

На правах рукописи



Чан Ван Ту

**ФОРВАКУУМНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЛЕНТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОЙ
МОДИФИКАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Климов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Шаркеев Юрий Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики наноструктурных биоконструктов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Каменецких Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории пучков частиц, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ.

Защита состоится 28 июня 2022 г. в 15 ч 30 мин на заседании диссертационного совета 24.2.415.03 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/wzkwh6f8>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Акулиничев Ю.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Источники широкоапертурных электронных пучков находят применение в технологиях обработки поверхности материалов в широком диапазоне давлений – вплоть до атмосферного. Сочетание большой площади поперечного сечения и высокой плотности мощности позволяет сконцентрировать энергию пучка в относительно тонком поверхностном слое и провести нагрев, плавление и, если требуется, испарение материала. Кроме непосредственного воздействия электронов пучка на облучаемую поверхность, возможно использование формируемой таким пучком плазмы для ее обработки. В этом случае целесообразнее применять ленточные электронные пучки, представляющие собой в поперечном сечении протяженную ленту с отношением сторон более чем 10:1. При распространении ленточного электронного пучка за счет ионизации молекул газа формируется пучковая плазма с конфигурацией «плазменного листа» большой площади (порядка 1 м²). Эта пучковая плазма является неравновесной и применяется для осуществления плазмохимических реакций. Поскольку оптимальный диапазон давлений для таких реакций составляет единицы и десятки паскалей, то предпочтительно использование так называемого форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка, способного эффективно функционировать в области давлений форвакуумного диапазона (1–100 Па) и создавать пучковую плазму с высокой плотностью. Повышенное значение концентрации пучковой плазмы способствует компенсации отрицательного заряда электронов пучка, бомбардирующих непроводящую поверхность, что открывает возможности непосредственной обработки непроводящих материалов (керамики, полимеров и др.).

В источниках ленточных электронных пучков однородность распределения плотности тока по сечению пучка определяет однородность плотности пучковой плазмы и обеспечивает возможность обработки поверхности большой площади. Известно, что в форвакуумной области давлений обратный ионный поток, величина которого может достигать 10–20 % от тока электронного пучка, существенно влияет на ионизационные процессы в катодной полости и тем самым на однородность распределения плотности тока пучка. Ослабление влияния ионного потока может повысить стабильность и однородность ленточного электронного пучка, однако детальные исследования в этом направлении не проводились.

Для протяженного прямоугольного полого катода, используемого в форвакуумных плазменных электронных источниках, в отличие от катодов цилиндрической конфигурации, пороговый ток инициирования эффекта полого катода должен определяться размерами катодной щели, то есть ее шириной и длиной. Однако влияние размеров катодной щели на процессы зажигания разряда в катодной полости до настоящего времени не исследовано.

Не рассмотрен до сих пор вопрос влияния обратного ионного потока, ускоренного до полного высокого напряжения, на тепловую нагрузку электродов электронного источника, главным образом эмиссионного электрода. Кроме того, недостаточно полно изучено влияние продолжительности работы источника, протяженности участка транспортировки электронного пучка на однородность

распределения плотности тока пучка и концентрации пучковой плазмы, а следовательно, на пучково-плазменную обработку материалов.

Таким образом, задача инициирования эффекта полого катода в источнике с протяженным катодом, повышения ресурса электронного источника при сохранении однородности электронного пучка, а также применения форвакуумного плазменного источника для обработки больших поверхностей представляется актуальной, поскольку ее решение расширит область применения форвакуумных плазменных электронных источников и электронно-лучевых устройств в целом.

Цель работы – проведение комплекса исследований, связанных с усовершенствованием форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов и направленных на создание условий для устойчивого зажигания и стабильного горения плазмообразующего разряда, генерации однородной эмиссионной плазмы, повышения равномерности распределения плотности тока электронного пучка, сохранения работоспособности электронного источника в течение длительного времени, а также его использования для пучково-плазменной модификации диэлектрических изделий с развитой поверхностью.

Основные задачи диссертационной работы:

- исследование особенностей процесса инициирования в форвакуумной области давлений эффекта полого катода в разрядно-эмиссионной системе с прямоугольным протяженным полым катодом;
- исследование влияния многоапертурной системы извлечения на процессы эмиссии электронов из плазмы, формирования и ускорения ленточного электронного пучка, а также на однородность распределения плотности тока пучка;
- оптимизация конструктивных элементов разрядной и эмиссионно-ускорительной систем форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов, обеспечивающая повышение ресурса устройства;
- демонстрация возможности применения ленточного электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником, для создания пучковой плазмы и ионно-плазменной модификации диэлектрических материалов.

Научная новизна

1. Для тлеющего разряда с протяженным прямоугольным полым катодом выявлены особенности и определены условия инициирования эффекта полого катода в форвакуумной области давлений.
2. Исследовано влияние процессов формирования, ускорения и транспортировки ленточного электронного пучка на однородность распределения плотности тока пучка. Предложены решения, приводящие к сглаживанию неоднородностей плотности тока пучка.
3. Изучено влияние потоков ионов из пучковой плазмы и режимов обработки на параметры и поверхностные свойства полимерных материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Результаты проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание физических процессов инициирования эффекта полого катода

в системах тлеющего разряда с протяженным полым катодом, функционирующих в области давлений газа форвакуумного диапазона.

2. Разработана конструкция ускоряющего узла форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов, обеспечивающая снижение тепловой нагрузки на электроды извлекающей системы и повышение однородности плотности тока ленточного электронного пучка.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в других разрядных устройствах (плазменных ионных источниках, генераторах низкотемпературной плазмы), функционирующих в области рабочих давлений форвакуумного диапазона.

Методология и методы исследования

Основная методика, использованная при выполнении диссертационной работы, сочетала экспериментальные исследования с численным моделированием. Для решения поставленных задач применялись следующие многократно апробированные экспериментальные методики:

- зондовая и оптическая диагностика параметров плазмы;
- зондовая диагностика параметров электронного пучка;
- оптическая микроскопия;
- растровая электронная микроскопия и энергодисперсионный анализ;
- инфракрасная спектроскопия.

Положения, выносимые на защиту

1. В тлеющем разряде с прямоугольным полым катодом пороговый ток инициирования эффекта полого катода, связанного с разрывом катодного слоя и проникновением разрядной плазмы в полость, уменьшается при увеличении протяженности катодной щели. Это обусловлено обострением неоднородности параметров плазмы вдоль щели по мере увеличения ее длины и появлением резких максимумов плотности плазмы на краях щели или в центре. В случае узкой катодной щели, для которой условие разрыва катодного слоя по ее ширине заведомо не выполняется, эффект полого катода наблюдается лишь на длине катодной щели, в 10–20 раз превышающей протяженность катодного слоя.

2. В форвакуумном плазменном источнике ленточного пучка электронов на равномерность распределения плотности тока по поперечному сечению электронного пучка вместе с однородностью параметров эмиссионной плазмы оказывает также влияние величина ускоряющего напряжения и протяженность области транспортировки пучка – параметры, определяющие процессы генерации пучковой плазмы. Обратный ионный поток из пучковой плазмы кратно усиливает локальную неоднородность эмиссионного тока, приводя в предельном случае к расслоению ленточного пучка на отдельные струи. Использование в электронном источнике протяженной многоапертурной системы формирования и ускорения электронного пучка ослабляет влияние ионного потока и обеспечивает снижение неравномерности плотности тока электронного пучка до 15 %.

3. Распространение ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений сопровождается генерацией протяженной пучковой невозмущенной плазмы с концентрацией до 10^{16} м^{-3} и температурой электронов 1–3 эВ. Облучение поверхности полимерных материалов потоками ионов из такой плазмы

приводит к снижению краевого угла смачиваемости поверхности в 3 раза и коэффициента пропускания света на 30 % в ультрафиолетовой области спектра. Несмотря на некоторое снижение гидрофильных свойств в первые 24 часа после воздействия они остаются на достаточно высоком уровне в течение продолжительного промежутка времени – более 3 месяцев.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным совпадением расчетных зависимостей и моделей с полученными экспериментальными данными и величинами, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного плазменного электронного источника ленточного электронного пучка для обработки полимерных материалов.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 4 статьях в российских и международных изданиях, предназначенных для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты исследований по диссертационной работе представлены в виде 10 полнотекстовых докладов в сборниках международных и всероссийских конференций, 4 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (г. Томск, 2019, 2021); конгрессе по энергетическим потокам и радиационным эффектам (г. Томск, 2020); международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2021); международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2019, 2021); международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2019 – 2021).

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. Автором совместно с А.А. Зениным сконструированы и собраны многоапертурная система извлечения, зонд для измерения плотности тока пучка, оснастка для пучково-плазменной обработки полимеров. Автором совместно с научным руководителем определены задачи, решаемые в работе, выбраны методики эксперимента и проведен анализ полученных в ходе экспериментов результатов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждении результатов анализа экспериментальных данных принимали участие И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин и Е.М. Окс.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения, изложена на 125 страницах, содержит 90 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 140 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели, задачи, научная новизна, научная и практическая значимость работы. Излагается краткое содержание диссертации, формулируются выносимые на защиту научные положения.

Первая глава «Формирование электронных пучков плазменными источниками на основе разряда с полым катодом» носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы сведений о способах инициирования разряда с полым катодом в плазменных источниках электронов, об особенностях получения ленточных электронных пучков в форвакуумной области давлений, о формировании пучковой плазмы и возможностях ее применения. Рассмотрены способы повышения однородности электронного пучка в источниках электронов на основе разряда с полым катодом различных конфигураций. Приведены примеры использования многоапертурной системы извлечения в широкоапертурных источниках ионных пучков для повышения однородности извлекаемого тока. В заключение главы сформулированы задачи исследования.

Вторая глава «Техника и методика эксперимента» содержит описание экспериментальных методик и оборудования, используемых для генерации и исследования электронных пучков в форвакуумной области давлений. Представлена модернизация разрядной и эмиссионной систем форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов на основе разряда с протяженным полым катодом, обеспечивающая возможность варьирования геометрии полого катода, эмиссионного окна в аноде и выходного окна в экстракторе (рисунок 1).

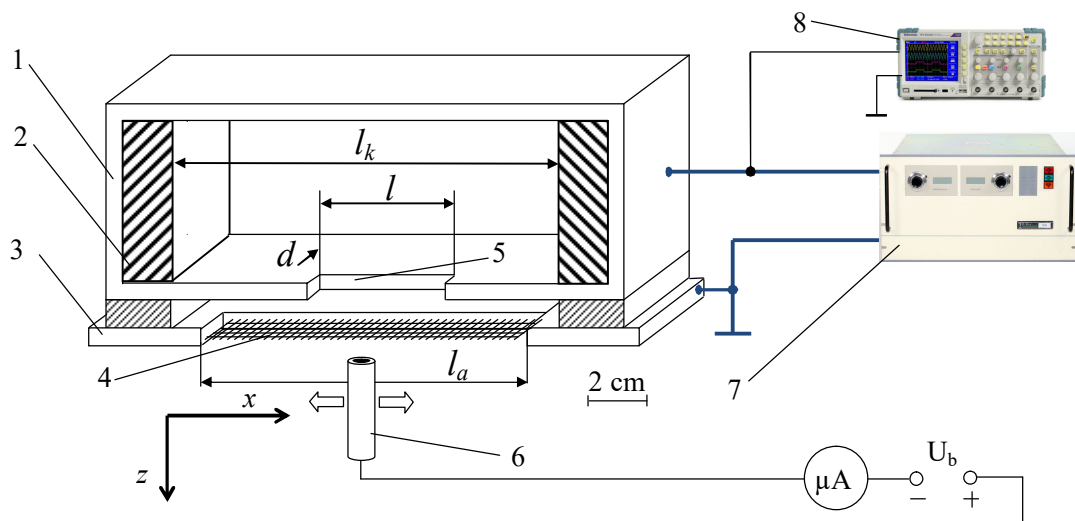


Рисунок 1 – Разрядно-эмиссионная система источника электронов:

- 1 – полый катод; 2 – вставки; 3 – анод; 4 – эмиссионная решетка; 5 – катодная щель;
6 – ленгмюровский зонд; 7 – источник питания разряда; 8 – осциллограф

Приводится описание оборудования, созданного для измерения параметров разрядной и пучковой плазмы, а также электронного пучка. Для измерения параметров плазмы используется как зондовая, так и спектроскопическая методика. Подобрано экспериментальное оборудование и отлажены методики

исследований поверхностных свойств полимеров после пучково-плазменной обработки.

В третьей главе «Формирование ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений» представлены результаты исследований процессов функционирования тлеющего разряда с протяженным полым катодом. Получены зависимости напряжения зажигания и горения разряда от тока разряда, геометрии катодной полости, давления и рода газа. Показано влияние геометрических размеров эмиссионного окна в аноде на однородность плотности тока электронного пучка.

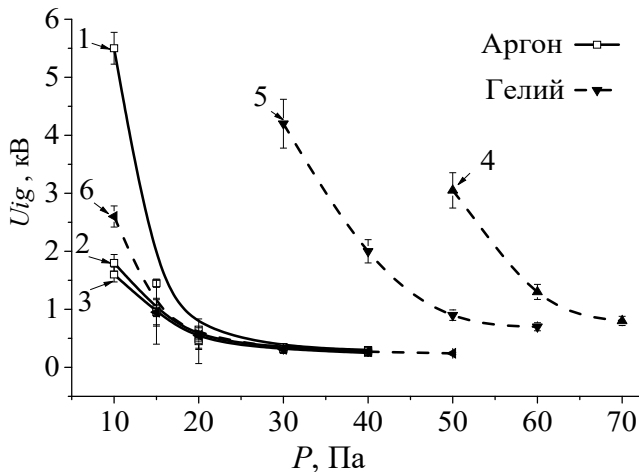


Рисунок 2 – Зависимость напряжения зажигания U_{ig} от давления и различных длин полостей l_k для аргона (1, 2, 3) и гелия (4, 5, 6). Длина катодной полости: 1, 4 – 3 см; 2, 5 – 15 см; 3, 6 – 28 см

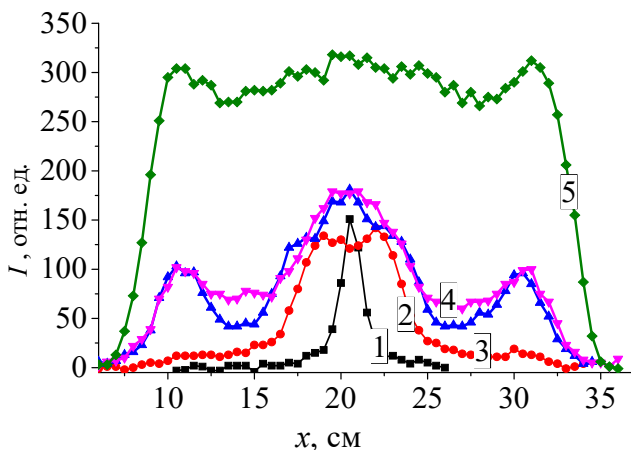


Рисунок 3 – Интенсивность свечения плазмы аргона вдоль катодной полости при различных токах разряда: 1 – 2 мА; 2 – 4 мА; 3 – 9 мА; 4 – 12 мА; 5 – 50 мА. Давление 30 Па

Как следует из зависимостей, представленных на рисунке 2, с увеличением длины l_k катодной полости зажигание разряда облегчается. Снижение напряжения зажигания зависит от рода газа. Для зажигания разряда в гелии требуется более высокое напряжение по сравнению с аргоном. Следует также отметить, что при давлениях ниже 10 Па как для аргона, так и для гелия независимо от длины катодной полости напряжение зажигания превышает 10 кВ при типичном значении напряжения горения разряда в несколько сотен вольт. Такая большая разница между напряжением зажигания разряда и напряжением его горения значительно усложняет систему электропитания источника электронов и повышает требования к обеспечению электрической изоляции разрядного промежутка.

Установлено, что однородность разряда зависит от длины полости и от тока разряда. Так, для катодной полости длиной 28 см минимальный ток разряда, обеспечивающий его диффузное горение, составляет примерно 50 мА. При меньших токах разряда в катодной полости вдоль ее длины l_k образуются регулярные области длиной от 1 до 3 см с более высокой концентрацией плазмы (рисунок 3). Неодно-

родность плотности плазмы увеличивается с уменьшением тока разряда и давления газа, и эта неоднородность не позволяет формировать ленточный электронный пучок с высокой однородностью плотности тока.

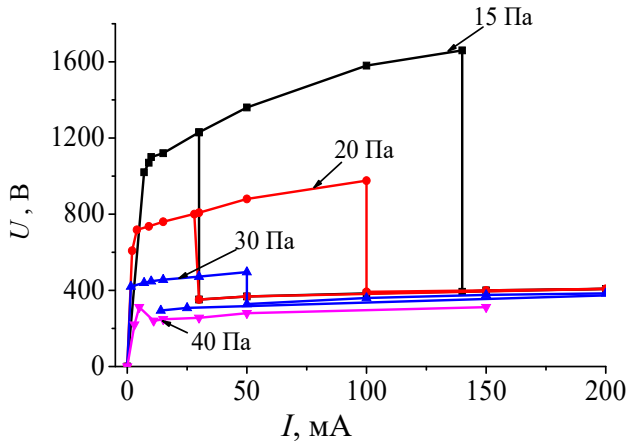


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика разряда в зависимости от давления внутри камеры при ширине щели 1 мм и длине 18 мм

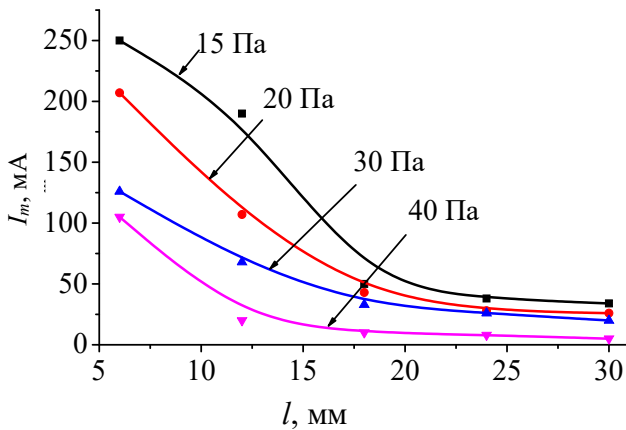


Рисунок 5 – Зависимость порогового тока перехода от длины щели и давления при ширине щели $d = 1,5$ мм

при зажигании разряда между плоскими частями катода и анода. Для более узкой щели требуются токи в сотни миллиампер.

Измерения тока ионов из плазмы на малый коллектор, расположенный за анодной сеткой и перемещаемый вдоль продольной оси разрядной системы, показали, что в отсутствие щели разряд, очевидно, реализуется только в области между торцевой частью полого катода и плоским анодом. В этом случае профиль распределения ионного тока, отражающий в определённой степени распределение плотности плазмы, достаточно однородный (рисунок 6, кривая 1).

При токах разряда ниже пороговых разряд также горит только в области между плоскими электродами. Наличие щели приводит к появлению неоднородности распределения плотности плазмы вдоль протяженного размера полости с выраженным максимумом в центральной части разрядного промежутка (рисунок 6, кривые 2 и 3). Степень неоднородности плотности плазмы заметно

На зажигание разряда в протяженной катодной полости оказывают влияние и геометрические размеры щели в катоде. На рисунке 4 представлена вольт-амперная характеристика разряда для различных давлений газа при протяженности щели в катоде $l = 18$ мм и ее ширине $d = 1$ мм.

При определённом пороговом токе разряда I_m происходит резкое снижение напряжения горения, соответствующее переходу разряда в режим горения с полым катодом. Из представленных на рисунке 4 данных видно, что пороговый ток I_m снижается с повышением давления рабочего газа.

Зависимость порогового тока перехода разряда в режим горения с полым катодом от длины щели l представлена на рисунке 5. Следует отметить, что чем меньше ширина щели, тем большее значение имеет ее протяженность и давление газа. Для ширины щели 2 мм переход разряда в полость имеет место при токах, не превышающих несколько миллиампер, т.е. практически сразу

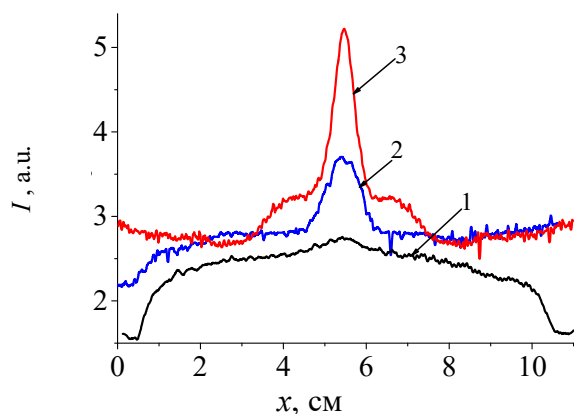


Рисунок 6 – Распределение ионного тока из плазмы: 1 – щель отсутствует; 2 – щель 1×18 мм; 3 – щель 1×36 мм. Ток разряда 10 мА, давление 30 Па, аргон

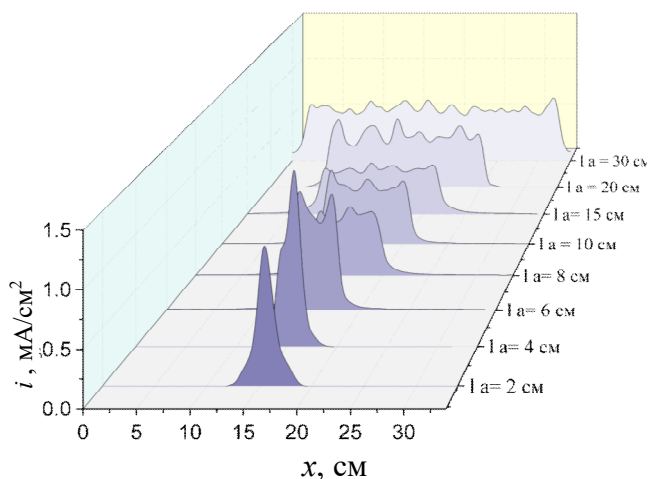


Рисунок 7 – Распределение плотности тока пучка вдоль эмиссионного окна в аноде при различной ширине окна l_a .

Ускоряющее напряжение 2 кВ, ток разряда 400 мА, давление 7 Па

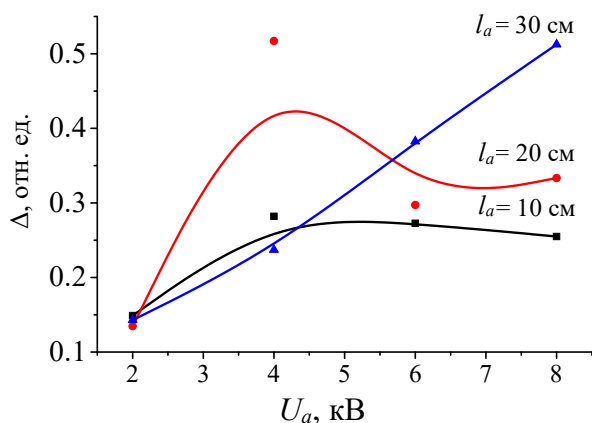


Рисунок 8 – Относительное отклонение от средней величины плотности тока в продольном распределении.

Ток разряда 400 мА, давление 7 Па

повышается с увеличением протяженности катодной щели. Возникающая неоднородность плотности плазмы приводит к утончению катодного слоя в локальной области катодной щели и тем самым стимулирует разрыв в этом месте ионного слоя и инициирование эффекта полого катода.

Исследование влияния геометрии эмиссионного окна в аноде на вид продольного распределения плотности тока пучка показало, что вид распределения зависит от размеров эмиссионного окна в аноде, тока разряда и давления газа. На рисунке 7 представлены распределения тока пучка. При малой ширине эмиссионного окна l_a вид распределения плотности тока подобен гауссову. С ростом ширины окна, начиная с размера 8 см, максимум в распределении практически исчезает и появляется характерное для ленточного пучка плато, содержащее несколько максимумов.

Количество максимумов зависит от ширины эмиссионного окна, а их величина – от ускоряющего напряжения. Повышение ускоряющего напряжения приводит к обострению локальных неоднородностей, положение которых оказывается достаточно постоянным в пределах эмиссионного окна (рисунок 8). Наибольшее отклонение от среднего значения тока наблюдается при ускоряющем напряжении 4 кВ, величина максимумов в распределении при этом достигает 50 % от среднего значения.

Распределение ионного тока на зонд, перемещаемый вдоль эмиссионного окна в аноде, оказалось более

равномерным, чем распределение соответствующей плотности тока. Тот факт, что с ростом ускоряющего напряжения и тока разряда неоднородности усиливаются, а также пространственное совпадение максимумов концентрации плазмы и максимумов в распределении плотности тока указывают на существование зависимости между распределением плазмы вблизи эмиссионного окна в аноде и распределением плотности тока пучка. Возникновение и устойчивое положение неоднородностей в распределении плотности тока можно объяснить на основе образования положительной обратной связи между током пучка и концентрацией эмиссионной плазмы. Первоначальные неоднородности могут возникать за счет незначительного различия в размерах ячеек сетки, а также в связи с ее кривизной на каком-либо участке (ввиду протяженности сетки 30 см это вполне возможно). Неоднородный поток электронов пучка в ускоряющем промежутке приводит к неоднородной ионизации газа и неоднородному потоку ионов из ускоряющего промежутка в разрядную систему электронного источника. Ионный поток движется навстречу электронам пучка и, попадая в разрядную плазму и перезаряжаясь на газовых молекулах, вызывает изменение пространственного заряда в локальной области и рост концентрации разрядной плазмы. Вследствие роста концентрации увеличивается ток пучка и обратный ионный поток – положительная обратная связь. Противоположным фактором является диффузия ионов из области с повышенной концентрацией в остальные участки разряда.

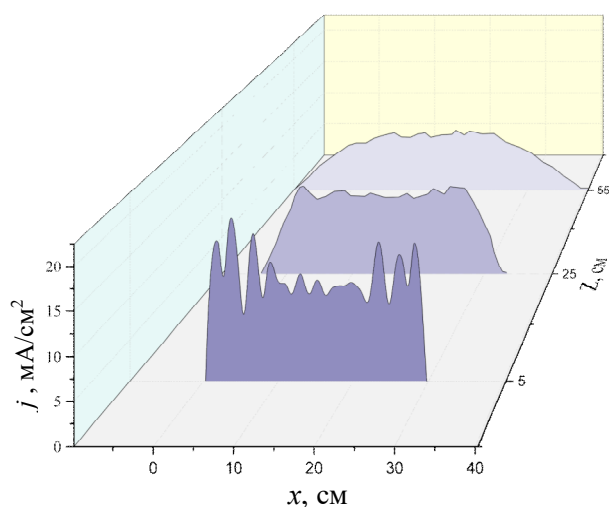


Рисунок 9 – Распределение плотности тока пучка вдоль продольной координаты для различных расстояний Z от электронного источника.

Ток пучка 200 мА, ускоряющее напряжение 6 кВ, давление 25 Па

Наличие неоднородностей в распределении плотности тока можно нивелировать подбором расстояния, на котором будет осуществляться использование электронного пучка. Так, измерение распределения плотности тока вдоль протяженного размера электронного источника показало, что вблизи области эмиссии электронного пучка в газовую атмосферу вакуумной камеры наблюдаются значительные неоднородности (рисунок 9). По мере распространения электронного пучка в газе неоднородности сглаживаются и на расстоянии более 50 см не превышают 10 %.

Исследование влияния многоапертурной системы извлечения на тепловую нагрузку эмиссионного электрода и параметры электронного пучка осуществлялось на установке, изображенной на рисунке 10.

Эксперименты показали, что с ростом ускоряющего напряжения во всем диапазоне изменения расстояния анод–экстрактор ток электронного пучка увеличивается. В то же время увеличение расстояния анод–экстрактор приводит к снижению тока пучка.

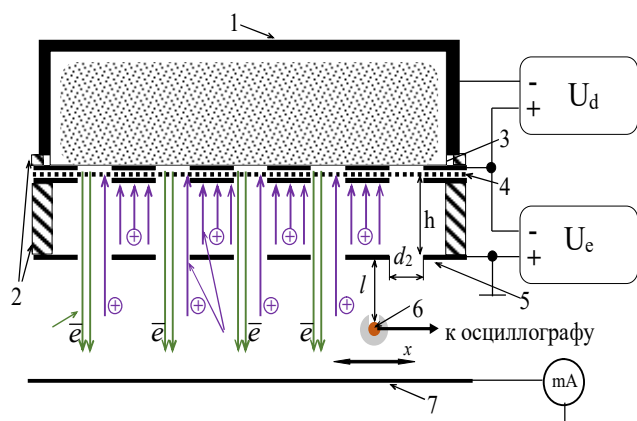


Рисунок 10 – Схема электронного источника с многоапертурной системой: 1 – полый катод; 2 – изоляторы; 3 – анод; 4 – эмиссионная сетка; 5 – экстрактор; 6 – зонд для измерения плотности тока пучка; 7 – коллектор

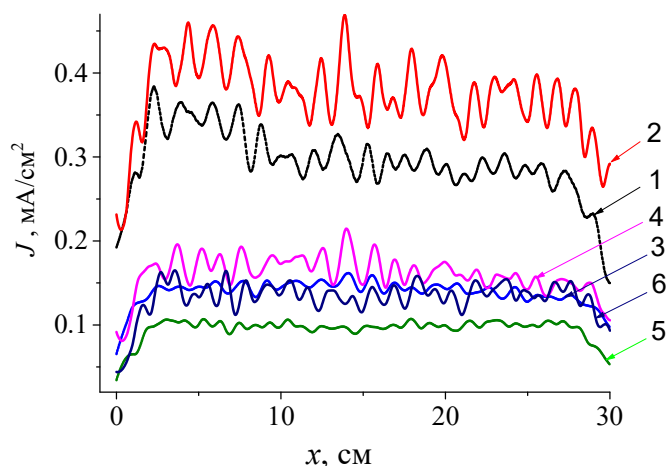


Рисунок 11 – Распределение плотности тока ленточного электронного пучка при расстоянии между анодом и экстрактором: 1, 2 – 2,5 мм; 3, 4 – 5 мм; 5, 6 – 10 мм. Ускоряющее напряжение: 1, 3, 5 – 2 кВ; 2, 4, 6 – 8 кВ

Типичное распределение плотности тока ленточного электронного пучка при разных ускоряющих напряжениях и расстояниях между анодом и экстрактором представлено на рисунке 11.

На рисунке 11 видно, что при увеличении расстояния анод–экстрактор с 2,5 до 5 мм происходит незначительное улучшение однородности распределения плотности тока пучка (сравни кривые 1, 2 и 3, 4). Среднее же значение плотности тока падает почти в два раза. Дальнейшее увеличение расстояния между анодом и катодом до 10 мм негативно сказывается как на однородности распределения плотности тока, так и на средней величине этого тока (см. кривые 5, 6). Также на однородность распределения независимо от расстояния анод–экстрактор влияет ускоряющее напряжение. С повышением ускоряющего напряжения неоднородности усиливаются.

Уменьшение среднего тока пучка при увеличении расстояния анод–экстрактор скорее всего связано с попаданием части электронов пучка на пластину с отверстиями, расположенную в экстракторе. Действительно, с ростом расстояния анод–экстрактор изменяется картина распределения электростатического поля в ускоряющем промежутке, что приводит к изменению траектории ускоренных электронов и их перехвату экстрактором.

Наличие максимумов в распределении плотности тока, очевидно, обусловлено неполным перекрытием элементарных струй тока, эмитированных отдельными ячейками многоапертурной системы. Действительно, повышение ускоряющего напряжения снижает расходимость элементарных струй и приводит к обострению неоднородностей (см. рисунок 11). С увеличением расстояния транспортировки электронного пучка этот эффект ослабляется и однородность улучшается. Так, уже на расстоянии 20 см от экстрактора неоднородность плотности тока электронного пучка не превышает 10 % от ее средней величины.

Однородное распределение сохраняется на всем участке транспортировки пучка вплоть до коллектора, расположенного на расстоянии 50 см от экстрактора.

В четвертой главе «Пучково-плазменная обработка диэлектриков в форвакуумной области давлений» представлены результаты использования форвакуумного плазменного электронного источника для генерации пучковой плазмы и пучково-плазменной обработки диэлектриков. Схема эксперимента показана на рисунке 12.

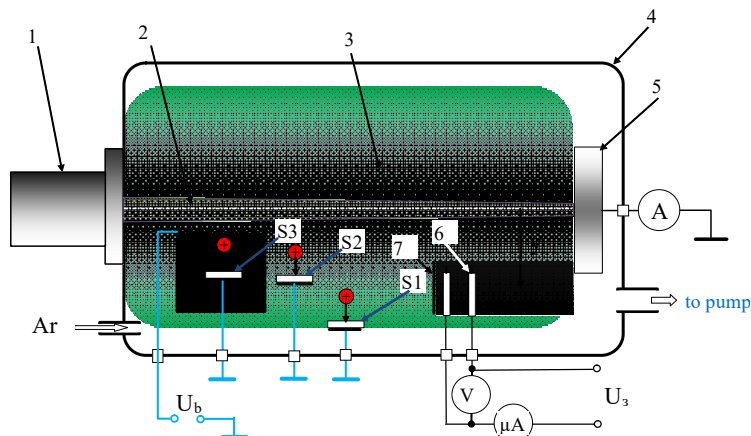


Рисунок 12 – Схема эксперимента: 1 – форвакуумный плазменный источник ленточного пучка; 2 – электронный пучок; 3 – пучковая плазма; 4 – вакуумная камера; 5 – коллектор ионов; 6 – двойной зонд; 7 – защитный экран и извлекающая сетка

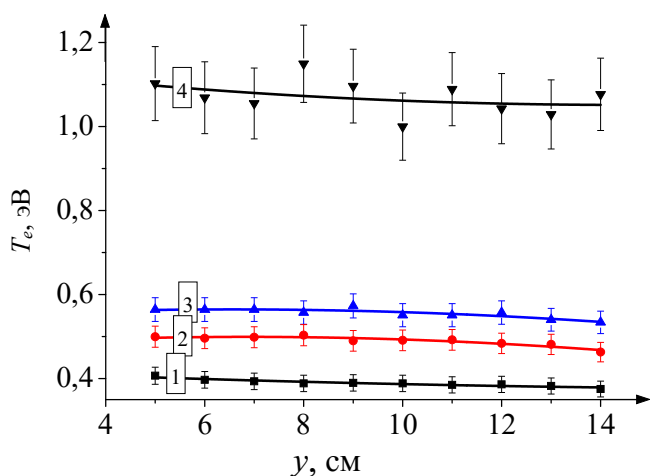


Рисунок 13 – Зависимость температуры плазменных электронов от расстояния до срединной плоскости пучка. Токи пучка: 1 – 80 мА; 2 – 100 мА; 3 – 150 мА; 4 – 200 мА. Ускоряющее напряжение 3 кВ

На примере полипропилена и полиэтилена определена степень влияния режимов обработки на их поверхностные и оптические свойства.

На рисунке 13 видно, что с ростом температуры электронов повышается и ее разброс в пределах одного положения зонда. Установлено, что температура плазменных электронов слабо зависит от положения зонда относительно срединной плоскости электронного пучка. Это может быть полезно при использовании пучковой плазмы для обработки полимерных материалов.

Зависимость концентрации пучковой плазмы от ускоряющего напряжения представлена на рисунке 14. При токах пучка менее 200 мА с ростом ускоряющего напряжения концентрация пучковой плазмы снижается. Это связано с уменьшением сечения ионизации газа электронами пучка, а также со снижением расходимости электронного пучка и его сечения в поперечном направлении. Последнее приводит к ослаблению ионизации газа на периферии пучка.

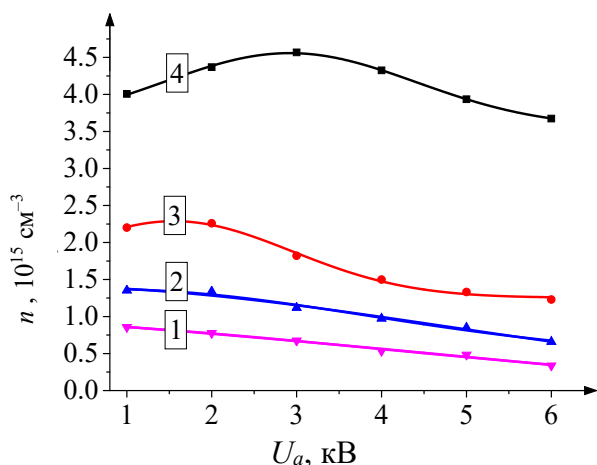


Рисунок 14 – Зависимость концентрации плазмы аргона от ускоряющего напряжения.

Токи пучка: 1 – 80 мА; 2 – 100 мА; 3 – 150 мА; 4 – 200 мА. Расстояние до срединной плоскости пучка 6 см

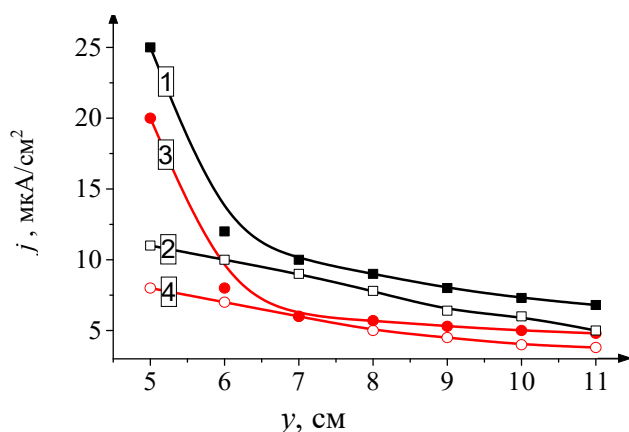


Рисунок 15 – Зависимость ионного тока от расстояния до оси пучка.

Рабочая атмосфера воздух $P = 7$ Па; ускоряющее напряжение 4 кВ и 6 кВ. Смещение на сетке: 1, 3 – минус 100 В; 2, 4 – 0 В. Ток пучка: 1, 2 – 600 мА; 3, 4 – 400 мА

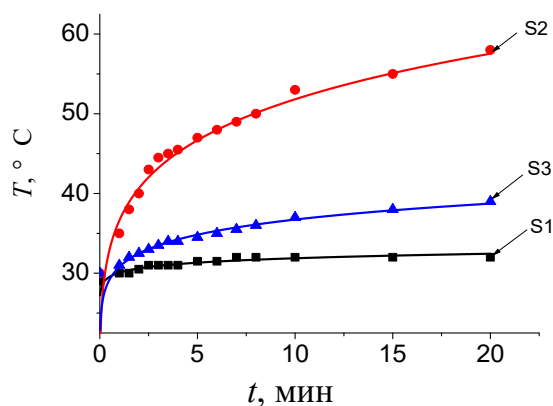


Рисунок 16 – Зависимость температуры образцов S1, S2, S3 от времени обработки

При токах пучка 200 мА и выше наблюдается немонотонная зависимость концентрации плазмы от ускоряющего напряжения. Такая зависимость может быть обусловлена иницированием пучково-плазменного разряда при достижении определенных значений тока пучка и энергии электронов. Режим пучково-плазменного разряда не является стабильным и требует точного поддержания параметров электронного пучка и давления газа для его инициирования. Нестабильность разряда не позволяет использовать его в длительных процессах пучково-плазменной обработки материалов.

На рисунке 15 представлены результаты измерения плотности ионного тока в зависимости от расстояния до срединной плоскости пучка, ускоряющего напряжения и давления.

Плотность ионного тока уменьшается при увеличении расстояния до срединной плоскости пучка, что в условиях форвакуумного диапазона давлений может быть связано с рассеянием ионов на молекулах газа. Снижение тока ионов можно компенсировать подачей отрицательного потенциала на извлекающую сетку. Однако при повышенном давлении и потенциале на извлекающей сетке более 100 В зажигается тлеющий разряд между сеткой и стенками камеры, играющей роль полого катода в этих условиях.

Зависимости температуры образцов от времени их обработки, представленные на рисунке 16, подтверждают правильность выбора параметров электронного пучка.

Как видно из рисунка 16, на нагрев образцов оказывает влияние расстояние до оси пучка. Так, образец S1, расположенный на расстоянии 17 см от оси пучка, нагрелся всего на несколько градусов. Образец S2, расположенный на расстоянии 7 см от оси, нагрелся до температуры более 55 °С. Кроме того, поверхность этого образца после обработки потемнела. Образец S3, расположенный на расстоянии 7 см от оси пучка, но за сеткой, нагрелся только до 37 °С.

Сравнение плазменной и ионной обработки полиэтиленовой пленки проводилось на основании исследования ее структуры, краевых углов смачивания поверхности, а также коэффициента пропускания света. На рисунке 17 представлены фотографии поверхности исходной пленки полипропилена – образец S0, и обработанной пленки – образец S3.

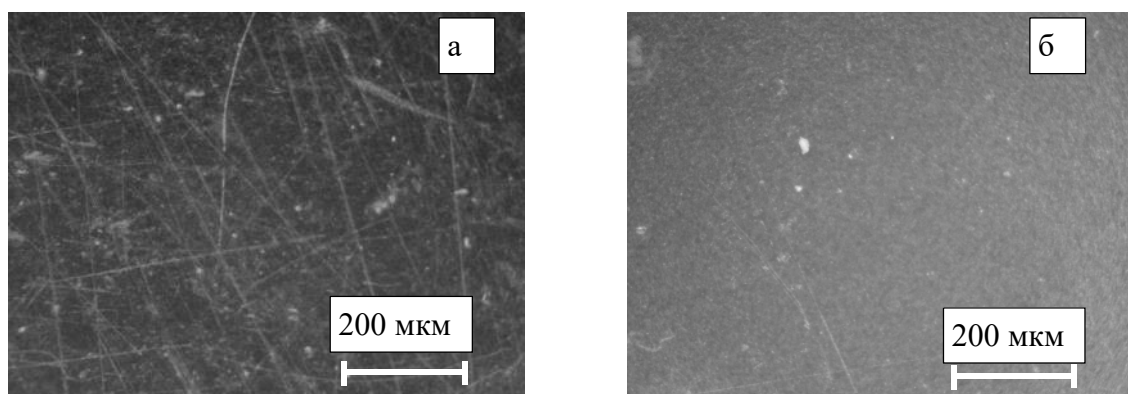


Рисунок 17 – Фотографии поверхности пленки полипропилена:
а – необработанной; б – после пучково-плазменной обработки (образец S3)

Поверхность образца необработанной пленки S0 содержит большое количество линий механических повреждений, что, очевидно, связано с условиями ее хранения и транспортировки. Обработка в плазме приводит к некоторому сглаживанию поверхности в зависимости от концентрации плазмы. Образцы S1 и S2, находящиеся на разном расстоянии от оси пучка и соответственно подвергшиеся

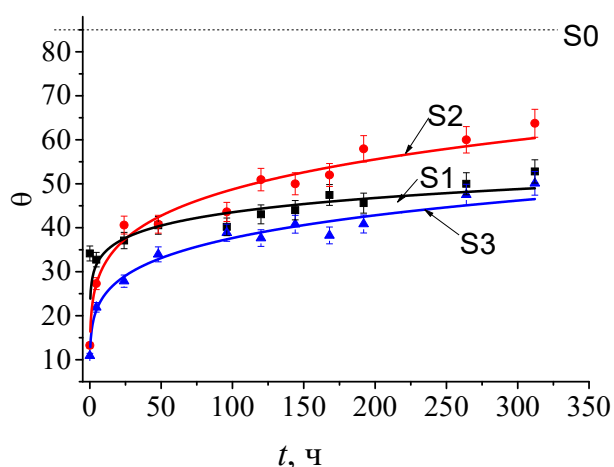


Рисунок 18 – Краевой угол смачивания водой образцов S1, S2, S3 после обработки в течение 20 мин

плазменной обработке с различной интенсивностью, содержали меньшее количество дефектов. Однако за счет нагрева на образце S2 наблюдались продольные полосы вследствие деструкции полимерной пленки. Образец S3, находящийся за извлекающей ионы сеткой, также имел сглаженную поверхность, однако без следов температурной деформации, как на образце S2.

На рисунке 18 представлены зависимости краевого угла смачивания для обработанных образцов.

Необработанный образец S0 имел краевой угол смачивания в диапазоне 85–90 градусов.

Сразу после обработки поверхностные свойства полиэтиленовой пленки изменялись даже у образца S3, размещенного в области редкой плазмы. Для всех трех образцов характерно проявление гидрофильных свойств. Причем у образцов S1 и S2 краевой угол смачивания уменьшился до 10–15 градусов. В течение 48 ч наблюдалось частичное восстановление гидрофобных свойств. У образца, подвергнутого ионной обработке, краевой угол смачивания остается все же ниже и достигает 30 градусов через двое суток. Далее следует медленный рост краевого угла с практически одинаковой скоростью для всех трех образцов. Следует отметить, что полное восстановление гидрофобных свойств у всех обработанных образцов не наблюдалось и по истечении трех месяцев с момента облучения. Индуцированная плазмой и потоками ионов гидрофильность сохраняется в течение длительного времени, что свидетельствует об эффективности такого метода обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В разрядной системе с протяженным прямоугольным полым катодом и плоским анодом, функционирующей в форвакуумной области давлений, на пороговый ток зажигания разряда внутри катодной полости и инициирование эффекта полого катода наряду с известным влиянием давления газа оказывают влияние ширина и длина щели в катоде. При ширине щели меньше протяженности катодного слоя зажигание разряда в полости все же возможно и в этом случае важна длина щели. С увеличением длины катодной щели уменьшается пороговый ток перехода в режим горения разряда с полым катодом, и даже в случае узкой катодной щели, для которой условие разрыва катодного слоя заведомо не выполняется, увеличение длины щели приводит к проникновению плазмы в катодную полость. Для перехода требуется увеличение протяженности щели до значений, в 10–20 раз превышающих протяженность катодного слоя в зависимости от ширины щели.

2. В электродной системе форвакуумного плазменного источника электронов на основе разряда с протяженным полым катодом однородность плотности плазмы в катодной полости зависит от протяженности полого катода, тока разряда и давления газа. Для полости длиной 28 см минимальный ток разряда, обеспечивающий его диффузное горение, составляет порядка 50 мА. При меньших токах разряда в катодной полости вдоль ее длинной стороны формируются регулярные области протяженностью от 1 до 3 см с более высокой локальной плотностью плазмы. Неоднородность плотности плазмы усиливается при уменьшении разрядного тока и снижении давления газа, что не позволяет формировать ленточный электронный пучок с высокой равномерностью плотности тока.

3. В форвакуумном плазменном источнике ленточного пучка электронов использование многоапертурной системы извлечения оригинальной конструкции с диаметром элементарных отверстий 3 мм в аноде и 5,5 мм в экстракторе при расстоянии между анодом и экстрактором 2,5 мм обеспечивает снижение тепловой нагрузки на эмиссионный электрод, что повышает ресурс его работы, а

также снижает потери тока пучка на экстракторе. При давлениях 10–30 Па форвакуумный плазменный источник с многоапертурной системой извлечения позволяет генерировать электронный пучок в виде ленты с поперечными размерами 10×300 мм, протяженностью 50 см, с энергией электронов пучка до 8 кэВ и током до 100 мА.

4. В форвакуумной области давлений в процессе ионно-плазменной обработки низкотемпературных полимеров увеличение тока пучка и соответственно концентрации пучковой плазмы ограничено возникновением пучковой неустойчивости типа пучково-плазменного разряда, приводящей к неконтролируемому росту концентрации плазмы, температуры плазменных электронов и перегреву обрабатываемой поверхности полимера.

5. Обработка полиэтиленовой пленки потоками ионов из пучковой плазмы в форвакуумной области давлений не изменяет химический состав пленки, но позволяет повысить ее гидрофильные свойства. После обработки в течение 20 мин потоком ионов с плотностью тока 0,25 мА/м² краевой угол смачивания водой поверхности полимера снижается до 10 градусов. Гидрофильные свойства снижаются в течение 48 ч, однако остаются на достаточно высоком уровне более 3 месяцев. Наряду с повышением гидрофильных свойств происходит снижение коэффициента пропускания. При этом наибольший эффект наблюдается в ультрафиолетовой области длин волн.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Особенности инициирования эффекта полого катода в электродной системе тлеющего разряда с протяженной катодной щелью / А. С. Климов, И. Ю. Бакеев, А. А. Зенин, Е. М. Окс, **В. Т. Чан** // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 20. – С. 23–26.

2. Plasma electron source for generating a ribbon beam in the forevacuum pressure range / S. Klimov, I. Yu. Bakeev, E. M. Oks, **V. T. Tran**, A. A. Zenin // Review of Scientific Instruments. – 2020. – Vol. 91, № 4. – P. 043505.

3. Characteristics of Low-Pressure Discharge in a Forevacuum Plasma Electron Source Using an Electrode System with Extended Hollow Cathod / S. Klimov, I. Yu. Bakeev, E. M. Oks, **V. T. Tran**, A. A. Zenin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol. 49, № 9. – P. 2544.

4. Forevacuum plasma source of ribbon electron beam with a multi-aperture extraction system / A. Klimov, A. Zenin, **V. T. Tran**, I.Y. Bakeev // Journal of Physics Conference Series. – 2019. – Vol. 1393. – P. 012045.

5. Forevacuum plasma electron source of a ribbon electron beam with a multi-aperture extraction system / A. Klimov, A. Zenin, **V. T. Tran**, I. Y. Bakeev // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 597, № 1. – P.012069.

6. Processing of polyethylene in the beam-plasma generated by a ribbon electron beam at forevacuum pressure range / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, E. M. Oks, **V. T. Tran**, A. A. Zenin // Vacuum. – 2021. – Vol. 196. – P. 110722.

7. Electron-beam plasma and its applications to polymer treatment in the forevacuum / A. S. Klimov, A. A. Zenin, **V. T. Tran**, I. Yu. Bakeev // Journal of Physics: Conference Serie. – 2019. – Vol. 1393. – P .012097.

8. Formation of Particle Flows from a Beam Plasma Generated by a Forevacuum Plasma Electron Source / A. S. Klimov, I. Yu. Bakeev, A. A. Zenin, **V. T. Tran** // Conference: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). – 2020.

9. **Чан В. Т.** Исследование связи параметров эмиссионной плазмы и электронного пучка / **В. Т. Чан** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР-2019. – 2019. – Т. 1. – С. 115–117.

10. **Чан В. Т.** Особенности зажигания тлеющего разряда через малое отверстие в полем катоде большого объема / **В. Т. Чан**, А. А. Поддубнов, А. С. Климов // Перспективы развития фундаментальных наук. – 2021. – Т. 1. – С. 125–127.

11. Поддубнов А. А. Особенности зажигания разряда через узкую протяженную щель в катоде большого объема / А. А. Поддубнов, А. С. Климов, **В. Т. Чан** // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР-2021. – 2021. – Т. 1. – С. 201–203.

12. Поддубнов А. А. Особенности генерации пучковой плазмы для обработки полимеров в форвакуумной области давлений / А. А. Поддубнов, **В. Т. Чан**, А. С. Климов // Материалы докладов XV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – 2019. – Т. 84.– С. 173–175.

13. **Чан В. Т.** Особенности пучково-плазменной обработки полимеров в форвакуумной области давлений / **В. Т. Чан**, А. С. Климов // Материалы докладов XVI международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – 2020. – Т. 1.– С. 213–215.

14. **Чан В. Т.** Обработка полиэтилена в пучковой плазме, создаваемой форвакуумным плазменным электронным источником / **В. Т. Чан**, А. С. Климов // Материалы докладов XVII международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – 2021. – Т. 1.– С. 238–241.

Тираж экз. Заказ .

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.