

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

о работе Каменецких Александра Сергеевича по докторской диссертации «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодами», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

### 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

Исследовательская деятельность Каменецких Александра Сергеевича началась в 2002 году с поступления в аспирантуру Института электрофизики УрО РАН (ИЭФ УрО РАН), на базе которой в 2006 году состоялась защита кандидатской диссертации на тему «Генерация плазмы и формирование ионных пучков в источнике с сетчатым плазменным катодом и магнитным мультиполем» по специальности 01.04.13 - Электрофизика, электрофизические установки.

В последующем Каменецких А.С. продолжил свою научную деятельность в области физики газовых разрядов низкого давления и генераторов плазмы на их основе, затем проблематика исследований была расширена в область синтеза тонких пленок вакуумно-плазменными методами с интенсивным ионным сопровождением, в том числе, с использованием низкоэнергетических электронных пучков, а также изучения структуры и свойств синтезируемых пленок.

Представленная на соискание степени доктора технических наук диссертационная работа Каменецких А.С. выполнена в ИЭФ УрО РАН и направлена на изучение особенностей генерации низкоэнергетических электронных пучков в системах с плазменным катодом с сеточной стабилизацией при повышенных давлениях газа, синтеза пленок магнетронным распылением с ионным сопровождением в плазме низкоэнергетического электронного пучка и термическим анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом, а также исследования структуры и свойств пленок, синтезируемых при высоких плотностях тока ионного сопровождения.

Результаты диссертационной работы заключаются в создании эффективных генераторов низкотемпературной плазмы для систем вакуумно-плазменного нанесения покрытий, применение которых обеспечивает высокие скорости осаждения покрытий в условиях интенсивного ионного воздействия на поверхность покрытия в процессе его роста, чем достигается высокое качество покрытий и их надежное сцепление с материалом основы.

Тематика работы является весьма актуальной и востребованной для решения исследовательских и прикладных задач в области пучково-плазменной инженерии поверхности.

В ходе выполнения работы изучено влияние обратного ионного потока из пучковой плазмы на эмиссию плазменного катода с сеточной стабилизацией при низких ускоряющих напряжениях в условиях эффективной ионизации газовой среды, установлено существование отрицательной обратной связи между током ионов из пучковой плазмы и эмиссией плазменного катода, обнаружен, изучен и объяснен автоколебательный режим эмиссии катода. Следует отметить, что в высоковольтных электронных источниках такая обратная связь отсутствует, поэтому обратный ионный поток является одной из причин ограничения параметров пучка.

В исследованиях влияния обратного ионного потока на распределение потенциала и плотности эмиттирующей электроны плазмы было обнаружено усиление неоднородности радиальных распределений плотности и потенциала плазмы эмиттера электронов с ростом



давления газа и, соответственно, обратного ионного тока, что приводит к локализации эмиссии в приосевой области катода, снижению разности потенциалов между плазмами и, в конечном итоге, к переключению разряда на коллектор электронного пучка, что объясняет механизм «плазменного» пробоя при низковольтном извлечении электронов.

Результаты исследований низковольтной эмиссии плазменного катода при повышенных давлениях газа позволили реализовать его стабильное функционирование и дальнейшее успешное использование в системах нанесения покрытий магнетронным распылением для повышения интенсивности ионного сопровождения и активации газовых смесей. Высокое содержание атомарного азота в пучковой плазме способствовало получению реактивным магнетронным распылением TiN покрытий с повышенной (~35 ГПа) твердостью. Разложение ацетилена под действием электронного пучка и ускорение плазмохимических процессов обеспечили высокую скорость роста нанокompозитных TiC/a-C:H покрытий, осаждаемых магнетронным распылением Ti, и достижение твердости покрытий ~30 ГПа. Разработанная технология магнетронного осаждения в условиях интенсивного ионного сопровождения шпинельного  $\text{MnCo}_2\text{O}_4$  покрытия, допированного иттрием, на ферритные хромистые стали, используемые в качестве материала токовых коллекторов твердооксидных топливных элементов, обеспечила оптимальность состава и структуры таких покрытий, сохраняющих высокую электропроводность ~6 мОм·см<sup>2</sup> в течение 5000 ч при температуре 800 °C. Разработана и внедрена технология синтеза сверхтвердых нанокompозитных TiAlSiN покрытий методом магнетронного реактивного распыления однокомпонентных мишеней.

Дальнейшее развитие Каменецких А.С. технологии осаждения покрытий в условиях интенсивного ионного сопровождения основано на применении сильноточного плазменного сеточного эмиттера электронов на базе разряда с самонакаливаемым катодом. Этим методом были получены и исследованы BN покрытия. Другим перспективным направлением, развиваемым Каменецких А.С., является применение разряда с самонакаливаемым катодом для синтеза покрытий термическим анодным испарением, в том числе, покрытий бинарного состава, например,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . С использованием предложенного метода увеличения степени диссоциации кислорода в разряде до ~0,5 реализовано низкотемпературное (до 500 °C) высокоскоростное (~ 10 мкм/ч) осаждение пленок  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  реакционным испарением в условиях сильноточного (~ 20 мА/см<sup>2</sup>) низкоэнергетического (~ 100 эВ). ионного сопровождения.

В результате проведенного цикла исследований была показана эффективность использования ионного сопровождения, реализуемого с использованием низкоэнергетических электронных пучков и разряда с самонакаливаемым катодом в технологических процессах нанесения покрытий с высокими функциональными свойствами.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в научной периодике, по ним сделан ряд докладов на международных и всероссийских конференциях, получены патенты на изобретения, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

Каменецких А.С. принимал активное участие в выполнении и являлся руководителем ряда проектов РФФИ и РНФ, он также имеет большой опыт выполнения хозяйственных работ.

Наряду с исследовательской работой Каменецких А.С. значительное время уделяет обучению студентов, является доцентом кафедры электрофизики в Уральском федеральном университете, руководит выполнением магистерских работ, имеет опыт работы с аспирантами. Для него характерны целеустремленность и умение вести научный поиск, он

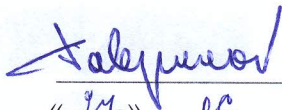
умеет брать на себя ответственность и пользуется заслуженным авторитетом и уважением среди сотрудников Института электрофизики УрО РАН.

Личностные качества соискателя, высокий уровень его компетенций в области физики низкотемпературной плазмы, разрядов низкого давления, получения и исследования тонких пленок, высокая теоретическая и практическая значимость диссертации, определяющий личный вклад автора в полученные результаты позволяют считать Каменецких Александра Сергеевича достойным присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Главный научный сотрудник ИЭФ УрО РАН

доктор технических наук,

член-корреспондент РАН



Гаврилов Николай Васильевич

« 24 » 06 2025 г.

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

Телефон: (343)267-87-96, электронная почта: gavrilo@iep.uran.ru

Подпись Н.В. Гаврилова удостоверяю:

учёный секретарь ИЭФ УрО РАН

к.ф.-м.н.



Кокорина Елена Евгеньевна

« 20 » июля 2025 г.