

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по НРИИ ТУСУР
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Лоцилов

« 5 » марта 2022 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по результатам представления диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка для пучково-плазменной модификации диэлектриков» выполнена на кафедре физики ТУСУР.

В период подготовки диссертации аспирант Чан Ван Ту очно обучался в аспирантуре ТУСУРа. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2022 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель: Климов Александр Сергеевич, доктор технических наук, доцент, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры физики, ведущий научный сотрудник лаборатории пучково-плазменной модификации диэлектриков кафедры физики.

В итоге обсуждения доклада по результатам научного исследования В.Т. Чан на расширенном семинаре кафедры физики принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация Чан Ван Ту является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение инициирования разряда с полым катодом в разрядно-эмиссионной системе с протяженным катодом, исследование влияния геометрии ускоряющего промежутка электронного источника на однородность плотности тока по сечению пучка и определению особенностей пучков-плазменной обработки

полипропилена в форвакуумном диапазоне давлений. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационных исследований, имеют важное значение для расширения представлений о физике разряда с полым катодом и его применении в источнике ленточного электронного пучка.

Актуальность диссертационной работы

Низкотемпературная неравновесная плазма широко применяется для модификации поверхности полимерных материалов. Обработка в низкотемпературной плазме позволяет улучшать такие свойства полимерных материалов как твердость, химическая и физическая устойчивость к коррозии или истиранию, изменять смачиваемость, водопоглощение и другие физические параметры материалов. В отличие от плазмы газовых разрядов плазма, формируемая за счет ионизации газа ускоренным электронным пучком, обладает рядом преимуществ. К их числу можно отнести относительно низкую температуру плазмы – порядка единиц электрон-вольт при сохранении высокой химической активности, позволяющей задействовать плазмохимические механизмы управляемой модификации свойств полимерных материалов. Кроме того, параметрами пучковой плазмы можно управлять в широких пределах за счет изменения энергии электронов пучка, тока пучка, рода и давления плазмообразующего газа. Электронный пучок может быть инжектирован в газы, пары и парогазовые смеси любого химического состава, при этом даже при комнатной температуре в реакционном объеме могут быть достигнуты весьма высокие концентрации химически активных частиц. Для формирования пучковой плазмы большого объема, с целью повышения площади обрабатываемой поверхности, целесообразнее использование широкоапертурных, в частности ленточных, электронных пучков. Площадь формируемого плазменного образования в таком случае задается поперечными размерами выходной апертуры электронного источника, что позволяет создавать пучковую плазму площадью более 1 кв. метра в непрерывном режиме. Оптимальный диапазон давлений для генерации плотной пучковой плазмы составляет 1-100 Па, что соответствует форвакуумной области давлений.

На кафедре физики ТУСУРа на протяжении более 20 лет выполняются работы, связанные с созданием и исследованием форвакуумных источников ленточного электронного пучка. Достигнутые параметры ленточных электронных пучков позволяют использовать их в качестве генераторов пучковой плазмы. Несмотря на достигнутые успехи задачам зажигания разряда в протяженной катодной полости, сохранению однородности пучка в условиях продолжительной работы, а также использованию таких пучков для непосредственной пучково-плазменной модификации полимерных материалов было уделено недостаточно внимания. Рассмотрение и решение указанных задач, описанное в представляемой диссертационной работе, является актуальным с точки зрения развития пучково-плазменных технологий обработки материалов в форвакуумной области давлений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что

1. Определены условия инициирования разряда с полым катодом в разрядной системе с протяженным катодом в источнике ленточного электронного пучка, функционирующем в форвакуумной области давлений.

2. Исследовано влияние параметров многоапертурной системы извлечения электронного пучка на однородность его плотности тока, а также процесс формирования, ускорения и транспортировки ленточного электронного пучка в форвакуумной области давлений. Предложены методы снижения неоднородности электронного пучка и повышения ресурса работы электронного источника.

3. Изучена зависимость параметров пучковой плазмы от параметров электронного пучка. Определены режимы пучково-плазменной обработки полипропилена, приводящие к повышению в течение длительного времени гидрофильных свойств, а также изменению оптических свойств поверхности.

Практическая и научная ценность работы:

1. Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в понимание физических процессов инициирования эффекта полого катода в разрядных системах тлеющего разряда с протяженным полым катодом, функционирующим в области повышенных давлений газа форвакуумного диапазона.

2. Разработана конструкция ускоряющего узла с многоапертурной системой извлечения в источнике ленточного пучка электронов, обеспечивающая снижение тепловой нагрузки на электроды извлекающей системы и повышение однородности плотности тока ленточного электронного пучка.

3. Результаты работы по генерации пучковой плазмы могут быть использованы в технологиях пучково-плазменной обработки полимерных материалов, а также в электроразрядных устройствах, функционирующих в области рабочих давлений форвакуумного диапазона (плазменных ионных источниках, генераторах низкотемпературной плазмы).

Личное участие автора в получении результатов.

Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором совместно с научным руководителем. Соавторы, принимавшие участие в исследованиях, указаны в списке публикаций по теме диссертации. Личный вклад автора состоит в модернизации ускоряющего промежутка источника и основных узлов экспериментального макета форвакуумного плазменного электронного источника [2, 3], выборе методик эксперимента [1–4, 5–8, 12, 14], проведении исследований [5–14] и анализе полученных результатов [1–4, 5, 8–14]. Автором совместно с научным руководителем выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации, на основании которых была модернизирована конструкция форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов [2, 3, 6, 7, 13–

14], применяемого для генерации пучковой плазмы и обработки полимеров.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются систематическим характером исследований, использованием различных экспериментальных методик – зондовые измерения параметров плазмы двойным и одиночным ленгмюровским зондом, сопоставлением полученных экспериментальных данных с численными оценками и литературными данными, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании и применении для обработки полимеров плазменного источника ленточного электронного пучка на основе разряда с протяженным полым катодом.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертационная работа Чан Ван Ту по своему содержанию соответствует п. 1 паспорта специальности 1.3.5 – Физическая электроника по техническим наукам в части 1.4. «...плазменно-пучковые разряды, плазменные источники электронов и источники ионов» и п. 3 паспорта специальности в части «Создание основ плазменных и пучковых технологий, в том числе модификации свойств поверхности...».

Полнота изложения материалов диссертации в печатных работах, опубликованных автором

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.

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).

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных цитирования Web of Science

и Scopus:

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. 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.

Публикации в сборниках статей и трудах конференций:

5. 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.

6. 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.

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 Series. – 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 полом 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.

Диссертация «Форвакуумный плазменный источник ленточного электронного пучка для пучково-плазменной модификации диэлектриков» Чан Ван Ту рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании научного семинара кафедры «Физики», с привлечением сотрудников лаборатории «Вакуумной электроники» ФГБУН Института сильноточной электроники СО РАН, сотрудников отдела новых материалов для электротехнической и химической промышленности Томского государственного университета.

Присутствовало на заседании 16 чел., в том числе докторов наук – 3, кандидатов наук – 7. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 37 от «24» марта 2022 г.

Председатель семинара



Окс Ефим Михайлович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Физики

Секретарь семинара

Климов Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры Физики