

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Каменецких Александра Сергеевича «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодом», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

Актуальность темы. В настоящее время вакуумно-плазменные методы находят широкое применение в различных технологических операциях промышленного производства. Например, ионно-ассистированное нанесение покрытий позволяют изменять параметры и функциональные свойства поверхности без изменения объемных свойств материалов. Методы, в которых для нанесения покрытий используется плазма, привлекают все больший интерес и открывают новые перспективы в силу большого количества факторов, которые могут быть использованы для управления процессом синтеза покрытий. Эффективным способом генерации плазмы в рабочем объеме устройств для осаждения покрытий является воздействие на газовую среду широким пучком электронов с энергией, близкой к максимуму сечений ионизации и диссоциации газов электронным ударом (100-150 эВ). Для формирования электронных пучков с указанными параметрами наиболее перспективны газоразрядные источники с плазменным катодом, эмиссия электронов из которого стабилизируется слоями пространственного заряда у поверхности сеточного электрода. Помимо условий в самом разрядном промежутке источника электронов, на параметры эмитирующей плазмы, оказывает влияние встречный поток ионов пучковой плазмы. Исследование этих сложных и связанных между собой физических процессов, а также выявление способов управления параметрами синтезируемых покрытий является весьма нетривиальной, но очень важной для развития вакуумно-плазменных технологий задачей. В связи с этим тема диссертационной работы, направленной на разработку эффективных способов интенсивного ионного сопровождения и активации газовой среды в системах осаждения покрытий, которые обеспечивают независимую регулировку в широких пределах параметров ионного потока, и способов высокоскоростного синтеза покрытий в разряде низкого давления, представляется, несомненно, актуальной.

Структура и содержание диссертации. Представленная на оппонирование диссертационная работа состоит из введения, семи глав,

заклучения, списка литературы, включающего 483 наименования, и приложений. Работа изложена на 304 страницах, содержит 168 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи диссертационного исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, дана характеристика достоверности полученных результатов и сведения об их апробации.

Глава 1 посвящена анализу результатов исследований вакуумно-плазменного синтеза покрытий и способов реализации ионного сопровождения процесса осаждения покрытий. Отмечается перспективность применения низкоэнергетического ионного сопровождения с возможностью регулировки его интенсивности. Обосновывается целесообразность использования для этого источников электронов с плазменным катодом. Рассмотрен перспективный подход к достижению высоких скоростей осаждения покрытий, основанный на анодном испарении и использовании разряда с самонакаливаемым полым катодом.

В **главе 2** представлены результаты исследований работы плазменного катода с сеточной стабилизацией в условиях генерации плотной плазмы пучком электронов при низких ускоряющих напряжениях; рассматриваются эффекты, обусловленные влиянием плотного обратного потока ионов в электронный эмиттер; представлены результаты комплексного исследования, которые позволили определить условия стабильной эмиссии плазменного катода с высокой эффективностью извлечения в широком диапазоне давлений газа и обеспечить повышенный ресурс эмиссионного электрода.

В **главе 3** приведены результаты комплексного исследования автоколебательного режима эмиссии плазменного катода с сеточной стабилизацией. Определен механизм автоколебаний, заключающийся в обратной связи между потенциалом эмитирующей электроны плазмы и током ионов, инжектируемых в электронный эмиттер из пучковой плазмы.

В **главе 4** показана возможность использования эмиттера электронов с плазменным катодом с сеточной стабилизацией для управления плотностью тока ионного сопровождения и изменения массового состава и зарядового состояния частиц реакционной газовой среды в магнетронной распылительной системе. Рассмотрено влияние тока эмиссии плазменного катода как на условия магнетронного распыления, так и на свойства покрытий, осаждаемых в реакционных средах.

Глава 5 посвящена исследованию гибридной распылительной системы, сочетающий магнетроны и плазменный источник широкого пучка низкоэнергетических электронов. Приводятся результаты комплексного

исследования синтеза стойких к высокотемпературному окислению барьерных проводящих покрытий из Mn-Co шпинели на поверхности токовых коллекторов твердооксидного топливного элемента. Определены условия получения покрытий, характеризующихся низким поверхностным сопротивлением и сохраняющих катионный состав в процессе длительной работы токовых коллекторов.

В главе 6 представлены результаты экспериментов, направленных на повышение ресурса и интеграцию самонакаливаемого полого катода в системы для осаждения покрытий магнетронным распылением в плазме несамостоятельного разряда, поддерживаемого эмиссией плазменного катода с сеточной стабилизацией, реализацию интенсивного ионного сопровождения и оценке его влияния на свойства осаждаемых покрытий.

Глава 7 посвящена разработке высокоскоростного метода синтеза покрытий, основанного на анодном испарении в разряде с самонакаливаемым полым катодом. Представлены результаты комплексного исследования условий генерации плазмы при анодном испарении в дуге низкого давления, диссоциации реакционного газа, осаждения оксидных покрытий и влияния параметров процесса на структурно-фазовое состояние и свойства покрытий.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность результатов исследований обеспечивается использованием современных средств и методик измерений, воспроизводимостью результатов экспериментов, совпадением результатов экспериментов и численных оценок, непротиворечивостью с результатами, полученными другими исследователями, а также созданием действующих экспериментальных образцов газоразрядных систем.

Научная новизна. Среди основных результатов, составляющих научную новизну, следует выделить следующие:

1. Показано, что в источнике низкоэнергетических (~ 100 эВ) электронных пучков на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией снижение энергии электронов при неизменном ускоряющем напряжении и соответствующем уменьшении эффективности генерации ионов в области дрейфа пучка при повышенных давлениях газа обусловлено существенным ростом потенциала плазменного катода под действием обратного ионного потока из пучковой плазмы.

2. Обнаружен и объяснен автоколебательный режим эмиссии плазменного катода с сеточной стабилизацией в источнике низкоэнергетических электронных пучков, характеризующийся частотой 30-

130 кГц, глубиной модуляции энергии электронов в пучке до 90 % и эмиссионного тока не более 20 %.

3. Предложен и реализован способ регулировки в широких пределах интенсивности ионного сопровождения и диссоциации реакционного газа в магнетронной распылительной системе осаждения покрытий, основанный на независимом воздействии на газовую среду пучком низкоэнергетических электронов, генерируемым источником с плазменным катодом с сеточной стабилизацией.

4. На основе разработанных устройств и способов синтезированы покрытия из Mn-Co шпинели, допированной иттрием, на стальных токовых коллекторах (ТК) твердооксидного топливного элемента. Определены структура и оптимальные условия синтеза покрытий, обеспечивающие высокие эксплуатационные характеристики ТК.

5. Показано, что низкий уровень внутренних напряжений нитридных нанокompозитных (TiAlSiN) покрытий и покрытий из бинарных (BN) соединений, синтезируемых методом реакционного магнетронного распыления однокомпонентных мишеней, достигается в условиях сильноточного ионного сопровождения при отношении плотности тока ионов и потока нейтральных частиц более 20.

6. Предложена и апробирована усовершенствованная методика измерения концентрации атомов реакционного газа каталитическим зондом. Впервые проведены измерения степени диссоциации реакционного газа (O_2) каталитическим зондом непосредственно в плазме сильноточного разряда.

7. Разработан высокоскоростной (до 10 мкм/ч) метод осаждения покрытий термическим анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом в среде реакционного газа при высокой интенсивности ионного сопровождения и степени диссоциации газа, достигаемых увеличением частоты взаимодействия электронов с газом в плотных встречных потоках частиц путем сжатия разряда и формирования слоя пространственного заряда в области дополнительного анода.

Практическая значимость результатов работы. Разработан целый ряд газоразрядных устройств и способов нанесения покрытий, которые успешно применяются не только в лабораториях академического института и в образовательной деятельности вуза, но и в условиях промышленного производства, о чем свидетельствуют акты внедрения результатов диссертационной работы. Разработана технология изготовления самонакаливаемого полого катода с повышенным ресурсом работы. О высоком уровне этих разработок свидетельствуют 9 патентов РФ на изобретения.

Апробация результатов исследований. Судя по публикациям автора, материал диссертации прошел широкую апробацию на Всероссийских (4 доклада) и Международных (27 докладов) конференциях. По результатам выполненных исследований опубликовано 27 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. В Главе 1, в частности на с. 28 и 29, при анализе разных распылительных систем значения магнитных полей приводятся в разных единицах измерений (Гс и Тл). Это же относится к единицам измерения давления (Тор и Па) (с. 25 и 28). Это затрудняет сравнение анализируемых систем.

2. На с. 59 со ссылкой на рис. 2.5 утверждается, что рост эффективности извлечения электронов при **отрицательном анодном падении потенциала** обусловлен снижением высоты потенциального барьера в плоскости сетки. Однако, если учесть измерения потенциала плазмы (рис. 2.3), для некоторых условий, в частности для графиков 1 и 4 на рис. 2.3, анодное падение потенциала является положительным. Тем не менее для этих же условий (график 1 на рис. 2.5а и график 1 на рис. 2.5б) эффективность извлечения электронов растет, приближаясь к 1.

3. На с. 203 в формуле (7.5) ошибка. Должно быть
$$v = \sqrt{\frac{8kT_g}{\pi m_0}}.$$

4. Подавляющее число ссылок на свои работы автор приводит только в Заключение. Логичнее было бы приводить эти ссылки в тех разделах диссертации, где излагается оригинальный материал.

5. В тексте диссертации встречаются грамматические ошибки. Некоторые предложения слишком громоздки, занимают 6, 7, а то и 9 строк. Это затрудняет восприятие излагаемого материала.

Отмеченные недостатки не влияют на главные результаты и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение.

Диссертационная работа Каменецких Александра Сергеевича «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодами» является завершенным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно, на

исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. Полученные Каменецких А.С. результаты достоверны, выводы и заключения хорошо аргументированы. Поставленные соискателем цели и задачи выполнены в полном объеме.

Диссертантом получены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение важной научно-технической проблемы – разработка новых технологических процессов и устройств с использованием, электроразрядных, пучковых и плазменных методов и подходов. Эти научные результаты имеют существенное значение не только для электрофизики и электрофизических установок, а также для плазменной эмиссионной электроники.

Диссертационная работа отвечает всем критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Каменецких Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент:

Мартенс Владимир Яковлевич, доктор технических наук, специальность 05.27.02, профессор кафедры экспериментальной физики Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ)

Адрес: 355017, Россия, Ставропольский край, г. Ставрополь, улица Пушкина,
дом 1, СКФУ.

Телефон: +7 918-746-16-14

E-mail: vmartens@yandex.ru

Согласен на обработку персональных данных

19. 09.2025

ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ

Bha

В.Я. Мартенс

начальник Управления
делами СКФУ

Огачева А. В.

