

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Денисова Владимира Викторовича «Системы генерации пучково–плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 «Физическая электроника»

Обработка поверхности материалов и изделий вакуумными ионно–плазменными методами с целью улучшения её функциональных качеств (повышение твердости, износо и коррозионной стойкости, прочности и др.) является современной тенденцией в материаловедении, потому что позволяет увеличить ресурс изделий, так как именно свойства поверхности в большинстве случаев отвечает за разрушение материалов.

Данная диссертационная работа посвящена разработке и исследованию источников газовой и парогазовой плазмы для ионно–плазменного упрочнения поверхности материалов и изделий с целью увеличения их срока службы. Поэтому актуальность работы очевидна, так как газовая плазма различной природы активно используется в современном производстве для очистки, нагрева, активации, модификации поверхности изделий, и поэтому разработка, исследование режимов функционирования генераторов плазмы, диагностика плазмы и результатов её воздействия на различные материалы востребованы.

Полученные Денисовым В.В. экспериментальные и теоретические результаты оригинальны. В результате исследований: – определены закономерности генерации газовых объёмных пучково–плазменных образований со степенью ионизации до 15 % для несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом при токах до 800 А, напряжениях горения 350 В, импульсной мощности около 300 кВт, что по совокупности параметров превосходит известные аналоги; – установлена роль кулоновских взаимодействий при токах в сотни ампер в снижении степени неоднородности концентрации заряженных частиц; – продемонстрирована возможность получения в квазинепрерывных пучково–плазменных образованиях плотностей электронного тока на цилиндрический зонд до 7 А/см² с низкой степенью неоднородности, что является достижением для генераторов плазмы большого объёма при низком давлении и является основой для разработки и производства высокопроизводительного ионно–плазменного промышленного оборудования.

В диссертационной работе автором проведен комплекс экспериментальных исследований, направленных на разработку и создание нового класса технологических систем генерации объёмных пучково–плазменных образований, формируемых при низком (менее 1 Па)

давлении, обеспечивающих независимую регулировку всех основных рабочих параметров воздействия на обрабатываемую поверхность. Экспериментальные исследования сопровождаются численным моделированием, демонстрирующее согласие с результатами экспериментов. Кроме того, разработаны технологические режимы упрочнения поверхности материалов и изделий из широко распространённых конструкционных и инструментальных материалов.

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников и приложений, подтверждающих использование результатов работы.

Первая глава посвящена обзору состояния исследований в области генерации объёмной плазмы в тлеющих разрядах с полым катодом. Обоснована целесообразность использования для генерации плазмы с высокой концентрацией в больших объёмах несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом.

Во второй главе представлены схемы и конструкции экспериментальных макетов генераторов газовых и парогазовых пучково–плазменных образований на основе сильноточного несамостоятельного тлеющего разряда с использованием которых проводились исследования, а также методики измерения параметров генерируемых пучково–плазменных образований и методы исследования материалов после ионно–плазменной обработки.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния условий генерации пучково–плазменных образований на однородность распределения концентрации заряженных частиц в полых катодах большого объёма. Рассмотрены способы снижения степени неоднородности концентрации заряженных частиц в пучково–плазменном образовании. Приводятся данные об оценке влияния механизма кулоновских взаимодействий на процессы генерации этих образований.

Четвертая глава посвящена описанию результатов работ по разработке и созданию оригинальной системы генерации пучково–плазменных образований с протяженным полым катодом и вспомогательным протяженным сеточным источником инжектируемых электронов.

В пятой главе представлены результаты прикладных исследований применения пучково–плазменных образований для упрочнения поверхности сталей и сплавов. Обоснованы преимущества использования импульсно-периодического режима генерации газовых пучково–плазменных образований повышенной концентрации для обработки изделий сложной геометрии. Описан принцип управления фазовым составом поверхности инструментальных сталей в процессе азотирования при воздействии плазменными образованиями.

В шестой главе представлены схемы, конструкции, описание и особенности функционирования лабораторных и опытных технологических установок на основе систем

генерации пучково–плазменных образований для модификации поверхности материалов и изделий.

К наиболее важным результатам работы, определяющим её научную ценность и практическую значимость, можно отнести следующие:

- проведены исследования условий стабильного зажигания и горения несамостоятельного тлеющего разряда при токах от нескольких десятков до нескольких сотен ампер, а также влияния условий генерации пучково–плазменных образований на однородность распределения концентрации заряженных частиц в полых катодах большого объема;
- рассмотрены способы снижения степени неоднородности концентрации заряженных частиц в пучково–плазменном образовании путем изменения геометрии эмиссионного электрода и путем использования двух источников электронов;
- определены условия соблюдения и несоблюдения принципа суперпозиции распределений концентрации заряженных частиц, полученных при работе отдельных источников электронов в системах генерации пучково–плазменных образований с двумя источниками электронов;
- показано влияние кулоновских взаимодействий на процесс синтеза пучково–плазменных образований;
- продемонстрированы режимы повышения срока службы изделий при обработке их поверхности однородными пучково–плазменными образованиями, генерируемыми несамостоятельным тлеющим разрядом низкого давления;
- проведены исследования системы генерации пучково–плазменных образований с протяженным полым катодом и вспомогательным протяженным сеточным источником инжектируемых электронов;
- выявлены закономерности влияния условий генерации пучково–плазменных образований и конфигурации узлов вспомогательного протяженного сеточного источника электронов на степень неоднородности распределения концентрации в плазменном образовании, формируемого как в полном катоде тлеющего разряда, так и во вспомогательном дуговом разряде, что является основой для создания электронных источников с пучком большого сечения.

Разработанные генераторы и установки использовались для упрочнения поверхности различных изделий из сталей и сплавов, включая детали сложной формы в импульсно–периодическом режиме генерации газовых пучково–плазменных образований, имеющем преимущества перед непрерывным режимом.

В результате совокупности междисциплинарных исследований В.В. Денисовым созданы генераторы объёмных пучково–плазменных образований с рекордными параметрами и показана возможность их эффективного использования в технологических процессах.

Представленные в диссертации результаты исследований позволили внедрить ряд технологических режимов ионно–плазменного упрочнения поверхности изделий из конструкционных и инструментальных сталей, что подтверждено актами внедрения, приведенных в Приложении к работе. Разработки защищены четырьмя патентами Российской Федерации.

Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертации не вызывает сомнений и подтверждается корректностью постановки решаемых задач, большим объемом экспериментальных данных, полученных с помощью апробированных методов исследований, использованием современных методов диагностики и методик обработки данных, а также результатами численных оценок и математического моделирования.

Основные научные результаты, содержащиеся в диссертации, изложены в 21 статье в журналах, включенных в перечень ВАК РФ и индексируемые в международных базах данных Web of Sciences и Scopus. Результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях различного уровня и хорошо известны научной общественности.

Содержание автореферата адекватно отражает содержание диссертационной работы.

По диссертационной работе имеются замечания:

1. В диссертации используется понятие «*пучково–плазменное образование*», которое по мнению диссертанта «...перспективно как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для технологических целей...». Необходимо дать определение пучково–плазменного образования.
2. Решаемые задачи: п.3 «*Оптимизировать конфигурации и ... параметры электродных систем для обеспечения генерации пучково–плазменных образований с минимальной степенью неоднородности концентрации плазмы, а также высоких эксплуатационных характеристик оборудования ...*». Параметр минимальной неоднородности – это конкретно сколько или необходимо сопоставить этот параметр с известными или ранее полученными другими авторами значением. Это касается и «... *высоких эксплуатационных характеристик...*»
3. В диссертации (рис.5.22, стр. 290) приведены эмиссионные спектры излучения пучково–плазменных образований в атмосфере азота. Чем обусловлена высокая интенсивность свечения во всем диапазоне длин волн $\lambda = 300\text{--}1000$ нм? При рабочих давлениях газа ~ 1 Па в спектре можно было ожидать свечение контролируемых и неконтролируемых примесей других газов, наблюдались ли они?
4. Для управления составом поверхности азотируемых инструментальных сталей при ионно–плазменном азотировании в газовых пучково–плазменных образованиях используется газовая смесь азот + аргон. В диссертации приведены эмиссионные спектры азотной плазмы при разных токах тлеющего разряда, но не приводятся спектры пучково–плазменных образований при напуске азот–аргоновой газовой смеси.

5. В диссертации на стр.36 приведена формула 1.7 для обобщенного коэффициента Γ , характеризующего процессы рождения в пучково–плазменных образованиях электронов на поверхности полого катода и поступления электронов в основной разрядный объем из плазмы вспомогательного дугового разряда. В диссертации не приведены зависимости данного коэффициента от рабочих параметров разряда.
6. Процесс «...неконтролируемого роста тока...» (стр.153) как сказывается на свойства формируемых нитридных слоев при плазменном воздействии на поверхность?
7. При представлении некоторых экспериментальных результатов (вольт–амперные характеристики, радиальные распределения, распределение микротвёрдости) не на всех рисунках приведены (или не обозначены в тексте) ошибки измерений.
8. Можно отметить «редакторские» ошибки – несоблюдение размерностей, например, представление концентрации плазмы, обозначенной как n_e в м^{-3} (с.156); n в м^{-3} (с.161); n_e в см^{-3} (с.246, 228); n_i в см^{-3} (с.136). Аналогичные ошибки в размерностях встречаются в автореферате.
9. Не очень аккуратно приведена литература. Например, некоторые статьи представлены и в русской и переводной версиях, другие только в переводной версии. Есть ссылки на публикации в журнале «*High Temperature Materials Processes*» и на статью из этого же журнала, но названный по аббревиатуре «*HTMP*».

Замечания носят не принципиальный характер, не снижают ценности и значимости полученных результатов и не подвергают сомнению научные положения, выносимые на защиту и выводы по работе.

Полученные результаты интересны и имеют важное значение для развития физической электроники, в частности для разработки физических и технических основ устройств, приборов, установок, систем и технологических процессов на основе воздействия плазменных образований, генерируемых в разрядах низкого давления, а также плазменных источников электронов, что полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021), к докторским диссертациям.

Таким образом, диссертационная работа В.В. Денисова «Системы генерации пучково–плазменных образований на основе сильнооточного несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления с полым катодом» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника представляет собой законченную научно–квалификационную работу и по актуальности, объёму экспериментального материала, важности полученных результатов, по уровню их обсуждения, научной новизне и практической значимости удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к докторским

диссертациям, а её автор Денисов Владимир Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Заведующий лабораторией мощных газовых лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), доктор физико-математических наук по специальности «лазерная физика, 01.04.21»

Закревский Дмитрий Эдуардович.

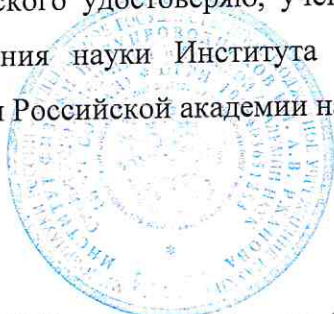
630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д.13,

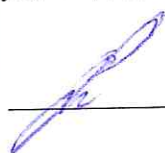
телефон: 8 (383) 3331091; 8 (913) 788 44 76,

e-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

 Д.Э. Закревский

Подпись Д.Э. Закревского удостоверяю, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук,





С.А. Аржанникова.

Почтовый адрес: 630090 Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 13

Телефон: 7 (383) 330 90 55, E-mail: ifp@isp.nsc.ru

« 14 » декабря 2024 г.