



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИСЭ СО РАН,
д.ф.-м.н.

И.В. Романченко
«05» 09 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, на диссертационную работу Каменецких Александра Сергеевича «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

Рассмотрена диссертационная работа Каменецких А.С. «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодами», выполненная в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Актуальность темы диссертации

Синтез покрытий вакуумно-плазменными методами составляет важнейший кластер современных технологий, обеспечивающих решение задач в различных областях науки и техники. Несмотря на значительный прогресс в этой области постоянно повышающаяся сложность задач требует расширения возможностей и диапазона рабочих параметров, обеспечиваемого такими методами. Исследования, представленные в диссертационной работе Каменецких А.С., направлены на решение проблемы управления условиями вакуумно-плазменного синтеза покрытий, являющейся без сомнений актуальной. Подход к решению проблемы основан на генерации плазмы в устройствах для осаждения покрытий, посредством воздействия на газовую среду пучком электронов, генерируемым источником с плазменным катодом. Достоинства этих источников, такие как высокая эффективность извлечения электронов, возможность генерации пучков с большой площадью поперечного сечения при энергиях, соответствующих максимуму сечений ионизации газов электронным ударом, обуславливают целесообразность их применения с целью регулировки условий синтеза покрытий. Однако специфика условий применения, задаваемых повышенными давлениями газа и генерацией плотной плазмы в области дрейфа пучка электронов, требует рассмотрения сложных и связанных между собой физических процессов, решение нетривиальных задач по обеспечению стабильной работы электронного эмиттера в широких диапазонах изменения рабочих параметров и повышения ресурса критически важных узлов устройства. Решение этих задач необходимо для развития технологий, в основе которых лежит эмиссия плазменного катода, и для интеграции в устройства вакуумно-плазменного осаждения покрытий.

Несомненную актуальность имеют исследования, направленные не только на решение задач по управлению интенсивностью ионного сопровождения и плазмохимических процессов в

среде реакционных газов, но и обеспечение высоких скоростей вакуумно-плазменного синтеза покрытий. В диссертационной работе развит альтернативный подход к реализации высокоскоростного осаждения покрытий реакционным испарением в сильноточном разряде с самонакаливаемым полым катодом. Комплексные исследования, направленные на решение отмеченных выше актуальных задач, имеют высокую значимость для развития технологий вакуумно-плазменного синтеза покрытий.

Диссертационная работа Каменецких А.С. соответствует паспорту специальности ВАК 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки: п. 1. Разработка и создание технической и элементной базы источников высоковольтных и сверхкоротких импульсов, систем электропитания, управления и контроля параметров электрофизических комплексов, включая электроразрядные процессы, коммутацию больших импульсных токов, нагрев и взрыв проводников; п. 7. Разработка новых технологических процессов и устройств с использованием, электроразрядных, пучковых, плазменных, фотоэлектронных и электромагнитных, в том числе лазерных, методов и подходов.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения и семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 303 страницы. Список литературы содержит 483 наименования.

Во введении рассмотрены научные проблемы по тематике работы, обосновывается ее актуальность, обозначены цель и основные задачи работы, приведены защищаемые положения, дана характеристика достоверности полученных результатов и сведения о их апробации.

В первой главе проведен анализ литературных данных об особенностях формирования покрытий вакуумно-плазменными методами, условиях эмиссии плазменных катодов со слоевой стабилизацией эмиссионной поверхности, методах повышения и управления интенсивностью ионного сопровождения, особенностей устройств с анодным испарением в разрядах низкого давления. На основе проведенного анализа обоснованы задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследований работы плазменного катода, направленные на определение условий стабильной работы эмиттера в условиях генерации плотной плазмы ускоренными электронами, расширения диапазона рабочих параметров устройства и ресурса эмиссионного электрода.

Третья глава посвящена исследованию динамического равновесия между параметрами плазменного катода и частотой генерации ионов пучком низкоэнергетических электронов. Рассмотрен автоколебательный режим эмиссии электронов из плазменного катода, определен механизм его возникновения и частотные характеристики.

В четвертой главе показана возможность интеграции источника широкого пучка низкоэнергетических электронов с плазменным катодом в устройстве для осаждения покрытий магнетронным распылением. Рассматривается влияние плазмы, генерируемой пучком низкоэнергетических электронов на условия магнетронного распыления и свойства покрытий, формируемых в реакционных средах.

Пятая глава посвящена исследованиям, направленным на получение покрытий из Mn-Co шпинели на стальных токовых коллекторах твердооксидного топливного элемента и улучшение их свойств.

В шестой главе рассматривается эмиттер электронов на основе разряда с самонакаливаемым полым катодом из нитрида титана, приведены результаты исследований, позволившие повысить ресурс катода такого типа, обеспечить эффективное использование в

системах осаждения покрытий для интенсивного ионного сопровождения. Проведена оценка интенсивного ионного сопровождения на свойства нитридных покрытий.

Седьмая глава посвящена разработке метода высокоскоростного осаждения покрытий реакционным анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом и оценке его возможностей в отношении низкотемпературного синтеза покрытий из оксида алюминия со структурой альфа-фазы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, указывающие на достижение цели диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Показано, что снижение частоты ионизации газа пучком электронов, генерируемым источником с плазменным катодом при низких (~ 100 В) ускоряющих напряжениях, обусловлено ростом потенциала плазмы электронного эмиттера под действием ионного потока, поступающего из пучковой плазмы, которое приводит к значительному снижению разности потенциалов между плазмами и энергии инжектированных электронов.

Обнаружены автоколебания потенциала плазмы электронного эмиттера в источнике пучка низкоэнергетических электронов. Определен механизм возникновения автоколебаний, их частотные характеристики, энергетический спектр пучка электронов, генерируемого в автоколебательном режиме эмиссии плазменного катода.

Реализован способ независимой регулировки в широких пределах интенсивности ионного сопровождения процесса формирования покрытий магнетронным распылением, основанный на воздействии на рабочий газ широким пучком низкоэнергетических электронов.

Проведено комплексное исследование условий синтеза покрытий из Mn-Co, легированных иттрием, на стальных токовых коллекторах топливного элемента с твердым электролитом. Изучены свойства покрытий и определены оптимальные условия синтеза, которые позволяют обеспечить стабильное значение удельного поверхностного сопротивления токовых коллекторов ~ 6 мОм·см² в течение не менее 5000 ч работы.

Показано, что повышение интенсивности ионного сопровождения, обеспечивающее отношение плотностей тока ионов к потоку осаждаемых атомов более 20, позволяет снижать уровень внутренних напряжений в нитридных покрытиях, осаждаемых реакционным магнетронным распылением с однокомпонентных мишеней.

Разработана усовершенствованная методика измерения концентрации атомов реакционного газа каталитическим зондом, непосредственно в плазме сильнооточного разряда. Методика успешно апробирована в экспериментах по определению степени диссоциации кислорода в разряде с самонакаливаемым полым катодом.

Разработан высокоскоростной (~ 10 мкм/ч) метод осаждения покрытий анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом в условиях повышаемой вплоть до 0,5 степени диссоциации кислорода.

Практическая значимость полученных результатов

Полученные в диссертационной работе научные результаты позволили разработать ряд газоразрядных устройств с плазменным катодом, работающих в широком диапазоне давлений газа, токов эмиссии электронов и обеспечивающих высокую эффективность генерации ионов. Решена проблема низкого ресурса сеточного электрода электронного эмиттера, усугубляющаяся в условиях высокоэффективной эмиссии электронов и плотного встречного потока ионов. Предложенные способы управления интенсивностью ионного сопровождения и плазмохимических процессов в среде реакционных газов, а также разработанные устройства,

позволяют расширить возможности систем формирования покрытий. Результаты исследований используются в образовательной деятельности и внедрены в промышленное производство.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов подтверждается систематическим характером исследований с использованием независимых дублирующих методик, соответствием экспериментальных данных и теоретических оценок, а также действующими электрофизическими установками.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 27 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК и международные библиографические базы, были представлены на ведущих международных конференциях и защищены 9 патентами РФ.

Замечания по диссертационной работе

1. На стр. 116 диссертационной работы написано: «Определено, что величина электронной температуры снижается на $\sim 0,1$ эВ при увеличении потока N_2 до $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ ». Вызывает сомнение, что электронная температура определялась с такой высокой точностью, чтобы зафиксировать ее изменение на $0,1$ эВ.

2. Автор неоднократно оперирует термином «эффективность» (например, стр. 49. «...сделан вывод об увеличении энергетической эффективности полых катодов...», стр. 7 «...эффективность систем осаждения покрытий...», стр. 10 «...обеспечивающих высокую эффективность генерации ионов...», стр. 22 «...Переход от диодных схем катодного распыления [42] к магнетронным, значительно превосходящих по эффективности...», стр. 30 «...Эффективность генерации ионов инжектированными электронами...», стр. 31 «...эффективность энергетической релаксации...», стр. 54 «...обеспечить наибольшую эффективность генерации плазмы в области дрейфа пучка...», стр. 60 «...обеспечить высокую эффективность генерации ионов в анодной части...» и др.), однако в большинстве случаев не вводит какого либо критерия, позволяющего провести ее количественную оценку.

3. Автор оперирует термином «частота генерации ионов» (стр. 76, стр. 90, стр. 95, стр. 96, стр. 103, стр. 208, стр. 250) вместо устоявшегося физического термина «частота ионизации».

4. Отсутствует или выполнен весьма фрагментарно сравнительный анализ структуры (фазовый состав, размер кристаллитов, величина внутренних напряжений) и свойств (величина силы адгезии, микротвердость, износостойкость) покрытий, получаемых методами, развиваемыми в диссертации и подобных покрытий, полученных другими методами (авторами других работ).

5. Адгезионная прочность формируемых в диссертационной работе покрытий обсуждается в главах 4-7, однако методика определения силы адгезии в системе «пленка/подложка» рассмотрена лишь в гл. 7 при исследовании покрытий Al_2O_3 . Не понятно, с чем связано такое расположение информации в объеме диссертации.

6. В гл. 6 (стр. 185), используя соотношение 6.1, получены результаты оценки величины внутренних напряжений, формируемых в покрытии. Следует пояснить, как для многофазного материала, каким является покрытие состава $TiAlSiN$ (фазы TiN , $TiAlN$, AlN , Si_3N_4), был определен модуль Юнга, входящий в состав выражения 6.1.

7. На рис. 5.12 и 5.13 (шлиф) следовало бы указать на приведенной линии начальную и конечную точки определения элементного состава материала.

8. Опечатки и плохое согласование слов в предложении (стр. 121 – «рассматривает реакционный газа, как однокомпонентную среду,...», стр. 135 – «микроскопии высокого разращения на приборе JEM 2100 (JOEL)», стр. 144 – «Энергию электронов (~ 100 эВ), инжектируемых в рабочую камеру, соответствовала разности потенциалов...», стр. 176 – «Для

исходного компакта (рисунок 6.7б) характера структура с неоднородными...», не корректная ссылка на выражение (4.8)).

В целом указанные замечания не снижают общей положительной оценки рассматриваемой диссертации, представляющей собой самостоятельную завершённую научно-квалификационную работу, направленную на разработку эффективных способов реализации интенсивного ионного сопровождения и активации газовой среды в системах осаждения покрытий, которые обеспечивают независимую регулировку в широких пределах параметров ионного потока, массового состава и зарядового состояния частиц газа; а также способов высокоскоростного синтеза покрытий в разряде низкого давления.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Каменецких Александра Сергеевича на тему «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодом», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки, по своей актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов полностью отвечает критериям, установленным п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук. Тема и содержание диссертации соответствуют заявленной специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки. Материал изложен грамотным техническим языком с использованием терминологии, принятой среди специалистов в рассматриваемой области.

Диссертация является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой и выполнена автором на высоком научном и техническом уровнях. Работа хорошо структурирована, отличается логикой изложения и четкой взаимосвязью её отдельных частей, удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор диссертации Каменецких Александр Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

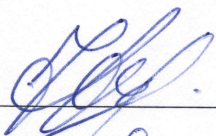
Диссертационная работа обсуждена и одобрена на экспертном научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (протокол № 7 от 04.09.2025 г.), на котором присутствовало 40 специалистов (в том числе 10 докторов и 12 кандидатов наук) в области электрофизики и электрофизических установок, физики плазмы, пучков заряженных частиц и их применения, материаловедения и физики конденсированного состояния.

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН). Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, тел.: +7(3822)492410, e-mail: contact@hcei.tsc.ru, адрес в интернете: <https://www.hcei.tsc.ru>

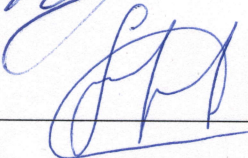
Отзыв составили: главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, доцент Юрий Федорович Иванов, лаборатория плазменной эмиссионной электроники, тел.: +7(3822)49-17-13, e-mail: yufi55@mail.ru; ведущий научный сотрудник, доктор технических наук Максим

Сергеевич Воробьев, лаборатория плазменной эмиссионной электроники, тел.: +7(3822)49-13-00,
e-mail: vorobyovms@opee.hcei.tsc.ru

Главный научный сотрудник
лаборатории плазменной эмиссионной
электроники, д.ф.-м.н., доцент

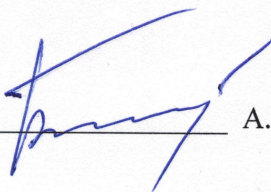

Ю.Ф. Иванов

Ведущий научный сотрудник
лаборатории плазменной эмиссионной
электроники, д.т.н.


М.С. Воробьев

Подписи Иванова Ю.Ф. Воробьева М.С. удостоверяю.

Заместитель директора по НР, к.ф.-м.н.


А.В. Батраков

М.П.  2025 г.