает расположение обрабатываемых изделий и механизма их подачи в расширитель плазмы 9 внутри вакуумной камеры, которая соединяется с разрядной структурой с помощью базового , ланца 10. Типичные характеристики данного источника, представленные на рисунке 13.



потенциал электрода-расширителя: 1, 2 – анодный, 3, 4– катодный; ток разряда: 250 мА Рисунок 13 – Характеристики извлечения электронов а) и ионов б) для различных потенциалов электрода расширителя [14]

2.3 Общие принципы формирования пучков большого сечения в плазменных источниках заряженных частиц

Общим для существующих конструкций плазменных источников электронных пучков большого сечения (ПБС) является наличие трех областей: разрядной камеры, где создается основная плазма высокой концентрации, электрода-расширителя, в котором формируется эмитирующая плазменная поверхность требуемой площади, и промежутка ускорения электронного пучка, соединенного с объемом расширителя системой эмиссионных каналов (сеточным или перфорирования электродом) [22]. Через эти эмиссионные каналы осуществляется выход плазменных электронов в область ускорения и формирования пучка. Для повышения плотности формируемой в расширителе плазмы в области интенсивных ионизационных процессов (газоразрядная камера) давление плазмообразующего газа должно быть существенно выше, чем в области формирования плазменной поверхности. Диффузия плазмы в расширитель осуществляется через отверстие (систему отверстий) в электроде, потенциал которого имеет принципиальное значение для обеспечения требуемых параметров плазмы в расширителе. Однако этот электрод является элементом га-

зоразрядной структуры и, значит, влияет на условия формирования разряда и параметры плазмы. . роме этого потенциал самого электрода-расширителя и его геометрические параметры (форма, ина) также влияют на свойства плазмы, формируемой в нем. Для стабилизации плазменной пор эрхности в электроде-расширителе принято использовать сеточные эмиттерные электроды [23-26]. Эта необходимость обусловлена как высокой подвижностью плазменной поверхности, котор ия будет перемещаться вглубь электрода-расширителя с увеличением ускоряющего напряжения 7], так и высокой нестабильностью плазменной поверхности большой плошади. Перемещение границы плазмы с увеличением ускоряющего напряжения обусловлено известным критерием становления плазменной поверхности [1, 4, 28, 29]: динамическое равенство ионного давления лазмы и давления электрического поля со стороны ускоряющего промежутка. В области, где это и венство выполняется, и устанавливается эмитирующая плазменная поверхность, а, значит, любые изменения параметров плазмы или ускоряющего поля приведут к перемещению границы. В то же время известны методы снижения подвижности плазменной поверхности за счет уменьшения радиента потенциала ускоряющего поля вблизи плазменной поверхности. Такой метод применягся в источниках сфокусированных электронных пучков и реализуется за счет специальной формы эмиссионного канала, что в случае ПБС неприменимо. Поэтому традиционным для электрон-■ых источников ПБС является использование сеточных электродов. Причем для обеспечения высокой эффективности извлечения (отношение тока эмиссии к току разряда) приходится применять сетки с наибольшей геометрической прозрачностью. Такие электроды не могут обеспечить существенный перепад давлений между областью формирования плазмы (1 – 10 Па) и областью ускорения пучка (10⁻¹ – 10⁻² Па). Поэтому отсутствие перепада давления и необходимость снижения подвижности плазменной границы позволяет предположить возможность создания систем, не требующих сеточной стабилизации плазменной поверхности при формировании низкоэнергетичных электронных пучков.

Известны [2, 13, 18] конструкции источников ионов без сеточной стабилизации плазменной поверхности за счет создания в области эмиссии сильного магнитного поля с индукцией, параллельной поверхности плазмы. Однако такой подход невозможно использовать при создании источников электронов, поскольку эмиссия замагниченных электронов из плазмы отличается крайне низкой эффективностью.

2.3.1 Источники на основе разряда с полым катодом

В плазменных источниках с высокой плотностью эмиссионного тока наиболее часто исг эльзуются газоразрядные структуры с полым катодом. Электродная структура и вольтамперная х практеристика разрядов с полым катодом приведена на рисунке 14. Первоначально ионизационные процессы возбуждаются в пространстве между плоскими частями катодов 1, 3 с продольным к . эверхности анода магнитным полем в нем, препятствующим уходу на анод из плазмы электроов. На этой стадии, которая соответствует отражательному разряду, напряжение горения дости-- ист величины порядка 600 B (рисунок 14, б, кривая 1), а концентрация плазмы увеличивается до ачений, при которых возбуждается эффект полого катода [4, 15, 28], тем самым инициируя переход разряда в стадию разряда с полым катодом (рисунок 14, б, кривая 2). При этом ток разряда р эко возрастает, а напряжение горения снижается до 300...400 В. Этот процесс обусловлен проникновением плазмы в полость (область I) и резким увеличением интенсивности ионизационных оцессов высокоэнергетичными плазменными электронами, с энергией выше потенциала ионизации плазмообразующего газа, и осциллирующими в полом катоде. Наличие магнитного поля в м ежкатодном пространстве и высокая степень ионизации газа в катодной полости обеспечивают высокую степень неоднородности плазмы с максимумом концентрации ее в области эмиссионного канала и достаточно высоким значением концентрации в максимуме при сравнительно невысоких жах разряда. Общим для разрядов с полым катодом является необходимость в инициировании эффекта полого катода. Инициирование разряда с полым катодом требует дополнительных электротехнических решений для обеспечения приемлемых характеристик зажигания и горения разряда с полым катодом и означает существование некоторого минимально возможного значения тока разряда, а значит и тока эмиссии. Это усложняет систему управления ПИЭЛ на основе разряда с полым катодом и затрудняет получение слаботочных электронных пучков, которые могут быть использованы, например, для сварки и пайки тонких материалов (фольги), а также в режиме настройки пушки – наводке на стык и при автоматическом слежении за стыком и зоной сварки. Кроме этого, ионная бомбардировка эмиттерного электрода с катодным потенциалом в области эмиссии приводит к изменению геометрии эмиссионного канала, изменению газодинамических условий и эмиссии, а также снижает ресурс ПИЭЛ.

Увеличения ресурса такого типа ПИЭЛ можно достичь повышением потенциала эмиттерного электрода. Это, в частности, обеспечивается включением в электродную структуру ПИЭЛ дополнительного изолированного электрода 4 (рисунок 15, а) в качестве эмиттерного [29], что не приводит к усложнению системы электропитания и управления плазменным эмиттером [14], но может обеспечить существенное увеличение эффективности извлечение электронов. Электрод 3 сохраняет функции отражательного электрода, а установленный под ним дополнительный электрически изолированный электрод 4 с эмиссионным каналом, приобретает «плавающий» потенциал, который существенно выше катодного.



а – электродная система: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – отражательный катод;
 4 – эмиссионный канал; 5 – ускоряющий (извлекающий) электрод;

б – вольтамперная характеристика: АВ – тлеющий разряд в отсутствии эффекта полого катода; CD – тлеющий разряд с полым катодом; D – дуга с катодным пятном и холодным катодом; кривая 1 – соответствует отражательному разряду, напряжение горения ~600В; кривая 2 – переход разряда в стадию разряда с полым катодом; *U_d* – напряжение горения разряда; *U_{ac}* – ускоряющее напряжение; *R_b* – балластное сопротивление; В – индукция магнитного поля; величина напуска плазмообразующего газа (воздух) 1 − Q= 0.2 · мПа м³/с;

 $2 - Q = 0.3 \cdot M \Pi a M^{3}/c.$

Рисунок 14 – Отражательный разряд с полым катодом [14]



а – электродная система: 1 – полыи катод; 2 – анод; 3 – отражательный катод;
4 – изолированный электрод с эмиссионным каналом; 5 – ускоряющий электрод;
б – вольтамперные характеристики: 1 – отражательный разряд с полым катодом; 2, 3 – разряд с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом газ (воздух): 1, 2 – 1.25 мПа м³/с; 3 – 2.5 мПа м³/с.
Рисунок 15 – Отражательный разряд с полым катодом и изолированным

эмиттерным электродом [29]

Это приводит к некоторому снижению концентрации плазмы на оси разряда за счет ухода лазменных электронов на изолированный эмиттерный электрод как на стадии разряда до возбуждеи ля эффекта полого катода, так и в режиме горения разряда с полым катодом.

В целом вследствие малой относительно отражательного катода площади изолированного эмиттерного электрода, контактирующей с плазмой, условия зажигания и горения разряда остаются приемлемыми при значительном повышении ресурса и возможности использования эмиссионных к зналов в более широком диапазоне геометрических размеров.

Разряды с полым катодом используются для создания плазмы в электроде-расширителе при ормировании ПБС в источниках, работающих в стационарном или импульсном режиме практически с любой длительностью, большей времени установления разряда. Основная особенность таи го типа источников заключается в том, что газоразрядная, инициирующая основной разряд, структура является одновременно и элементом основного разрядного промежутка. Один из вариа этов типичной электродной структуры источника такого типа показан на рисунке 16, а [4, 7]. Ее эстоинство заключается в том, что через малое отверстие в катоде отражателе 3 возможно перелючение значительной доли электронного тока плазмы на электрод с положительным потенциалом за этим отверстием. Кроме этого такая система не переходит в режим дугового разряда до ток в разряда 2,5–3 А в стационарном режиме, что оказывается достаточным для значительной области технологического применения электронных ПБС. И, наконец, третьим важным фактором, определяющим целесообразность применения такой инициирующей системы, является обеспечиваемый в ней значительный перепад давления плазмообразующего газа между областями формирования плазмы и ускорения пучка электронов.

При подаче на электрод-расширитель 4 потенциала анода, разрядный ток переключается с высокой эффективностью на расширитель (до 80 %). В связи с этим анод 2 переходит в режим вспомогательного анода, роль которого заключается в повторном зажигании разряда (при случайных погасаниях основного разряда). Эмиссия электронов (и ионов при изменении полярности ускоряющего напряжения) осуществляется через сеточный электрод 6, расположенный в торце расширителя. На рисунке 16, б представлена вольтамперная характеристика извлечения электронов в таком источнике.

Вследствие высокой неоднородности плазмы на оси полого катода для достижения высокой однородности распределения плазмы в расширителе необходимо принимать дополнительные меры. Одним из вариантов является использование изолированного выравнивающего электрода 5, расположенного в объеме расширителя напротив отверстия в отражательном катоде 3. В тоже время анализ показывает, что для источников с расширителем также возможна модификация электродной структуры, направленная на повышение однородности распределения плазмы и увеличения эффективности извлечения электронов, в частности, за счет изменения параметров эмиттерного сеточного электрода.



а – разрядная структура: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – катод-отражатель;
 4 – электрод-расширитель; 5 – выравнивающий электрод; 6 – эмиттерный сеточный электрод; 7 – коллектор электронов;

б – вольтамперная характеристика извлечения;

в – распределение плотности эмиссионного тока: кривая 1 – в отсутствии
 выравнивающего электрода, кривая 2 – в присутствии выравнивающего электрода

Рисунок 16 – Плазменный источник электронов на основе разряда с полым катодом и электродом-расширителем [4, 7]

2.3.2 Источники на основе разряда в скрещенных Е×Н полях

Другой тип электродной структуры для получения ПБС показан на рисунках 7 и 12. Как и в с іучае разряда с полым катодом данная конструкция также может быть использована в качестве энератора плазмы в источниках с ПБС [30]. Пример конструкции плазменного источника ПБС, в которой используется такой генератор плазмы, представлен на рисунке 17 [14]. В такой структуре р зализован другой способ выравнивания распределения концентрации по сечению электродар зсширителя. Отличительной особенностью источника является возможность обеспечить более интенсивную диффузию плазмы в периферийные области электрода-расширителя в сравнении с иффузией на оси плазменного эмиттера. В результате высокую однородность по сечению эмитирующей плазмы можно добиться без использования дополнительных электродов в объеме плазмы, г ссурс которых конечно ограничен.



корпус, 2 – изоляторы; 3 – катоды;
 анод; 5 – электрод-расширитель;
 эмиттерный (сеточный) электрод

Рисунок 17 – Плазменный источник ПБС на основе разряда в скрещенных Е×Н полях [14, 30]

Экспериментально установлено, что при относительно низких давлениях значительную долю эмитированных в ускоряющий промежуток электронов составляют электроны, выходящие в электрод-расширитель из инициирующей системы через отверстие связи инициирующей системы и расширителя плазмы. Это означает, что ионизационные процессы в экспандере недостаточно развиты и пространство электрода-расширителя заполняется плазмой, диффундирующей из основного разряда, т.е. этот электрод выполняет пассивную роль. Однако при работе источника электронов при повышенных давлениях или в условиях с интенсивным газоотделением с обрабатываемой поверхности роль ионизационных процессов в электроде-расширителе может стать определяющей для параметров плазменного эмиттера, т.е. электрод-расширитель переходит в «активный» режим работы [30 - 32]. Этот факт делает целесообразным анализ условий формирования плазмы и соответственно эмиссионных свойств этой плазмы в зависимости от геометрических , азмеров расширителя, в первую очередь его длины. Анализ опубликованных данных показывает, у го этому вопросу внимания практически не уделялось.

Основные характеристики извлечения электронов (вольтамперная – б, эмиссионная – а, газовая – в и распределение плотности тока по сечению – г) такого источника представлены на рис /нке 18.



а – эмиссионная: $\xi = 0,472$; ускоряющее напряжение $U_{ac} = 10$ кВ; 1 – напуск газа (воздух) Q = 1000 атм·см³/ч; 2 – Q = 890 атм·см³/ч; 3 – Q = 800 атм·см³/ч;

б – вольтамперные характеристики: 1 –сеточная стабилизация с использование двух сеток;

2 – сеточная стабилизация;
$$\xi = 0,615$$
; $Q = 850$ атм·см³/ч; $p = 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

ток разряда
$$1 - I_d^0 = 0,15$$
 A; $2 - I_d^0 = 0,2$ A

в – газовая характеристика в импульсном режиме: $\xi = 0,472$, $U_{ac} = 8$ кВ, $1 - I_d = 20$ А;

$$2 - I_d = 11 \text{ A}; 3 - I_d = 7 \text{ A};$$

г – распределение плотности тока по сечению пучка: 1 – импульсный режим;

2 - стационарный режим

Рисунок 18 – Характеристики источника с пучком большого сечения

(*ξ* – прозрачность сеточного эмиттерного электрода)

Из анализа следует, что существенным недостатком таких структур является возникающая например, кривая 2 рисунок 18, б) при определенных условиях (повышенное давление) зависиость параметров плазмы от эмиссионного тока. Поэтому поиск более оптимальных условий форирования плазмы в расширителе по потенциалу электрода между основной областью и расширителем представляется актуальным.

2.3.3 Особенности формирования электронных пучков большого сечения

При формировании электронных ПБС с помощью представленных в предыдущих разделах сточников важным является выполнение определённых условий в области эмиттерного электрота (геометрия сеточного электрода и его потенциал, параметры плазмы и ускоряющее напряжече). В таких системах обрабатываемая поверхность сама может выполнять роль ускоряющего электрода. Если это невозможно, например, при обработке непроводящих или плохо проводящих материалов, то необходимо существование ускоряющего электрода, который, как правило, как и миттерный электрод также является сеточным. Понятно, что ресурс такого электрода невысок, оэтому представляется целесообразным разработать такую систему ускорения, которая, обладая высоким ресурсом, позволяла бы получать электронные пучка с требуемой энергией и низкой расх эдимостью для уменьшения потерь эмиссионного тока. Представляется, что при формировании низкоэнергетичных электронных и ионных пучков в качестве ускоряющей системы может быть использована система, близкая по свойствам к электростатической линзе [33, 34]. Для определения оптимальных параметров такой системы ускорения необходимо провести анализ основных характеристик электростатических фокусирующих систем.

В электронной оптике электронные потоки формируются с помощью электрических и магнитных полей, которые можно создать с помощью диафрагм и фокусирующих систем – электростатических и магнитных линз [33, 34]. В большинстве случаев поля создаются цилиндрическими электродами и поэтому обладают полной аксиальной симметрией.

Электростатические линзы делятся на основные типы в соответствии с распределением потенциала вдоль оси симметрии линзы. К первому типу относится одиночная линза [35], которая представляет собой совокупность трех электродов, центральный из которых имеет меньший потенциал. Трубчатые электроды с потенциалами $U_1 > U_2$, $U_3 > U_2$ образуют эквипотенциали (сплошные линии) и силовые линии (штриховые линии) рисунок 19.



Рисунок 19 – Одиночная электростатическая линза

Можно предполагать, что существуют определенные условия, при которых в такой системе э іектродов возможно формирование плазмы. В этом случае в системе будут формироваться электрические слои между плазмами в расширителе и в системе электродов 3, 4, 5 (рисунок 20) и вся э а система может как расширитель «активного» типа [14, 31, 36].



1 – генератор плазмы, 2 – плазма, 3 – расширитель,
 4, 5 – система ускоряющих электродов,
 6 – обрабатываемая деталь, 7 – электронный пучок

Рисунок 20 – Схема источника с ускоряющими электродами по типу одиночной линзы

Ко второму типу относится иммерсионная линза [33], которая представляет собой два электрода, между которыми приложена разность потенциалов (рисунок 21).



Рисунок 21 – Иммерсионная линза, образованная двумя трубчатыми электродами

Такая система также может гипотетически работать в двух режимах: как оптическая система или как «активный» расширитель плазмы в соответствии с реализуемыми условиями (рисунок 22).



 1 – генератор плазмы, 2 – плазма, 3 – расширитель,
 4 – ускоряющий электрод, 5 – обрабатываемая деталь, 6 – электронный пучок

Рисунок 22 – Схема источника с ускоряющей системой, реализованной по типу иммерсионной линзы

В случае применения рассмотренных электродных структур в режиме электронно-ионных оптических элементов возможно численное моделирование создаваемых ими электрических полей и соответствующих траекторий зарядов в этих полях. При формировании в этих структурах плазменных образований (режим «активного» расширителя плазмы) возможность предварительного моделирования процессов в электродной системе практически отсутствует. Поэтому создание таких электродных систем требует выполнения значительного объема экспериментальных исследований.

2.3.4 Численное моделирование электрических полей в системе с электродом г псширителем и цилиндрическим ускоряющим электродом

Возможность создания источника с ПБС на основе системы с открытой развитой плазменрой поверхностью и ускоряющим электродом, по форме представляющим собой продолжение расширителя, не является очевидной. Это связано, во-первых, с возможностью реализации требуе лых оптических свойств системы ускорения при заданных энергетических параметрах ПБС (ток и учка и ускоряющее напряжение). Во-вторых, с возможностью реализации необходимой формы эмитирующей поверхности плазмы в расширителе. Простейший анализ оптических свойств ускоиющей пучок системы можно осуществить на анализе распределения электрического поля в татих системах с использованием пакета прикладных программ, который обеспечивает решение узвнения Лапласа в системе с электродами заданной геометрии и с заданными потенциалами, в частности пакета ELCUT [37], используемого для моделирования электрических и магнитных пол й в различных электрофизических устройствах. Для траекторного анализа движения электронов учетом плотности и распределения плотности эмиссионного тока, может быть использован пакет рикладных программ ELIS [16, 17].

На рисунке 23 представлена конструкция плазменного источника с расширителем и ускоп ющим электродом, который может быть сплошным или составным. Структура представлена в виде расчетной схемы с заданными потенциалами электродов и плазмы. Влиять на картину распределения электростатического поля в области 1 (рисунок 23) можно с помощью изменения величин потенциалов, подаваемых на эмиттерный и ускоряющий электроды и изменения геометрии системы ускорения. Построение картины электрического поля осуществлялось для различных вариантов потенциалов эмиттерного электрода: катодного, анодного и плавающего.

Эмиттерный электрод с катодным потенциалом

В случае катодного потенциала эмиттерного электрода [38, 39] разность потенциалов между плазмой и эмиттерным электродом составляет несколько сотен вольт (в расчетах 300 В) и толщина слоя пространственного заряда, отделяющего плазму от эмиттерного электрода сравнительно велика. Это приводит к необходимости использовать эмиссионные каналы, соединяющие область основного разряда и расширитель достаточно большого диаметра для достижения в плазменном источнике электронов приемлемой, с технологической точки зрения, эффективности переключения электронов в расширитель. Однако увеличение диаметра канала снижает перепад давления в генераторе плазмы и промежутке ускорения и снижает электрическую прочность ускоряющего промежутка. С одной стороны в случае катодного потенциала расширителя уход электронов на стенки канала практически отсутствует, а уход ионов на его стенки будет одинаков и равен бомовскому току [1, 4].



Серый цвет – сталь, желтый – капралон, коричневый – медь, красным обозначена ось симметрии

Рисунок 23 – Расчетная геометрия источника с расширителем и цилиндрическим ускоряющим электродом В результате в расширителе формируется существенный градиент концентрации проникаючей плазмы [38]. С другой стороны проникновение плазмы из основной области в область расширитиля ограничено не только размером канала, но и толщиной катодного слоя в этом канале. В результите, несмотря на то, что распределения эквипотенциальных поверхностей, показанные на рисунке 24, а, удовлетворяют требованиями, изложенным выше, получить электронный пучок с сечением, о пизким к сечению расширителя и равномерным распределением плотности тока по сечению не у цается. Внешний вид формируемого электронного пучка показан на рисунке 24, б и соответствует по форме электронному пучку, эмитированному через эмиссионный канал, разделяющий область заряда и расширителя.





а – распределение электростатического поля в области 1,

б – внешний вид электронного пучка

Рисунок 24 – Распределение электростатического поля. φ_{у2}=0 B, φ_{ээ}=-5000 B, φ_{пл}=-4700 B (цветные линии – эквипотенциальные поверхности)

Эмиттерный электрод с анодным потенциалом

Когда расширитель имеет анодный потенциал (порядка – 50 В относительно плазмы), падение потенциала на пристеночном слое в расширителе и в канале, разделяющем области разряда и расширитель, оказывается почти на порядок меньше, чем в случае катодного потенциала эмиттерного электрода. Это обеспечивает возможность уменьшения диаметра канала и увеличения его длины, т.е. улучшает газодинамические условия работы источника. Однако в этом случае электронный ток з плазмы на стенки расширителя превышает бомовский ионный ток. Поэтому в проникающей в и исширитель плазме также формируется градиент концентрации. Тем не менее, граница эмитируюей плазмы с большей вероятностью формируется в расширителе и форма электронного пучка, показанная на рисунке 25, б, в большей степени соответствует форме пучков большого сечения. Расп ределение электрического поля в этом случае представлено на рисунке 25, а.





б)

В условиях значительного превышения подвижности электронов в сравнении с ионами коэффициент переключения электронного тока в канал приближается к единице [4, 7, 13].

Для изменения распределения потенциала в расширителе и ускоряющем электроде и соответственно снижения расходимости формируемого пучка, может быть использован комбинированный ускоряющий электрод, совмещающий в себе функции ускоряющего электрода и электростатической линзы. Нижняя (ближняя к обрабатываемой поверхности) секция может, как и ранее, иметь нулевой потенциал (электрод заземлен), а вторая часть ускоряющего электрода более высокий потенциал (порядка сотни вольт). Картина поля, полученная в таких условиях, представлена на рисунке 26, а, а внешний вид формируемого электронного пучка на рисунке 26, б.





Сравнительный анализ представленных на рисунках 24 –26 распределений показывает, что в системах с расширителем и цилиндрическим ускоряющим электродом более эффективно использовать анодный потенциал электрода-расширителя. Однако, как показали эксперименты с реальными источниками, стабильный режим эмиссии может быть реализован в очень узком диапазоне напусков плазмообразующего газа в сравнении с катодным потенциалом, когда стабильность эмиссии существенно выше и диапазон рабочих напусков существенно шире.

Эмиттерный электрод с плавающим потенциалом

Изменение потенциала эмиттерного электрода в диапазоне между катодным и анодным может способствовать использованию преимуществ каждого из выше приведенных вариантов эмиссии. Однако управление потенциалом эмиттерного электрода в некотором диапазоне за счет использования дополнительного блока питания нецелесообразно, поскольку это существенно усложняет систему электропитания и управления плазменным эмиттером.

Перспективным, как показано в работе [29] представляется случай изолированного электрода. Потенциал такого электрода формируется при равенстве ионного и электронного токов на стенки эмиссионного канала из проникающей плазмы. Стенки эмиссионного канала приобретают соответгвующий отрицательный потенциал (порядка 150 В) относительно потенциала проникающей плазы, и концентрация проникающей плазмы с увеличением глубины проникновения в канал, как и в г иссмотренных ранее случаях, снижается. Однако осевой градиент потенциала в проникающей в канал плазме, как показывают предварительные оценки, не формируется, поскольку плазменные электроны, перераспределяясь, компенсируют формирование градиента потенциала в плазме, чему спос обствует динамическое равенство токов на эмиттерный электрод [38].

Варианты распределения электрического поля в системах с изолированным электродомасширителем представлены на рисунке 27, б, в сравнении с распределениями в случае катодного (рисунок 27, а) и анодного (рисунок 27, в) потенциалов. Анализ распределений показывает, что исг эльзование изолированного электрода-расширителя представляется перспективным для повышения стабильности эмиссии и снижения интенсивности электрических пробоев высоковольтного у коряющего промежутка.



а – распределение электрического поля при катодном потенциале эмиттерного электрода;
 б – распределение электрического поля при плавающем потенциале эмиттерного электрода;
 в – распределение электрического поля при анодном потенциале эмиттерного электрода

φ _{y2} =0 B,	φ _{y2} =0 B,	φ _{y2} =0 B,	
φ _{ээ} = -1000 B,	φ _{ээ} = -1000 B,	φ _{ээ} = -1000 B,	
φпл= -700 B	φ _{пл} = -850 В	φ _{пл} = -950 В	

Рисунок 27 – Распределение электростатического поля

2.4 Макет источника электронов с повышенным первеансом

Проведенные исследования [40, 41] показали возможность реализации в единой конструкции г эпрерывное воздействие ионного и электронного пучков, поступающих на распыляемую мишень через единое пространство дрейфа ускоренных зарядов. На рисунке 28 показана схема электродной с руктуры (рисунок 28, а) и внешний вид конструкции (рисунок 28, б) с повышенным первеансом.





a)

б)

1 – канал для напуска плазмообразующего газа; 2 – катод; 3 – главный анод;
4 – отражательный катод; 5 – эмиттерный электрод; 6 – вспомогательный катод;
7 – ускоряющий электрод; 8, 10 – катоды; 9 – анод; 11 – фланец для установки структуры на рабочую камеру; 14 – изоляторы

Рисунок 28 – Внешний вид (а) и внутренняя структура (б) разработанного макета источника с повышенным первеансом

Плазма, через часть поверхности которой осуществляется отбор (эмиссия) электронов, формируется в объеме, ограниченном внутренними поверхностями катода 2, отражательного катода 4, главного анода 3 и эмиттерного электрода 5. Указанные электроды разделены изоляторами. Катоды 2 и 4 являются наконечниками постоянного магнита, создающего между ними магнитное поле, которое способствует осцилляции вторичных γ -электронов с катодов в пространство формирования плазмы. Электроды 5, 6 и 7 образуют промежуток ускорения электронов, где формируется поверхность плазмы, эмитирующая электроны. Электроды 8–10 образуют газоразрядную структуру, формирующую плазму, являющуюся источником ионов. Эта структура представляет собой ячейку «пеннинговского» типа. Одновременно с этим магнитное поле, формируемое катодами 8, 9 образует екоторую магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, распростраг ющегося вдоль оси этой газоразрядной структуры до выхода из источника в технологическую камеру. На рисунке 29 приведены вольтамперные характеристики разряда камер источника. Они соотсетствуют типичным газоразрядным характеристикам источников данного типа.



Рисунок 29 – Вольтамперные характеристики разряда верхней (электроды 2-5, рисунок 28, а) камеры (а) и нижней (электроды 8-10, рисунок 28, б) камеры (б)

На рисунке 30 приведена схема подключения электродов разработанного макета электронного источника с повышенным первеансом к системе электропитания. Верхняя структура (электроды 2-5, рисунок 28, а) формирует электронный пучок, попадающий после ускорения в структуру, образованную электродами 8-10, распространяется вдоль оси в этой структуре и инициирует разряд низкого давления, в котором формируется плазма, эмитирующая ионы. Ионы распространяются в верхнюю структуру повышая ионизацию газа в области отбора электронов что повышает плотность эмиссионного тока и частично компенсируют объемный заряд ускоряющего промежутка. Что в целом приводит к увеличению первеанса источника. Об этом свидетельствуют вольтамперные характеристики извлечения при наличии и отсутствии инициации разряда во второй разрядной камере (электроды 8-10, рисунок 28, а) макета источника, приведенные на рисунке 31. Приведенные данные свидетельствуют о возможности и перспективности применения разработанного источника для реализации различных технологий электронно-лучевого воздействия. Необходимо отметить, что в разработанном макете источника электронов с повышенным первеансом отсутствует внешний корпус и система принудительного охлаждения, поэтому извлечение осуществлялось для малых ускоряющих напряжений и токов эмиссии. Тип системы охлаждения и необходимая мощность электронного пучка зависит от технологии применения данного источника и подбирается исходя из каждого конкретного случая.



БПР – блок питания разряда (U_p, I_p), (напряжение до 1000 В, ток до 1,5 А); ВБП – высоковольтный блок питания (U_y), (напряжение до 5 кВ, ток до 1 А)

Рисунок 30 - Схема подключения электродов разрядных камер макета электронного источника на основе разряда в скрещенных Е×Н полях с повышенным первеансом



Рисунок 31 – Вольт-амперные характеристики извлечения макета электронного источника на основе разряда в скрещенных Е×Н полях с повышенным первеансом

3. ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ПУЧКА В ПЛАЗМЕННЫХ ЭМИССИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ Е×Н ПОЛЯХ

Одним из недостатков, сдерживающих расширение применения безнакальных электронноо птических систем для ряда технологий является сложность реализации в данных структурах имп. ульсного режима работы с длительностью импульса тока пучка порядка сотни наносекунд и менее. При реализация импульсного режима работы просматривается возможность повышения срвеанса низкоэнергетичных источников заряженных частиц.

Импульсный режим тока эмиссии в плазменных источниках заряженных частиц при модуляг и тока разряда позволяет получать импульсы длительностью свыше десятка микросекунд, что отределяется временем установления стационарного состояния (фронтом нарастания тока разряда) и обусловлено, в основном, скоростью перемещения в структуре ионов газа [42]. Скорость вижения электронов при их типичной средней энергии в газоразрядной плазме приблизительно в о0 раз превышает скорость ионов. Поэтому достаточно короткие импульсы тока пучка в ПИЭЛ можно получить при импульсном ускоряющем напряжении. Однако, при ускоряющем напряжени, типичном для технологических ПИЭЛ в 30-40 кВ, разработка системы формирования импульсов ускоряющего напряжения достаточно проблематична. В данной работе предложено обоснование возможности реализации импульсного режима за счет применения ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных Е×Н полях с управляющим электродом и соответствующей системой электропитания.

3.1. Условия формирования эмитирующей плазмы в ПИЭЛ

Эмитирующая плазма в ПИЭЛ формируется с помощью низковольтных разрядов в газе [2, 13, 14]. Могут применяться разряды различного типа, однако, для упрощенного анализа, газоразрядную структуру в общем случае можно представить, как структуру, содержащую два электрода: катод, находящийся под отрицательным потенциалом и анод, находящийся под положительным потенциалом. При определенном сочетании давления газа в структуре (разрядной камере) и напряжения между электродами в межэлектродном промежутке возбуждается процесс ионизации газа электронами, энергия которых, полученная при движении от электрического поля в газоразрядной структуре становится выше энергии, необходимой для ионизации. Одновременно с процессом ионизации молекул газа (генерации ионов и электронов) происходит процесс ухода зарядов на стенки разрядной структуры. При определенном соотношении интенсивности этих процесс сов в разрядной структуре образуется газоразрядная плазма.

Для описания процессов в разрядной структуре ПИЭЛ плазма представляется физической оделью смеси трех газов: нейтрального, электронного и ионного с собственной температурой к ждого газа (To, Te, Ti соответственно), которые могут значительно отличаться. Обычно, $T_{i} >> T_{i} >> T_{0}$, и скорость хаотического движения электронов много больше хаотической скорости лонов, этому способствует также значительная разница в массах электрона и иона газа. Вследвие этого, уход электронов из объема разрядной камеры на ее стенки может значительно превосходить скорость ухода ионов на стенки. В то же время генерация зарядов (ионов и электронов) р процессе ионизации осуществляется парами, т.е. с одинаковой скоростью. В результате в про-**1** ессе формирования плазмы происходит накопление ионов в ней, возрастает ее потенциал и начинают формироваться пристеночные электрические слои, которые у катода и анода с ростом потен-. чала становятся тормозящими для электронов, т.е. снижают уход электронов из плазмы так, что ход электронов и ионов из плазмы уравновешивается. С этого момента устанавливается стационарный режим разряда, постоянство концентраций положительных (n₊) и отрицательных (n₋) зарядов, а также их соотношения (n₊/n₋) в плазме; постоянное падение потенциала в пристеночных слох. Кроме этого, устанавливается стационарный баланс ионного и электронного токов в газоразрядой структуре и в целом ток разряда, что обычно [7, 8] отображается следующими равенствами (1 – 4):

$$I_p = I_i + I_e, \tag{1}$$

$$I_{i} = j_{ik}S_{k} + j_{ia}S_{a} = j_{ik}S_{k} + j_{eik}S + j_{i}S_{a} = j_{i}(1+\gamma)S_{k} + j_{i}S_{a},$$
(2)

$$j_i = e n_i \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}},\tag{3}$$

где j_{iek} – плотность тока электронов ионно-электронной эмиссии, γ – коэффициент ионноэлектронной эмиссии катода, S_k и S_a – площади катода и анода соответственно;

$$I_e = \gamma_e S_a = e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} e^{-\frac{eU_{ac}}{kT_e}} S_a , \qquad (4)$$

где U_{ac} – падение напряжения на пристеночном анодном слое, тормозящее часть теплового хаотического тока электронов на анод.

Из баланса токов для стационарного режима разряда следует, что устанавливающееся напряжение на пристеночных слоях зависит кроме упомянутых ранее факторов и от соотношения площадей газоразрядной камеры под катодным и анодным потенциалами.

Реализация упомянутых базовых процессов, обеспечивающих формирование эмитирующей плазмы в ПИЭЛ, требует определенного времени для установления стационарного состояния с момента подачи напряжения (U_p) на электроды. Эксперименты показывают, что это время (фронт нарастания тока разряда) составляет десятки микросекунд и обусловлено, по-видимому, в основном скоростью перемещения в структуре ионов газа при их средней энергии, составляющей обычно десятые доли электроньотьт (эВ). Таким образом, при модуляции тока разряда I_p соответству-

ющим регулированием напряжения разряда возможен импульсный режим тока эмиссии в ПИЭЛ с , лительностью импульсов более десятков микросекунд.

Скорость движения электронов при их типичной средней энергии в газоразрядной плазме порядка 1-2 эВ составляет величину порядка 10⁶ м/с и приблизительно в 10² раз превышает скорость ионов. Поэтому достаточно короткие импульсы тока ПИЭЛ возможно получить при им-, ульсном ускоряющем напряжении. Однако при типичном для технологических ПИЭЛ ускоряютем напряжении 20-40 кВ разработка системы формирования импульсов ускоряющего напряжеия достаточно проблематична, в сравнении с другим возможным способом регулирования тока лчка в ПИЭЛ. Суть этого способа заключается в использовании для регулирования тока пучка дополнительного несвязанного с газоразрядной структурой электрода, который не участвует в d эрмировании плазмы, но может формировать и регулировать минимум потенциала в системе ускорения электронов в ПИЭЛ. В электронных пушках с термокатодом этот способ можно считать цинственно возможным и широко используемым для управления током пучка [4, 7]. Однако, возчожности управления током пучка в ПИЭЛ триодного типа в открытых публикациях практически с обсуждалось. В качестве базовой конструкции ПИЭЛ с управляющим электродом может выступать любая из ранее разработанных [14, 18-21]. На рисунке 32 представлена электродная структ /ра одного из вариантов такой структуры.



 внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод; 5 – эмиссионный канал; 6 –управляющий электрод;
 7 – генератор управляющих импульсов; 8 – ускоряющий электрод;
 U_d – напряжение горения разряда; U_{ac} – ускоряющее напряжение;
 R_b – балластное сопротивление; В – индукция магнитного поля

Рисунок 32 – Электродная структура плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных Е×Н полях с управляющим электродом

Разряд возбуждается в пространстве между катодами 1 и 2 (область *I*). Плазмообразующий газ подаётся в пространство между катодами, а перепад давлений, обеспечивается геометрией эмиссионного канала. Формирующаяся в разряде между катодами плазма диффундирует в область эмиссионного канала 5. Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал в эмиттерном электроде 4 с анодным (или близким к нему) потенциалом. На управляющий электрод 6 поступают сигналы с генератора управляющих импульсов 7, создавая минимум потенциала в области ускорения, формируя импульсы эмиссионного тока в соответствии с управляющим сигналом. Ниже, на рисунке 33 представлен эскиз разработанной конструкции и ее внешний вид.





б)

a)

1 – внутренний катод, 2 – анод, 3 – внешний катод, 4 – дополнительный электрод,
5 – эмиттерный электрод, 6 – платформа, 7 – крышка, 8 – изоляторы, 9 – управляющий электрод
Рисунок 33 – Эскиз конструкции (а) и внешний вид (б) плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных Е×Н полях с управляющим электродом

Для реализации возможности формирования наносекундных импульсов тока пучка описанным способом, была разработана система управления способная формировать импульсы напряжения на управляющем электроде ПИЭЛ с длительностью порядка 100 нс, с короткими фронтами и регулируемой частотой следования импульсов. При этом на основе анализа физических процессов в ПИЭЛ и ЭОС с термокатодами предполагается, что будет достаточной амплитуда импульсов управляющего напряжения порядка 500-1000 В при токе нагрузки порядка 0,01 А.

3.2 Анализ существующих конструкций высоковольтных источников питания импульсного напряжения наносекундного диапазона

Традиционно в качестве высоковольтных источников питания импульсного напряжения наносекундного диапазона выступают схемы одного из приведенных ниже типов [43 - 45]:

- источник питания, основанный на явлении лавинного пробоя транзисторов;

- генератор Маркса;

- трансформатор Льюиса.

Ниже представлены конструкции и принцип работы каждого из возможных вариантов источника питания.

3.2.1 Источник питания, основанный на явлении лавинного пробоя транзисторов

В источнике питания на лавинном пробое транзисторов в схемотехническом плане предс авляет собой 5 линеек лавинных транзисторов, соединенных по схеме генератора Маркса (рисунок 34).



а – принципиальная схема; б – внешний вид
 Рисунок 34 – Источник питания на лавинных транзисторах

Как и в любой подобной схеме, на работоспособность существенное влияние оказывает качество разводки платы. Она представляет собой волновод с сопротивлением 50 Ом с оптимизацией для минимизации паразитной индуктивности и уменьшения времени нарастания выходного импульса. Работа транзистора в лавинном режиме известна. Для одиночного транзистора выходной ток может быть рассчитан по формуле:

$$I_{l} = \frac{U_{cbo} - U_{ceo}}{R_{l}}, \qquad (5)$$

где *U*_{cbo} – напряжение пробоя, когда база соединена с эмиттером;

*U*_{ceo} – напряжение пробоя, когда база и эмиттер не соединены.

 R_l – сопротивление нагрузки.

Цепочка лавинных транзисторов служит для увеличения выходного напряжения. Преимущество одной длинной цепочки лавинных транзисторов заключается в уменьшении общего накопленного заряда, что предотвращает повреждение из-за ложных срабатываний или пробоя. Недостатком схемы является то, что напряжение питания не может быть слишком большим, в противно случае может образоваться дуга. Схема состоит из 5 линеек лавинных транзисторов на 50-Омном волноводе. В каждой линейке по 8 транзисторов. Для уменьшения паразитной индуктивности конденсаторы образованы контактными площадками двухсторонней печатной платы. Индуктивность транзисторов и эти конденсаторы образуют волновод.

Принцип работы заключается в следующем. Первый транзистор в первой линейке запускатся через малогабаритный импульсный трансформатор на ферритовой бусине. Когда этот транз стор открывается, его коллектор приобретает потенциал земли, в результате чего на втором транзисторе оказывается большее падение напряжение коллектор-эмиттер. Благодаря этому лапряжению у транзистора происходит неразрушающий лавинный пробой. Когда каждый транзиор пробивается, следующий испытывает еще большее перенапряжение, что приводит к более быстрому открытию. Когда последний транзистор срабатывает, выходной импульс быстро нараст ет. Источники положительного и отрицательного напряжения подключены к каждой линейке транзисторов через резисторы сопротивлением 2 МОм. Ток покоя в каждой линейке ограничен 50 мА. Этот небольшой ток создает смещение и помогает улучшить устойчивость схемы. Длиульность выходного импульса не более 15 нс, при большей длительности возможен быстрый выод транзисторов из строя. Преимущество этой схемы заключается в использовании источника питания с малым напряжением, что исключает появление дуги. Длительность импульса во многом олределяется емкостью последней линейки, и тем, насколько быстро включается эта линейка. Веичина этой емкости определяется исходя из того, что схема должна иметь волновое сопротивлеие 50 Ом для согласования нагрузки. Предполагаемая индуктивность используемых транзисторов (2N5551) составляет 16 нГн, следовательно полная индуктивность каждой линейки составляет 16 нГн. Тогда емкость линейки может быть определяется по формуле:

$$C = \frac{L}{Z^2} \tag{6}$$

Время нарастания выходного импульса τ рассчитывается по формуле:

τ

$$r = RC$$
 (7)

На рисунке 35 представлены типичные осциллограммы выходного импульса



а – форма выходного импульса; б – фронт импульса

Рисунок 35 – Импульс тока, формируемый источником питания на основе лавинного пробоя [44]

3.2.2 Генератор Маркса

На рисунке 36 представлен один из вариантов схемы генератора импульсных напряжений Маркса [45]. Принцип работы заключается в следующем: группа конденсаторов заряжается в параллельной схеме соединения до определенного напряжения U_0 , а разряжается последовательно. втоматическое и быстрое переключение схемы из параллельного в последовательное соединение осуществляется с помощью шаровых искровых промежутков (разрядников). В результате, напряи ение между начало и концом этой цепочки суммируется, достигая величины nU_0 , где n – число оследовательно включенных конденсаторов (ступеней ГИН), а U_0 – напряжение, до которого они были заряжены.



Рисунок 36 – Электрическая схема многоступенчатого генератора импульсных напряжений C1=C2=...=Cn.

Конденсаторы *C1-Cn* заряжаются от источника выпрямленного напряжения через большие сопротивления *R1* (защитное) и *R0* (зарядные/разделительные) по параллельной схеме, следовательно зарядная емкость ГИН $C_{3ap}=nC$, где *C*- емкость ступени. Соотношение *R1*>>*R0*, что обеспечивает практически одновременный заряд всех конденсаторов.

Наличие в схеме большого сопротивления (защитного и зарядных/разделительных) ограничивает ток и вызывает потери энергии. Поэтому подобные схемы с зарядными резисторами используются для генерирования импульсов с частотой не более 1-2 имп/сек. и не предназначены для длительной работы. Для работы в длительном режиме с частотой десятки имп/сек. заряд конденсаторов происходит через защитный дроссель и зарядные индуктивности (рисунок 36).



Рисунок 37 – Схема генератора импульсных напряжений с зарядом через индуктивности.

К моменту окончания заряда конденсаторов напряжение в точках 1, 3,...19 достигает значения $+U_0$, которое будет равно пробивному напряжению воздушного промежутка F1 и зависит от _г асстояния между электродами S_{F1} . Расстояния S между электродами искровых промежутков $F1...F_n$ устанавливаются из условия $S_{F1} < S_{F2} < S_{F3}...$

После этого происходит пробой промежутка F1 и разряд конденсатора C1 на землю. В *точке* 0 потенциал мгновенно возрастет до значения U_0 . Наличие в генераторе небольшой (десятка пФ) паразитной емкости C_n образует контур R_y -F1- *точка* 0 - C_n - *точка* 2- R_y в котором протекет разрядный ток Емкость C_n будет заряжена до $+U_0$ потенциал в *точке* 2 потенциал практически мгновенно становится равным - U_0 . Потенциал *точки* 3 в течение некоторого времени сохраняется равным $+U_0$, т.к. эта точка отделена от *точки* 1 сопротивлением R0, величина которого составляет десятки- тысячи кОм, поэтому постоянная времени разряда $t_2=R_0C_2>>t_1=C_1R_y$. Таким образом, на промежутке F2 после пробоя F1 создается разность потенциалов, примерно равная $2U_0$. Это вызовет пробой промежутка F2, т.к. его пробивное напряжение $U_{F2}> U_{F1}$ из-за большего расстояния между электродами $S_{F2}>S_{F1}$.

После пробоя промежутка F2 потенциал *точки* 4 относительно земли станет равным $-2U_0$. Разность потенциалов на промежутке F3 станет примерно $3U_0$, т.к. потенциал *точки* 5 сохраняется неизменным и практически равным U_0 . В результате происходит пробой промежутка F3.

Проведя аналогичные рассуждения, можно убедиться, что произойдет практически мгновенный пробой всех последующих промежутков. При пробое промежутков $F1...F_n$ все конденсаторы, заряженные до напряжения U_0 , окажутся соединенными последовательно через искровые промежутки, минуя зарядные сопротивления. Следовательно, напряжение между точками 0 и 21 станет равно: $U_c = -nU_0$, а суммарная (разрядная) емкость $C_c = C/n$ станет в «п» раз меньше емкости одной ступени генератора импульсного напряжения (рисунок 38).



Рисунок 38 – Конфигурация схемы генератора Маркса после пробоя всех воздушных промежутков (вверху) и эквивалентная схема (внизу)

Достаточно полная схема замещения разрядного контура ГИН представлена на рисунке 39. В этой схеме: C_1 -емкость генератора в разряде; R_1 -суммарное активное сопротивление разрядной епи генератора; L_1 и L_2 -индуктивности элементов генератора и петли подсоединения объекта, R_2 -сумма сопротивлений разрядного контура и фронтового сопротивления для регулирования r ительности фронта импульса; C_2 –сумма емкости объекта C_n , паразитной емкости генератора C_n и фронтовой емкости C_{ϕ} для регулирования длительности фронта импульса; R_n - сумма сопротивления R_0 и разрядного сопротивления R_p .



Рисунок 39 – Схема замещения разрядной цепи

Индуктивность разрядной схемы ГИН L_1 составляет десятки-сотни мкГн, R_1 единицыдесятки Ом из-за большого числа последовательно соединенных элементов. Это приводит к ограничению тока в контуре и искажению формы импульса. Для уменьшения L_1 и R_1 используют минимальные по длине соединительные провода, уменьшают расстояния между электродами воздушных промежутков, используют малоиндуктивные конденсаторы. На форму выходного сигнала также оказывает влияние паразитная емкость ГИН C_n .

Собственные параметры генератора R_I , L_I и C_n можно рассчитать из осциллограмм после опытов холостого хода (по осциллограмме напряжения) и короткого замыкания (по затуханию кривой тока). Период колебания в контуре зависит от активного и реактивного сопротивления.

3.2.3 Трансформатор Льюиса

Для получения импульсов напряжения с амплитудой до нескольких сот киловольт и дли-7 :льностью в десятки наносекунд и менее применятся импульсный трансформатор (трансформа-7)р Льюиса [46]). Оно состоит из *n* отрезков линий (обычно используются отрезки коаксиальных линий), соединенных на входе параллельно, а на выходе последовательно (рисунок 40).



Рисунок 40 – Импульсный трансформатор с использованием отрезков коаксиальных кабелей

Импульс напряжения, поданный на вход трансформатора, через время $t = \frac{l}{\upsilon}$ (l – длина линий, v – скорость распространения волны), достигает входа трансформатора. Если на выходе включена нагрузка $R_n = nZ_0$, то амплитуда выходного напряжения при отсутствии искажения увеличится в n раз по сравнению с входным:

$$U = 2U_0 n \frac{R_n}{R_n + nZ_0} \tag{8}$$

Чтобы уменьшить частотные искажения трансформируемого импульса и повысить коэффициент трансформации вплоть до идеального m=n, вход трансформатора должен отделяться от его выхода большими по величине развязывающими импедансами. Для этого линии трансформатора сворачивают в катушки с большой индуктивностью и малой входной емкостью. Для повышения коэффициента трансформации необходимо также уменьшать емкостные и индуктивные связи между катушками, поэтому они выполняются с неравномерным шагом намотки и по возможности размещаются далеко друг от друга. Для увеличения индуктивности также можно использовать сердечники из магнитных материалов.

Достоинством таких трансформаторов является равномерное распределение напряжения по линиям на выходе схемы и малая величина паразитных параметров (по сравнению с импульсными трансформаторами на магнитных сердечниках).

Как видно из представленных выше описаний традиционно применяемых схем для формирования высоковольтных импульсов короткой длительности достаточно сложны и не всегда удовлетворяют требуемым параметрам. Как правило напряжения, получаемые посредством подобных с хем на порядки превышают требуемые значения. ниже представлены варианты разработанных с сем на основе современной элементной базы.

3.3 Разработка возможных вариантов электронной схемы

Для формирования управляющих импульсов с требуемыми параметрами необходимо увеливать рабочую частоту переключений силовых ключей, традиционно используемых в подобных схемах. Рост частоты коммутации дополнительно позволит уменьшить номиналы индуктивностей и емкостей, а значит, и использовать компоненты меньших размеров. Вместе с тем увеличение скорости переключения приведет к росту динамических потерь. По этой причине необходимо выирать оптимальные силовые транзисторы с учетом особенностей конкретного применения. Для устройств с высокими рабочими напряжениями более 200 В и низкими рабочими частотами приго считать оптимальными относительно медленные БТИЗ-транзисторы [43]. Они имеют малые потери проводимости, но значительные потери на переключение. В сегменте устройств с низкими рабочими напряжениями оптимально использовать МДП-транзисторы (MOSFET). Они уступают гГИЗ по удельной мощности, но имеют меньшие потери на управление и на переключение. В сегменте с рабочими напряжениями до 650 В и высокими рабочими частотами БТИЗ оказываются малоэффективными из-за высокой частоты коммутации. В то же время и обычные кремниевые MOSFET демонстрируют не всегда удовлетворительные результаты. По этой причине достаточно перспективными в настоящий момент являются нитрид-галлиевые транзисторы [43].

В настоящее время выпускаются нитрид-галлиевые (IGBT) транзисторы с рабочим напряжением до 850 В и рабочими частотами 200 кГц и выше. В итоге, они занимают тот сегмент, в котором даже MOSFET оказываются бессильными. Для кремниевых ключей частота коммутаций в таких случаях обычно не превышает 150 кГц.

Было промоделировано несколько вариантов схем, использующих в качестве ключевого элемента биполярный транзистор (рисунок 41), полевой транзистор (рисунок 42), IGBT – транзистор (рисунок 43). В качестве программного продукта выступал пакет NI Multisim (13.0).



Рисунок 41 – Моделирование схемы на биполярном транзисторе



Рисунок 42 – Моделирование схемы на полевом транзисторе



Рисунок 43 – Моделирование схемы на IGBT - транзисторе

Во всех трех вариантах схем в качестве источника выбран источник прямоугольных импульов, который имитирует исходный управляющий сигнал. На всех трех схемах TV1 – согласующий и мпульсный ферритовый высокочастотный трансформатор. Выполняет роль согласования и масгабирования. Одновременно защищает выход генератора импульсов от аварийных ситуаций. Uenoчка C1-VD1 защитно-демпфирующая. Предотвращает самовозбуждение колебаний. Диоды D2 (где имеются) – защищают от пробоя транзисторы самоиндукцией. TV2 – повышающий выходной транзистор. Сопротивление R1 имитирует нагрузку. Цепь 4 выходная и выбрана для отслеживания параметров выходного импульса. Транзисторы и диоды были отредактированы из ревных высоковольтных моделей таким образом, чтобы не учитывался максимальный ток и чапряжение пробоя.

Результаты моделирования можно увидеть на рисунках 44 – 46 [47].

PolotskSU



Рисунок 44 – Анализ переходных процессов для схемы с биполярным транзистором



Рисунок 45 – Анализ переходных процессов для схемы с полевым транзистором



Рисунок 46 – Анализ переходных процессов для схемы с IGBT - транзистором

На всех тех графиках обозначен интервал интересующего напряжения – более 1000В. Полученные результаты:

- биполярный транзистор Ти= 19,6 нс;
- полевой транзистор Ти= 52,7 нс;
- IGBT транзистор Ти= 0,91 нс.

Таким образом, полученные результаты показывают перспективность IGBT-транзистора в качестве высоковольтного ключа.

Результаты моделирования показали возможность формирования импульсов напряжения на нагрузке с амплитудой до 1000 В, длительностью фронтов до 5 нс и длительностью импульса порядка 20 нс для схемы с биполярным транзистором, порядка 55 нс для схемы с полевым транзистором и порядка 1 нс для схемы с IGBT-транзистором.

На рисунке 47 приведены осциллограмма формируемого импульса и внешний вид импульсного генератора.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной работе проведен анализ возможных способов повышения первеанса плазменных источников электронов при высоких и низких ускоряющих напряжениях. Предложены лектродные структуры плазменных источников электронов, реализующие различные способы эвышения первеанса. Изготовлены экспериментальные макеты этих источников на основе разрятов в скрещенных $E \times H$ полях, обеспечивающих высокую степень ионизации газа и плотность э иссии электронного тока. проведены предварительные испытания этих макетов источников высокоэнергетичных и низкоэнергетичных электронных пучков. В результате проведенных испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Наряду с известными способами, повышающими переключение электронного тока из плазмы в ускоряющий промежуток (эмиссионного тока) в источниках, существенное повышение эрвеанса плазменных источников как высокоэнергетичных так и низкоэнергетичных пучков обеспечивается заполнением ускоряющего электроны промежутке ионами, компенсирующими о у́ъемный заряд электронного пучка.

2. В источниках, формирующих высокоэнергетический электронный пучок, реализация этого принципа (см. пункт 1) возможна в триодной структуре ускоряющего промежутка, содеращей дополнительный электрод с отрицательным потенциалом при импульсном режиме пучка. В паузах между импульсами электронного тока отрицательный управляющий электрод обеспечивает ионную эмиссию в область между эмитирующей плазмой и управляющим электродом. При снятии отрицательного потенциала с управляющего электрода эмиссия электронов осуществляется в ускоряющий промежуток, заполненный объемным ионным зарядом. Триодная структура ускоряющего промежутка позволяет также формировать импульсы электронного пучка длительностью до (1...2)·10⁻⁷ с, что практически невозможно реализовать другими известными способами модуляции тока пучка электронов в плазменных источниках электронов.

3. Для импульсной системы электропитания управляющего электрода триодной структуры ускоряющего промежутка возможно применение не только известных схем построения генераторов коротких высоковольтных импульсов, но и систем на основе современной элементной базы, что значительно упрощает их применение, снижает массогабаритные характеристики таких систем.

4. Для повышения первеанса плазменных источников электронов в непрерывном режиме целесообразно использовать ускоряющий электрод в виде плазменной поверхности, которая ускоряет электроны и, одновременно, эмитирует ионы в ускоряющий электроны промежуток. Для этого ускоряющий электрод должен быть элементом электродной газоразрядной структуры, формирующей плазму. Между эмитирующей электроны плазмой и плазмой ускоряющего электрода

формируется двойной электрический слой с высоким первеансом для ускоряемого электронного учка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ионно-плазменные технологии в электронном производстве / В. Т. Барченко [и др.]; под общ. ред. Ю. А. Быстрова. – СПб. : Энергоатомиздат, 2001. – 332 с.

Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.

Ремпе, Н.Г. Промышленное применение электронных пушек с плазменным катодом / Н.Г. Ремпе // Плазменная эмиссионная электроника : тр.II Междунар. сем., Улан-Уде, 17-24 июня 2006 г. / БНЦ СО РАН. – Улан-Уде, 2006. – С. 108–112.

Окс, Е. М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / Е. М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

- Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронноионно-лучевые, ультразвуковые / А. П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : Бестпринт, 2009. – 199 с.
- Источники электронов с плазменным эмиттером / И. В. Свадковский [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2002. 214 с.
- 7. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / Ю. Е. Крейндель [и др.]; под общ. ред. Ю. Е. Крейнделя. Новосибирск : Наука, 1983. 120 с.
- Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Уде: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. – 207 с.
- Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж. М. Поут [и др.] под общ. ред. Дж. М. Поута; пер. с англ. Н.К. Мышкин [и др.] под общ. ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
- Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В.А. Груздев [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2004. – №9 – С. 25 – 32.
- Белюк, С.И. Промышленное применение электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Изв. ВУЗов. Физика. 2001. Т. 44, № 9. С. 77 84.
- Поболь, И.Л. Применение электронно-лучевых технологий этап решения проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом /И.Л. Поболь // Вестник ПГУ. Сер В., Промышленность. Приклад.науки. 2014. №3. С.35-42
- Физика и технология плазменных эмиссионных систем / под общ. ред. В. Т. Барченко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 286 с.

Залесский, В. Г. Эмиссионные и электронно-оптические системы плазменных источников электронов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.04 / В. Г. Залесский. – Минск, 2015. – 316 л. Москалев, Б.И. Разряд с полым катодом / Б.И. Москалев. – М.: Энергия, 1969. – 184 с. Петрович, О.Н. Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС ПИЭЛ / О.Н. Петрович, В.А. Груздев // Прикладная физика. – 2012. – № 2. – С. 79 – 85.

- Свешников, В.М. Моделирование ЭОС с плазменным эмиттером на основе метода декомпозиции расчетной области / В.М. Свешников, В.Г. Залесский, О.Н. Петрович // Прикладная физика.– 2012. – № 2. – С.40 – 44.
- Антонович, Д.А. Электронно-ионный источник для реализации комбинированного воздействия на поверхность / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам.науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
- Антонович, Д.А. Применение низкоэнергетичных пучков заряженных частиц для реализации комбинированного воздействия на материалы / Антонович Д.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н.// Сборник материалов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении». Новополоцк, 2015. – С. 14-16.
- Антонович, Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестник ПГУ. Сер С., Фундам.науки. – 2016. – №12. -С.37-44
- Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 Сер. С: Фундаментальные науки. 2017. №4 С. 45–51
- Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- 23. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. І / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ.
 − 1986. Т. 56, вып. 1. С. 66 70.
- 24. Плазменный эмиттер электронов с сеточной стабилизацией. ІІ / А.В. Жаринов [и др] // ЖТФ. – 1986. – Т. 56, вып. 4. – С. 687 – 693.
- V. G. Zalesski, D.A. Antonovich. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures J. Phys. D, Appl. Phys. 2007. № 40. P. 7771–7777.
- V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev. Universal plasma electron source. – Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399–405.
- Антонович, Д.А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д.А. Антонович, В.А. Груздев, В.Г. Залесский // Вестн. Полоц. гос.ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. 2008. № 9. С.114 123.
- 28. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда Долгопрудный : Интеллект, 2009. 736 с.

- 29. 20. 31. **2**3. 31. **2**3. 31. 5. 5. 5. 3. 37.
- Груздев, В. А. Плазменный источник электронов с изолированным эмиттерным электродом/ В.Г. Залесский, И.С. Русецкий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 61–67.
- Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // ИФЖ. – 2002. – Т. 75, № 3. – С. 166–170.
 - Груздев, В.А. Физические процессы формирования электронных пучков в плазменных источниках. / В.А. Груздев, В.Г. Залесский// Вестник Полоцкого госуниверситета. Сер. С: Фундаментальные науки.-2007.-№9.-с.2-14.
 - Груздев, В.А. О роли плазменных электронов в формировании газоразрядной плазмы / В.А. Груздев, В. Г. Залесский, И.С. Русецкий // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 64 72.
 - Молоковский С.И., Сушков А.Д. Электронно-оптические системы приборов СВЧ. Л., «Энергия», 1965.
- Чен, Ф. Введение в физику плазмы / Ф. Чен. М.: Мир, 1987. 398 с.
- Силадьи М., Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. М.: Мир, СЗб 1990. 639 с.
- Груздев, В.А. Плазменный ионно-электронный источник// В. Г. Залесский, П.Н. Солдатенко/ Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.
- ООО «Тор» Elcut, Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Версия 5.10 / Руководство пользователя -2012.
- Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков: сб. науч. тр. / науч. ред. Г.А. Месяц. – Новосибирск. – Наука, 1976. – 191 с.
- 39. Galansky, V L. Physical processes in plasma electron emitters based on a hollow-cathode reflected discharge / V L Galansky [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27. – P. 953 – 961.
- 40. Антонович Д.А. Разработка концепции и опытных образцов плазменных источников электронов для технологических целей / ДА Антонович, АВ Груздев Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, 2018, № 4. С. 119-123
- Antonovich D.A. Plasma emission systems for electron and ion-beams technologies / D.A. Antonovich, V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, I.L. Pobol, P.N. Soldatenko // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes) v. 21 is. 2. P 143-159.
- 42. Райзер, Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов / Ю.П. Райзер. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1980. 416 с
- 43. Справочник по транзисторам [Электронный ресурс] / Электронный портал. Datasheets Режим доступа http://kazus.ru/guide/transistors/ Дата доступа 09.09.2017
- 44. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Книга 3. Преобразователи напряжения. М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2007. 192 с.

Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Советское радио, 1974. – 213 с.

Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004.-704с.

Абраменко С.Н. Формирование наносекундных импульсов тока пучка в плазменных эмиссионных системах на основе разряда в скрещенных Е×Н полях / С.Н. Абраменко, Д.А. Антонович, В.А. Груздев // Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – № – С. 17-22.