

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Островерхова Евгения Владимировича** «Генератор протяженных объемно-однородных пучково-плазменных образований для азотирования сталей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника».

Ионно-плазменные методы обработки поверхности металлов и сплавов, в частности, азотирование, играют важную роль в современной промышленности. Особенно актуально ионно-плазменное азотирование, которое позволяет улучшить эксплуатационные характеристики изделий, такие как износостойкость и коррозионная стойкость. Этот метод, проводимый в вакууме, является более экологически чистым и эффективным по сравнению с традиционными методами, такими как азотирование в расплавах солей или газовых печах.

В классическом аномальном тлеющем разряде, который широко используется в промышленности, энергия ионов, воздействующих на обрабатываемое изделие, составляет всего несколько десятков электронвольт при давлениях рабочего газа 100–1000 Па. Это ограничивает технологические возможности азотирования. Переход к более низким давлениям (≈ 1 Па и ниже) позволяет значительно увеличить энергию бомбардирующих ионов, что, в свою очередь, улучшает качество обработки. Однако создание плазменных систем для обработки крупных изделий сталкивается с проблемами, связанными с неоднородностью распределения заряженных частиц в рабочей камере. Для достижения равномерной обработки поверхности необходимо обеспечить независимую регулировку напряжения и тока разряда. Плазменные системы на основе несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом могут удовлетворить этим требованиям, обеспечивая низкую степень неоднородности распределения заряженных частиц. В работе Островерхова Е.В. исследуется возможность применения принципа суперпозиции для прогнозирования распределения концентрации заряженных частиц в полном катоде сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с двумя инжекторами электронов. Также предлагается использование цилиндрического протяженного сетчатого плазменного эмиттера, который формирует радиально-расходящийся пучок электронов, инжектируемых в плазменное образование основного тлеющего разряда.

Очевидно, что диссертационная работа Островерхова Е.В., направленная на дальнейшее развитие методов генерации пучково-плазменных образований (ППО) большого объема и снижение неоднородности их распределения является актуальной как с фундаментальной, так и прикладной точки зрения.

Оценка содержания работы и её завершённости

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Общий объем работы — 123 страницы, включая 74 иллюстрации, 21 таблицу и список литературы из 110 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, представляются научная новизна и практическая значимость, а также структура диссертации и выносимые на защиту научные положения.

Первая глава — обзор литературы по созданию однородной плазмы в больших вакуумных объемах. Рассматриваются электродные системы на основе разрядов низкого давления, использовавшиеся в различных установках для генерации плазменных образований. Приведены результаты численного моделирования систем с полым катодом, полученные различными исследователями. В завершение главы делается вывод о перспективности использования несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом для генерации однородных плазменных образований.

Во второй главе описан генератор пучково-плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и впрыском электронов из двух инжекторов при низком давлении. Приведены результаты исследования системы и особенности формирования объемно-однородных плазменных образований.

Третья глава посвящена генератору протяженных пучково-плазменных образований, поддерживаемых радиально расходящимся потоком электронов из цилиндрического сетчатого эмиттера. Исследованы факторы, влияющие на распределение концентрации заряженных частиц как в эмиттере, так и в полном катоде.

В четвёртой главе описан генератор объемно-однородных пучково-плазменных образований и результаты азотирования сталей, полученные с его использованием. Рассмотрены закономерности азотирования штамповой стали и тонкостенных стальных труб для медицинских катетеров.

В заключении подведены основные результаты работы, обсуждаются перспективы и рекомендации по их использованию.

Следует отметить следующие полученные результаты:

1. Автором показано, что в осесимметричной цилиндрической системе генерации пучково-плазменных образований с двумя инжекторами электронов наблюдается снижение точности выполнения принципа суперпозиции при увеличении токов вспомогательного дугового разряда. Это связано с повышением концентрации заряженных частиц и поперечного градиента потенциала плазмы, что влияет на подвижность электронов и кулоновские взаимодействия.

2. Автором проведена оптимизация диаметра анода. В частности, увеличение диаметра протяженного цилиндрического сетчатого эмиттера со 115 мм до 200 мм снижает неоднородность продольного распределения плотности ионного тока. Снижение давления газа также значительно уменьшает продольную неоднородность концентрации плазмы.

3. Автором изготовлен и введен в эксплуатацию генератор пучково-плазменных образований, способный обрабатывать изделия высотой до 800 мм, диаметром до 350 мм и весом до 150 кг. Конструкция позволяет независимо регулировать напряжение и ток тлеющего разряда.

4. Автором разработаны режимы обработки для различных сталей, включая стали для горячего и холодного деформирования, а также конструкционные стали. Процесс азотирования пуансонов внедрен в производственный цикл на ряде предприятий.

5. В диссертационной работе подобран режим азотирования тонкостенных трубочек для игл медицинских катетеров, что привело к снижению прогиба на 20% и обеспечило равномерность глубины азотированного слоя и твердости по длине трубочки.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики и обработки данных, воспроизводимостью результатов экспериментов, согласием расчетных и экспериментально полученных результатов, а также практической реализацией выводов, сформулированных в диссертации.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. По результатам работы получен 1 патент РФ на изобретение. Результаты исследований докладывались на многочисленных международных и всероссийских конференциях по физике плазмы, газовому разряду и физической электронике.

Научная и практическая значимость

Результаты работы имеют практическое значение, так как демонстрируют особенности протяженных объемно-однородных пучково-плазменных образований, их конструктивных особенностей. Результаты работы обеспечивают обширный материал для моделирования таких пучково-плазменных образований и для проведения исследований кинетики электронов. Очевиден и вклад в развитие физики газового разряда, физики плазмы, а также вакуумной и плазменной электроники. Практическая значимость заключается в создании генераторов протяженных объемно-однородных пучково-

плазменных образований для азотирования сталей. Практическая значимость подтверждена полученным патентом на изобретение и актами внедрения.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. С фундаментальной точки зрения экспериментальные данные работы могут быть использованы для численного моделирования и теоретического анализа газового разряда и кинетики электронов в пучково-плазменных образованиях на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и впрыском электронов из двух инжекторов при низком давлении. Практическое применение результатов заключается в непосредственном внедрении и использовании исследованных устройств в генераторах объемно-однородных пучково-плазменных образований для азотирования сталей. Проведенные исследования и полученные результаты могут быть востребованы в ведущих научных и образовательных учреждениях, специализирующихся в области физики плазмы, вакуумно-плазменной электроники, физики газового разряда, в частности в ОИВТ РАН, ИОФАН, АО ТРИНИТИ, УУНиТ, КФУ, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, СПбГУ, МГУ и др.

По тексту диссертации есть несколько непринципиальных вопросов и замечаний:

1. Во второй главе автором диссертации проводились систематические зондовые измерения плазменно-пучковых образований. На мой взгляд, для более детального анализа физических процессов было бы полезно в тексте диссертации привести функцию распределения электронов по энергиям в разных точках как по радиусу, так и по длине камеры, а также пространственное распределение температуры (как меры средней энергии) электронов. Проводилась ли автором оценка концентрации ионов по ионной ветви ВАХ? Использовались ли фильтрация получаемых электрических сигналов?

2. В третьей главе автором также проводились зондовые исследования. В частности, для исследования распределения концентрации плазмы и плотности ионного тока внутри полого катода основного несамостоятельного тлеющего разряда вдоль его продольной оси использовался плоский зонд с охранным кольцом. Однако в тексте диссертации не указаны геометрические параметры плоского зонда. Кроме того, автором не приведена методика определения параметров плазмы на такой зонд. Особенно важным этот вопрос будет в случае, если размеры зонда были сравнимы или больше длины свободного пробега заряженных частиц, а также в условиях влияния магнитного поля.

3. В третьей главе для более детального рассмотрения влияния потока ионов на снижение степени неоднородности распределения плотности ионного тока проводилось численное моделирование процессов в полом сетчатом аноде с применением метода

крупных частиц. При этом в описании отсутствует учитывалось ли уравнение Пуассона при проведении численных экспериментов.

4. Проведенные автором исследования показали какие факторы приводят к снижению неоднородности продольного распределения, в частности это увеличение диаметра цилиндрического сетчатого анода, снижение давления, увеличение напряжения горения. При выработке рекомендаций хотелось бы получить наиболее оптимальные режимы в том числе и при регулировке нескольких параметров, в частности варьировании давления буферного газа и напряжения горения.

Однако сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Автореферат соответствует тексту диссертации. Диссертационная работа Островерхова Евгения выполнена на высоком и техническом уровне и представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной проблемы вакуумной и плазменной электроники, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника».

Официальный оппонент,

Профессор, и.о. зав. кафедрой общей физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, д.ф.-м.н.

Сайфутдинов Алмаз Ильгизович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» 420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, Телефон +7 (843) 231 02 23, e-mail as.uav@bk.ru

Подпись Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича удостоверяю.

Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «КНИТУ-
КАИ»



Жестовская Фарида Ахатовна