

ОТЗЫВ

об автореферате диссертации Каменецких Александра Сергеевича
*«Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным
сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым
катодами»,*

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки

В настоящее время все больший интерес исследователей привлекают методы плазменного нанесения покрытий. Эффективным способом генерации плазмы в рабочем объеме устройств для осаждения покрытий представляется воздействие на газовую среду широким пучком электронов с энергией, близкой к максимуму сечений ионизации и диссоциации газов электронным ударом. Для ряда газов, представляющих интерес для технологий вакуумно-плазменного синтеза, (например, Ar, N₂, O₂, C₂H₂) указанные энергии составляют ~100 эВ, что обуславливает целесообразность применения источников низкоэнергетических электронных пучков.

Синтез покрытий вакуумно-плазменными методами протекает в сильно неравновесных условиях, что позволяет получать уникальные результаты. Для решения научной проблемы вакуумно-плазменного осаждения покрытий и синтеза тонких пленок требуется комплексный подход, включающий такие аспекты, как разработка эффективных способов, обеспечивающих дополнительное воздействие потоком ионов и увеличение средней энергии, приходящейся на один атом покрытия (E_p) и соответствующее снижение необходимой температуры синтеза; достижение высоких плотностей потоков частиц, формирующих покрытия, что позволит повышать производительность технологических процессов; создание условий для управления массовым составом и зарядовым состоянием частиц реакционного газа в процессе осаждения покрытий; поиск решений для независимой регулировки в широких пределах отношения плотности ионного тока к плотности потока нейтральных частиц и энергии ионов ввиду неэквивалентного характера влияния этих факторов на условия синтеза покрытий; оценка влияния указанных факторов на структурно-фазовое состояние и функциональные характеристики покрытий.

Поэтому поставленных в диссертационной работе вопросов является *актуальной* задачей и имеет высокую значимость для развития вакуумно-плазменных методов модификации материалов.

Целью работы является создание эффективных способов реализации интенсивного ионного сопровождения и активации газовой среды в системах осаждения покрытий, которые обеспечивают независимую регулировку в широких пределах параметров ионного потока (от долей до десятков мА/см² и от десятков до сотен эВ), массового состава и зарядового состояния частиц газа; и способов высокоскоростного синтеза покрытий в разряде низкого давления.

В работе получены новые результаты, имеющие **научную и практическую значимость**, вносящие значительный вклад в решение проблемы управления условиями вакуумно-плазменного осаждения покрытий и синтеза тонких пленок независимой регулировкой в широких пределах интенсивности ионного сопровождения и плазмохимических процессов в среде реакционных газов.

Показано, что в снижение энергии электронов при неизменном ускоряющем напряжении и соответствующем уменьшении эффективности генерации ионов в области дрейфа пучка при повышенных давлениях газа в источнике низкоэнергетических ($\sim 10^2$ эВ) электронных пучков на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией обусловлено существенным ростом потенциала плазменного катода под действием обратного ионного потока из пучковой плазмы. Экспериментально установлено, что механизм нарушения устойчивости биполярного диода между плазменным катодом с сеточной стабилизацией и пучковой плазмой, генерируемой при низких ускоряющих напряжениях в высокоэффективном режиме эмиссии электронов, приводит к сокращению эффективной площади эмитирующей поверхности с соответствующим ростом плотности тока эмиссии электронов. Обнаружен автоколебательный режим эмиссии плазменного катода с сеточной стабилизацией в источнике низкоэнергетических ($\sim 100-300$ эВ) электронных пучков. Показано, что возникновение автоколебаний обусловлено изменением потенциала эмитирующей электроны плазмы под действием обратного потока ионов из пучковой плазмы. Незатухающие колебания поддерживаются вследствие запаздывания изменения потенциала эмитирующей плазмы относительно величины тока ионов из пучковой плазмы, величина которого определяется временем жизни ионов в пучковой плазме. Автоколебательный режим эмиссии плазменного катода с сеточной стабилизацией обуславливает смещение максимума и уширение энергетического спектра пучка низкоэнергетических электронов, что необходимо учитывать при использовании такого режима в плазмохимических процессах с пороговым уровнем воздействия.

Разработан метод получения покрытий термическим анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом, с помощью которого реализовано низкотемпературное высокоскоростное осаждение $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ покрытий в условиях реакционного испарения Al с сильноточным ионным сопровождением. Усовершенствована методика определения концентрации атомарного кислорода каталитическим зондом для измерений в плазме сильноточного разряда. Результаты проведенных исследований позволили разработать ряд газоразрядных устройств на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией, работающих в широком диапазоне давлений газа, токов эмиссии электронов и обеспечивающих высокую эффективность генерации ионов. В этих устройствах решена проблема низкого ресурса эмиссионного электрода, что являлось принципиальным ограничением. Интеграция источников широких пучков низкоэнергетических электронов с плазменным катодом с сеточной стабилизацией в магнетронные распылительные системы позволила существенно расширить возможности по управлению

параметрами ионного сопровождения, массового состава и зарядового состояния частиц реакционной среды, что является основанием для получения новых научных результатов в области осаждения покрытий и синтеза тонких пленок.

Разработанный метод получения покрытий анодным термическим испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом является перспективным, это обусловлено совокупностью основных характеристик, возможностью регулировки плотности ионного тока и степени диссоциации реакционного газа в широком диапазоне значений и подтверждено результатами комплексного исследования условий низкотемпературного синтеза и свойств Al_2O_3 покрытий.

Достоверность результатов обеспечивается использованием комплекса современных методов и дублирующих методик, дополняющих и подтверждающих результаты проведенных измерений, хорошим согласованием результатов проведенных автором работы исследований с результатами расчетов и известными литературными данными.

Результаты работы представлены на российских и Международных симпозиумах, конференциях, семинарах по тематике диссертации и опубликованы в 63 статьях, в том числе 27 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 33 полных текстов докладов на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, семинарах, а также в 9 патентах РФ.

Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях, представленных в диссертации, развитии диагностических методик, анализе и обобщении полученных результатов, создании газоразрядных устройств, экспериментального и технологического оборудования. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Вопросы и замечания.

1. На стр. 20 автореферата отмечается: «В отличие от однофазных TiN, композитные TiC/a-C:H покрытия состоят из нанокристаллической фазы, распределенной в аморфной матрице, что обеспечивает повышенную твердость и температурную стойкость». Каким методом проводилась идентификация нанокристаллической фазы?
2. Как определялась пористость покрытий?
3. На рис.27 автореферата представлены зависимости удельного поверхностного сопротивления образцов Crofer 22 APU с Mn-Co-O покрытием без добавки Y и объемно допированные 1,4 ат. % Y от времени испытаний при 800 °C, ход которых существенно различается. Чем это обусловлено?

Указанные выше замечания и вопросы не снижают общей положительной оценки представленной работы.

Диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября

2013 г № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Каменецких Александр Сергеевич - заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв составили:

Руководитель Отдела материаловедения Института металлургии УрО РАН,
доктор физико-математических наук (специальность 1.4.4 - Физическая химия),



Гельчинский Борис Рафаилович

06.10.2025 г.

Старший научный сотрудник Лаборатории порошковых и композиционных материалов Отдела материаловедения Института металлургии УрО РАН,
кандидат физико-математических наук (специальность 1.4.4 - Физическая химия)



Ильиных Нина Иосифовна

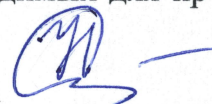
06.10.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина
Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН),
62016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101
Тел. +7 (343) 267-89-14
E-mail: brg47@list.ru

Я, Гельчинский Борис Рафаилович, согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Каменецких Александра Сергеевича.



Я, Ильиных Нина Иосифовна, согласна на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Каменецких Александра Сергеевича.



Подписи д.ф.-м.н. Б.Р. Гельчинского и к.ф.-м.н. Ильиных удостоверяю:
Ученый секретарь ИМЕТ УрО РАН,
к.х.н.

Котенков П.В.

