

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
физического материаловедения Сибирского  
отделения Российской академии наук,  
д.ф.-м.н.



 Номоев А.В.

» 05 2022 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН) на диссертационную работу Чан Ван Ту «Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка для пучково-плазменной модификации диэлектриков», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

**Актуальность темы диссертации. Объект и предмет исследований.** Работа посвящена актуальной теме - усовершенствованию форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка и процессам модификации диэлектриков методом пучково-плазменной обработки. Актуальность настоящей работы обусловлена тем, что, изучение влияния обратного ионного потока на тепловую нагрузку электродов электронного источника и на повышение стабильности и однородности ленточного электронного пучка в условиях электронного облучения диэлектриков, влияния размеров катодной щели на процессы зажигания разряда в катодной полости, влияния продолжительности работы источника, протяженности пространства транспортировки электронного пучка на однородность распределения плотности тока пучка и концентрации пучковой плазмы, и как следствие, на пучково-плазменную обработку материалов имеют фундаментальную и практическую значимость.

**Цель и задачи исследований.** 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 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 и 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.

**Анализ содержания диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и приложения А. Работа изложена на 125 страницах, включает 90 рисунков, 3 таблицы и список используемой литературы.

На основе критического анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования. Корректность постановки задачи свидетельствует о достаточной проработке литературы по теме диссертации, отражает состояние проблемы и подтверждается списком литературы из 140 источников. Соискателем выполнена большая экспериментальная работа и решены все поставленные задачи согласно цели исследования. Диссертация строго соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам, направляемым в печать, содержит совокупность новых результатов и научных положений.

**Во введении** обоснована актуальность исследований, дана оценка уровня разработанности, соответствующего теме направления исследования; охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных результатов; сформулированы научные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации результатов работы.

**Первая глава диссертации** «*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. По результатам изучения литературных данных сформулированы цель и 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. Приводится описание оборудования, созданного для измерения параметров разрядной и пучковой плазмы, и электронного пучка. Для измерения параметров плазмы используется как зондовая, так и спектроскопическая методика. Подобрано экспериментальное оборудование и отлажены методики исследований поверхностных свойств диэлектриков (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. Установлено, что однородность разряда зависит от длины полости и от тока разряда. На зажигание разряда в протяженной катодной полости оказывают влияние и геометрические размеры щели в катоде. Показано, вид продольного распределения плотности тока пучка зависит от размеров эмиссионного окна в аноде, тока разряда и давления газа. Зафиксировано, ионный поток движущийся навстречу электронам пучка проникает 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 разряда с повышенной концентрацией плазмы. Проанализированы характер влияния многоапертурной системы извлечения на тепловую нагрузку эмиссионного электрода и параметры электронного пучка и особенности распределения плотности тока ленточного электронного пучка при разных ускоряющих напряжениях и расстояниях между анодом и экстрактором.

**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. Показано, сравнительно однородное пространственное распределение температуры плазменных электронов благоприятно сказывается при использовании пучковой плазмы для обработки полимерных материалов. На примере полиэтилена и полипропилена определена степень влияния режимов

обработки на их поверхностные и оптические свойства. Представлены зависимости температуры образцов от времени их обработки. Проведено сравнение плазменной и ионной обработки полиэтиленовой и полипропиленовой пленок на основании исследования их структуры, краевых углов смачивания поверхности и коэффициента пропускания света.

**Достоверность** полученных результатов, основных выводов и научных положений диссертации не вызывает сомнения и подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным совпадением расчетных зависимостей и моделей с полученными экспериментальными данными и величинами, практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении форвакуумного плазменного электронного источника ленточного электронного пучка для обработки полимерных материалов.

К числу наиболее важных и значимых результатов, которые определяют **научную новизну** диссертационной работы, следует отнести следующие.

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 диссертации и использование полученных результатов.** Диссертационное исследование расширяет представление о физических процессах инициирования эффекта полого катода в системах тлеющего разряда с протяженным полым катодом, функционирующих в области давлений газа форвакуумного диапазона. 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. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в других разрядных устройствах (плазменных ионных источниках, генераторах низкотемпературной плазмы), функционирующих в области рабочих давлений форвакуумного диапазона.

Результаты диссертационной работы внедрены (акт внедрения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» от 02.03.2022 № б/н) в учебном процессе проведения лекционных, практических и лабораторных занятий по



дисциплинам образовательного модуля по договору от 29.11.2021 №15.СИН.21.0001/СИ-5.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.** По теме диссертации Чан Ван Ту опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты 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. Материалы диссертации в опубликованных работах изложены достаточно полно.

В диссертации и автореферате обнаруживаются следующие замечания:

- в автореферате (с. 7, рисунок 1) на рисунке отсутствует извлекающий электроны электрод (экстрактор), хотя в тексте указано (с. 7, абзац 3) *«Представлена модернизация разрядной и эмиссионной систем форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов... обеспечивающая возможность варьирования геометрии... выходного окна в экстракторе (рисунок 1)»;*

- в автореферате (с. 7, рисунок 1) видно, анод заземлен, хотя обычно заземляют экстрактор, при этом анод и полый катод изолированы;

- в диссертации (с. 70, абзац 1) недостаточно убедительно пояснение причины образования боковых максимумов интенсивности свечения аргоновой плазмы при токах разряда 4-12 мА (рисунок 3.8);

- в автореферате (с. 10, рисунок 7) недостаточно информативно представлена зависимость *«Распределение плотности тока пучка вдоль эмиссионного окна в аноде при различной ширине окна  $l_a$ »*, хотя  $l$  и  $l_a$  соответственно длина щели в катоде и длина щели в аноде (см. рисунок 1);

- в диссертации (с. 99, абзац 1) указано *«...при токах пучка 200 мА и выше наблюдается немонотонная зависимость концентрации плазмы от ускоряющего напряжения...»*, хотя как следует из рисунка 4.4 (а), немонотонный характер зависимости концентрации плазмы просматривается и в диапазоне токов пучка 150-200 мА;

- в автореферате (с. 13, абзац 4) утверждается, *«...установлено, что температура плазменных электронов слабо зависит от положения зонда...»*, требуется пояснить такое утверждение;

- в автореферате (с. 16, абзац 1) недостаточно убедительно введено понятие *«...область редкой плазмы...»*;

- в диссертации (с. 112, раздел заключение, абзац 2) представлен вывод *«...обработка полиэтиленовой пленки потоками ионов из пучковой плазмы в форвакуумной области давлений не изменяет химический состав пленки, но позволяет повысить ее гидрофильные свойства...»*, хотя воздействие плазмы на поверхность полимеров приводит к изменению соотношения основных

химических связей в поверхностных слоях, при этом образование новых связей, определяется модификацией химического состава и образованием гидрофильных групп, о чем свидетельствует уменьшение краевого угла смачивания (с. 106, рисунок 4.11).

Указанные замечания не затрагивают основных выводов работы и положений, выносимых на защиту, не снижают общего положительного мнения о диссертации. Работа представляет завершённое научное исследование, выполнена на высоком научном уровне, написана в соответствии с установленными требованиями. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.

### **Заключение.**

Полученные результаты позволяют считать, что в целом диссертация Чан Ван Ту «Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка для пучково-плазменной модификации диэлектриков» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решается актуальная научная задача, имеющая значение для развития форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка и процессов модификации диэлектриков методом пучково-плазменной обработки.

Диссертация соответствует требованиям п. II.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 "О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, ее автор Чан Ван Ту заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

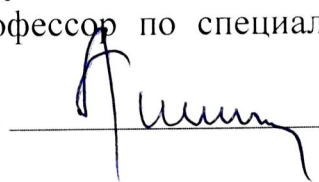
Отзыв на диссертацию Чан Ван Ту обсужден и одобрен на заседании лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук 31 мая 2022 года.

Главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН), доктор технических наук по специальности 1.3.5 - физическая электроника, профессор по специальности 1.3.5 - физическая электроника,

Семенов Александр Петрович

Телефон: 8(9025)646453

E-mail: semenov@ipms.bsnet.ru





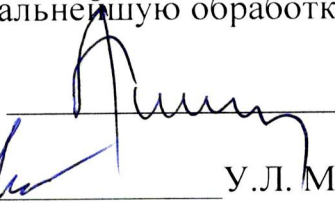
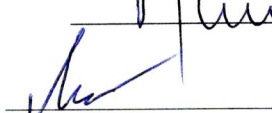
Заведующий лабораторией физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук,

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович 

Телефон: 8(3012) 43-48-70

E-mail: undrakh@ipms.bscnet.ru

Согласны на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

 А.П. Семенов  
 У.Л. Мишигдоржийн

Подписи удостоверяю, начальник Организационного отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,



 Красикова М.В.

Почтовый адрес: 670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6.

Телефон: 8(3012)433184 E-mail: dir@ipms.bscnet.ru