

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Института
теплофизики СО РАН

И.Ф. -м.н.



И.Ф. Сиковский

18 » декабря 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Островерхова Евгения Владимировича «Генератор протяжённых объёмно-однородных пучково-плазменных образований для азотирования сталей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 - вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы. Диссертационная работа Островерхова Е.В. посвящена разработке способов увеличения степени однородности распределения концентрации заряженных частиц в пучково-плазменных образованиях (ППО), которые генерируются в условиях низкого давления газа в сильноточном несамостоятельном тлеющем разряде, созданию плазмогенераторов на этой основе, а также их использованию для упрочнения конструкционных и инструментальных сталей.

В настоящее время ионно-плазменная обработка поверхности металлов и сплавов, включающая очистку, оксидирование, азотирование, нанесение других функциональных слоёв и покрытий, зарекомендовала себя как эффективный метод модифицирования, активно используемый в промышленности. Ионно-плазменное азотирование является весьма распространенным методом улучшения характеристик поверхности крупногабаритных изделий, имеющее значительные преимущества по сравнению с азотированием в газовых печах. Одной из важнейших проблем, возникающих при переходе к низким рабочим давлениям (ниже 1 Па), является высокая степень неоднородности распределения заряженных частиц по объёму рабочей камеры, что негативно отражается на равномерности обработки поверхности изделий. Решить указанную проблему можно при помощи использования плазменных систем на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Таким образом, исследования закономерностей генерации плазменных образований и возможности применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации заряженных частиц в полном катоде сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с двумя инжекторами электронов, представленные в работе Островерхова Е.В., являются, безусловно, актуальными с точки зрения разработки, создания и внедрения генераторов низкотемпературной плазмы в больших вакуумных объёмах для ионно-плазменной обработки поверхности сталей, с целью улучшения свойств их поверхности, а следовательно и повышения срока службы изделий в целом.

Анализ содержания диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и четырех глав.

В *первой главе* сделан краткий обзор научной литературы, посвященный проблеме формирования однородной по концентрации плазмы в больших вакуумных объёмах. Особое внимание уделено электродным системам, применяемых в разработанных установках для решения большого круга задач. Рассмотрены методы и результаты моделирования систем, использующих плазму тлеющего разряда с полым катодом. Приведено обоснование выбора несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом для генерации однородной плазмы в больших вакуумных объёмах, как основного объекта исследований и основы для разработки протяжённых (> 1 м) плазмогенераторов.

Во *второй главе* представлено описание уникальной разработанной установки на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом, включающим в себя 2 инжектора электронов низкого (0,1–1 Па) давления рабочего газа. Также приведены характеристики ППО в сильноточном тлеющем разряде, результаты зондовых измерений и параметры ППО в полном катоде. Подтверждено, что в разработанной системе генерации ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом, включающим в себя 2 инжектора электронов низкого давления рабочего газа, применим принцип суперпозиции в отношении зависимостей тока тлеющего разряда от тока инжекции электронов. Погрешность эмиссионных характеристик не превышает 15%. Установлено, что увеличение тока дугового разряда с 20 до 45 А приводит к снижению точности выполнения принципа суперпозиции. Максимальное отклонение коэффициентов неоднородности составляет 22%.

В *третьей главе* приведены результаты по разработке генератора ППО на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с инжекцией электронов из протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера. Достаточно подробно приведено описание генератора, а также характеристики разряда в импульсном режиме горения. Показано влияние диаметра полого анода дугового разряда (115 и 200 мм) и рабочего давления (0,15– 0,6 Па) на однородность продольного распределения плотности ионного тока в генерируемой плазме. Также снижение степени неоднородности достигается за счет увеличения напряжения горения основного тлеющего разряда с полым катодом благодаря увеличению ионного тока, инжектируемого внутрь полого сетчатого анода. Показано, что характер распределения плазмы в основном пучково-плазменном образовании, формируемом в несамостоятельном тлеющем разряде, повторяет характер распределения концентрации плазмы в полном протяженном сетчатом аноде вспомогательного дугового разряда.

В *четвертой главе* представлено описание генератора объёмно-однородных пучково-плазменных образований на основе несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом для азотирования сталей, а также приведены эксперименты по азотированию стали марки 4Х5МФС. Подобран оптимальный режим азотирования ($N_2(10\%)+Ar(90\%)$), не допускающий формирование хрупких нитридных фаз на поверхности изделий. Подобран режим азотирования тонкостенных трубочек для игл катетеров. Установлено, что использование указанного режима позволяет снизить величину прогиба трубочек на 20% по сравнению с образцами без модификации, что вполне приемлемо для улучшения их эксплуатационных свойств.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме. Содержание диссертации полностью отвечает заявленной специальности и теме.

Соответствие автореферата диссертации ее содержанию. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Научная новизна. Решение поставленных в работе задач позволило диссертанту получить ряд новых научных результатов, заключающихся в следующем:

- на основе использования двух отдельно работающих источников электронов в условиях низких давлений рабочего газа определены условия применимости принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц.

- установлены закономерности степени неоднородности распределения концентрации плазмы в полой аноде вспомогательного дугового разряда от его диаметра, давления рабочего газа, напряжения горения тлеющего разряда с полым катодом большого (сотни литров) объёма.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанный генератор объемно-однородных ППО можно использовать для ионно-плазменного азотирования промышленных изделий сложной геометрии и больших (длиной ≈ 1 м) габаритов. Определены оптимальные режимы азотирования конструкционных и инструментальных сталей. Также предложен способ упрочнения игл медицинских катетеров, снижающий величину прогиба готовых игл на 20 % по сравнению с необработанными изделиями. Результаты работы можно рекомендовать для широкого использования в современной промышленности.

Степень обоснованности и достоверности научных результатов и выводов обеспечивается корректностью постановки решаемых задач и их обоснованностью, применением современной аппаратной базы при разработке, достаточным объемом экспериментальных данных и их обработкой с использованием современного программного обеспечения и диагностического оборудования, сравнением полученных данных с результатами других научных групп.

Основные результаты диссертации обсуждены на российских и международных конференциях и в полной мере отражены в 10 научных публикациях, входящих в Перечень ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент на изобретение.

Диссертация написана ясным технически грамотным языком, хорошо оформлена и содержит большое количество экспериментальных результатов, достаточных для их понимания, оценки и использования.

По работе были высказаны следующие замечания и вопросы:

1. В тексте диссертации отсутствует упоминание о величинах погрешности зондовых измерений, а также не сделаны оценки условия применимости используемых в работе формул (2.3, 2.4) для расчёта температуры и плотности электронов. Нераскрыто влияние времени развёртки ВАХ зонда относительно длительности импульса тлеющего разряда. Учитывая, что в рамках одного режима измерений (например, табл. 2.1) плотность электронов изменяется более чем на порядок, погрешность зондовых измерений может тоже изменяться. В связи с этим возникает вопрос, как повлияет учет точности зондовых измерений на вывод в положении 1 о том, что степень

- несоблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации плазмы возрастает с увеличением тока тлеющего разряда?
2. На стр. 46 и 47 (рис. 2.8) написано, что при совместном включении двух инжекторов электронов вкладываемая в разряд мощность оказывается на 15% больше, чем сумма мощностей от двух отдельных инжекторов. Почему тогда на рис. 2.11 концентрация электронов при совместном включении двух эмиттеров (кривая 3) меньше, чем сумма концентраций при их отдельном включении (кривая 4)?
 3. В последнем абзаце на стр. 62 написано: «Уменьшение длины свободного пробега между кулоновскими взаимодействиями приводит ... к снижению степени неоднородности распределения концентрации заряженных частиц», при этом уменьшение длины свободного пробега, очевидно, происходит с увеличением силы тока. Однако из таблицы 2.9 видно, что с увеличением силы тока коэффициент неоднородности потенциала плазмы увеличивается, что противоречит данному утверждению.
 4. Представленные в работе закономерности генерации пучково-плазменных образований (в частности, степени однородности распределения концентрации заряженных частиц) позволяют охарактеризовать плазму самостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом. Однако, обрабатываемое изделие, сопоставимое по размерам с полым катодом, способно кардинальным образом изменить характеристики плазмы полого катода – за счет изменения пространственного распределения потенциала плазмы, появления потока ионов из плазмы на поверхность изделия и т.п. Каким образом погружаемое в плазму крупногабаритное изделие будет влиять на полученные закономерности генерации пучково-плазменных образований, в частности, на степень однородности распределения концентрации заряженных частиц?
 5. При указанных в работе токах возможен унос материала электродов. Как это влияет на структуру поверхности обрабатываемого образца?
 6. На рисунке 3.5 представлены зависимости плотности ионного тока от расстояния от нижнего основания полого анода. По представленным графикам диссертантом делается вывод о снижении степени неоднородности распределения плотности ионного тока с уменьшением давления рабочего газа. С учетом погрешности данные представленные для полого анода диаметром 200 мм при 0,15 и 0,3 Па выглядят одинаково. На основании чего делается указанное заключение?
 7. Данные на рисунке 3.6 с учетом погрешности выглядят одинаково. В тексте работы не указано, по какому критерию выявлена закономерность степени неоднородности при снижении давления.
 8. На рисунке 4.6 представлена дифрактограмма стали 4Х5МФС после азотирования. Идентифицированная фаза нитрида хрома выглядит сомнительно, так как интенсивность рефлекса (111) практически неотличима от фонового значения. В работе не представлены другие методы обнаружения указанной фазы, также не отражен метод расчета содержания фаз.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику работы и не затрагивают защищаемых положений и выводов по диссертации. В целом, работа выполнена на высоком научном и профессиональном

уровне и будет востребована как в научных исследованиях, так и для реальных технологических применений.

Диссертационная работа Островерхова Е.В. «Генератор протяжённых объёмно-однородных пучково-плазменных образований для азотирования сталей» представляет собой законченное исследование и соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертации «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013., № 842, а ее автор Островерхов Евгений Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Диссертационная работа Островерхова Е.В. и содержание отзыва обсуждены и одобрены на открытом семинаре секции № 4 "Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы" Ученого совета Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (протокол № 10 от 13 декабря 2024 г.).

И.о. заведующего лабораторией
разреженных газов,
ведущий научный сотрудник,
д.ф.-м.н.

Морозов Алексей Анатольевич

Старший научный сотрудник,
к.ф.-м.н.

Пинаев Вадим Александрович

Подписи Морозова А.А. и Пинаева В.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН
к.ф.-м.н.



Макаров М.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

630090, Новосибирск

пр. ак. Лаврентьева, 1

E-mail: director@itp.nsc.ru

Тел. +7(383) 330-90-40

Факс: +7(383) 330-84-80

<http://www.itp.nsc.ru>