

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
24.1.160.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА
ЭЛЕКТРОФИЗИКИ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 21.10.2025 г. №7

О присуждении Каменецких Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Генерация плазмы и синтез покрытий с интенсивным ионным сопровождением в газоразрядных системах с плазменным и самонакаливаемым катодами» по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки принята к защите 11.07.2025 г. (протокол № 4) диссертационным советом 24.1.160.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, сайт: www.iер.uran.ru, утвержденным приказом Рособрнадзора № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Каменецких Александр Сергеевич, 1980 года рождения, в 2002 году окончил Государственное образовательное учреждение Уральский государственный технический университет - УПИ; обучался в аспирантуре при Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук с 01.07.2002 г. по 30.06.2005 г. по специальности 01.04.13 – «электрофизика, электрофизические установки» по очной форме обучения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук

«Генерация плазмы и формирование ионных пучков в источнике с сетчатым плазменным катодом и магнитным мультиполем» защитил в 2006 г. в диссертационном совете, созданном на базе Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, работает старшим научным сотрудником в лаборатории пучков частиц Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории пучков частиц Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Научный консультант – Гаврилов Николай Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Окс Ефим Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией плазменной электроники, заведующий кафедрой физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР);

Мартенс Владимир Яковлевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры экспериментальной физики физико-технического факультета Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»;

Семенов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, доцентом, главным научным сотрудником лаборатории плазменной эмиссионной электроники Ивановым Юрием Федоровичем и доктором технических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории плазменной эмиссионной электроники Воробьевым Максимом Сергеевичем, указала, что диссертация А.С. Каменецких является самостоятельной завершенной 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.

Соискатель имеет 118 опубликованных работ, 63 из них – по теме диссертации: 27 статей из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК, индексируемых базой данных RSCI, WeB of Science и Scopus.

Основные научные работы соискателя по теме диссертации, раскрывающие защищаемые положения:

1. Особенности функционирования плазменного катода с сеточной стабилизацией в двухступенчатом ионном источнике / Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. - № 2. – Р. 57–61. (0,3125 п.л. / 0.1562 п.л.)
2. Расширение рабочего диапазона давлений газа и увеличение ресурса сетки плазменного катода в ионном источнике / Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких // ЖТФ. – 2007. –Т.77. –В. 3. –С. 12-16. (0,3125 п.л. / 0.1562 п.л.)

3. Высокоэффективная эмиссия плазменного катода с сеточной стабилизацией / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких // ЖТФ. – 2008. –Т. 78. –В. 10. –С. 59-64. (0,375 п.л. / 0.125 п.л.)
4. Длительные испытания системы La-Sr-Mn катод–стальной токовый коллектор с Mn-Co-O покрытием, нанесенным методом магнетронного распыления / Н.В. Гаврилов, В.В. Иванов, А.С. Каменецких, А.С. Липилин, А.С. Мамаев, А.В. Никонов, Ал.А. Ремпель // Физика и химия обработки материалов. – 2010. - № 4. - Р. 44-50. (0,4375 п.л. / 0.0625 п.л.)
5. Автоколебательный режим генерации пучка в источнике с сетчатым плазменным катодом // Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких // Известия Вузов. Физика. -2012. -Т. 55. -№ 10/3. -С. 88-91. (0,25 п.л. / 0.125 п.л.)
6. Автоколебательный режим генерации электронного пучка в источнике с сетчатым плазменным эмиттером / Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. –В. 10. –С. 32-37. (0,375 п.л. / 0.1875 п.л.)
7. Формирование нанокompозитных TiC/a-C:H покрытий методом магнетронного распыления Ti в Ar/C₂H₂ смеси, активируемой электронным пучком / Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких, А.А. Комарский, А.М. Мурзакаев, А.В. Чукин // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2014. - № 9. - С. 13–20. (0,5 п.л. / 0.1 п.л.)
8. Investigations of Mn–Co–O and Mn–Co–Y–O coatings deposited by the magnetron sputtering on ferritic stainless steels / N.V. Gavrilov, V.V. Ivanov, A.S. Kamenetskikh, A.V. Nikonov // Surface & Coatings Technology. - 2011. – V. 206. – P. 1252-1258. (0,4375 п.л. / 0.1094 п.л.)
9. Characterization of TiAlSiON coatings deposited by plasma enhanced magnetron sputtering: XRD, XPS, and DFT studies / A.S. Kamenetskikh, A.I. Kukhareno, E.Z. Kurmaev, N.A. Skorikov, N.V. Gavrilov, S.O. Cholakh, A.V. Chukin, V.M. Zainullina, M.A. Korotin // Surface & Coatings Technology. - 2015. – V. 278. – P. 87–91. (0,3125 п.л. / 0.0347 п.л.)
10. Ion assisted deposition of α -Al₂O₃ coatings by anodic evaporation in the arc discharge / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, P.V. Tretnikov, A.V. Chukin //

- Surface & Coatings Technology. - 2018. – V. 337. – P. 453–460. (0,5 п.л. / 0.125 п.л.)
11. Al₂O₃ thin films deposition by reactive evaporation of Al in anodic arc with high levels of metal ionization / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, P.V. Tretnikov, D.R. Emlin, A.V. Chukin, Yu.S. Surkov // Surface & Coatings Technology. - 2019. – V. 359. – P. 117–124. (0,5 п.л. / 0.0833 п.л.)
12. Application of the catalytic probe method for measuring the concentration of oxygen atoms in Ar/O₂ plasma of a low-pressure arc / A. Kamenetskikh, N. Gavrilov, S. Krivoshapko, P. Tretnikov // Plasma Sources Sci. Technol. - 2021. – V. 30. – P. 015004. (0,375 п.л. / 0.0937 п.л.)
13. Increasing the oxygen dissociation degree in the plasma of a pulse-periodic Ar/O₂ low-pressure arc / N. Gavrilov, A. Kamenetskikh, P. Tretnikov, S. Krivoshapko // Plasma Sources Sci. Technol. - 2021. – V. 30. – P. 095008. (0,5625 п.л. / 0.1406 п.л.)
14. Analysis of TiAlSiN coatings deposited by reactive magnetron sputtering under high-current ion assistance / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, A.V. Chukin // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2017. – V.11. – P. 671-676. (0,375 п.л. / 0.125 п.л.)
15. A self-heated hollow cathode made of compacted tin powder: the preparation method and test results / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, S.N. Paragin, A.V. Spirin, A.V. Chukin // Instruments and experimental techniques. – 2017. – V.60(5). – P. 742-747. (0,375 п.л. / 0,075 п.л.)
16. Nanocrystalline α -Al₂O₃ coatings obtained by reactive thermal anodic evaporation in arc discharge at low temperature / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, P.V. Tretnikov, A.V. Chukin // Technical Physics Letters.- 2017. - V. 43. - № 10. – P. 951–954. (0,25 п.л. / 0,0625 п.л.)
17. Discharge System with a Self-Heated Hollow Cathode and an Evaporating Anode in a Cusp Magnetic Field for Oxide Coatings Deposition / N.V. Gavrilov, A.S. Kamenetskikh, D.R. Emlin, P.V. Tretnikov, A.V. Chukin // Technical Physics. -2019. - V. 64. № 6. – P.807–813. (0,4375 п.л. / 0.0875 п.л.)

18. Получение Al_2O_3 покрытий реакционным термическим испарением в плазме сильноточного разряда с полым анодом / А.С. Каменецких, Н.В. Гаврилов, Ю.С. Сурков, П.В. Третников, А.В. Чукин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2020. - №1. - С. 98-106. (0,5615 п.л. / 0.1125 п.л.)

На диссертацию поступили отзывы. Все отзывы положительные, но имеется ряд замечаний.

В отзыве ведущей организации имеются следующие замечания:

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 6.76) характера структура с неоднородными...», не корректная ссылка на выражение (4.8)).

В отзыве официального оппонента д.т.н., профессора Ефима Михайловича Окса имеются следующие замечания:

1. Диссертационная работа отражает большой объем проведенных исследований, каждый из результатов, которых связан с решением отдельной

научной или практической задачи. Взаимосвязь различных объектов исследований, которая определяет целостность диссертационной работы, недостаточно обоснована.

2. Формулировки научной новизны излишне конкретизированы и в ряде пунктов они практически дублируют выносимые на защиту научные положения.

3. Пункт научной новизны о снижении ионизационной способности низкоэнергетичных электронов является, по своей сути, отрицательным результатом. В формулировке этого пункта научной новизны следовало бы указать методы и подходы, а также технические решения, нивелирующие этот эффект.

4. Влияние расширения площадей анода и эмиссионного электрода на параметры и характеристики плазменного эмиттера электронов на основе тлеющего разряда, обсуждается, главным образом, с точки зрения возможности замены мелкоструктурной сетки на перфорированный крупноапертурный электрод для повышения ресурса и влияния размера апертур на эффективность генерации ионов, тогда как такой не менее важный результат, как стабилизация параметров плазменного катода прикратно более высоких давлениях рабочего газа, в диссертации обсуждается недостаточно детально.

5. Неоднократно используемый в диссертационной работе термин «сеточная стабилизация» в большей степени отражает одно из возможных конструктивных решений, обеспечивающих стабилизацию параметров источника электронов с плазменным катодом. Кроме сеток может быть также использован электрод с одним или множеством перфорированных эмиссионных отверстий и даже со щелевой эмиссионной поверхностью. Во всех случаях реализуется физический механизм, обуславливающий отрицательную обратную связь в виде реакции эмиссионных параметров плазмы на случайное изменение тока электронного пучка. Такой механизм стабилизации отчетливо проявляется при протяженности анодного слоя,

соизмеримого с характерным размером эмиссионной структуры. Именно поэтому с точки зрения физических процессов эмиссии электронов из плазмы правильнее использовать термин «слоевая стабилизация».

6. Привлечение для объяснения полученных результатов параметра «потенциал плазменного катода», под которым очевидно подразумевается потенциал эмиссионной плазмы, затрудняет восприятие диссертационного материала.

7. Из представленного списка основных публикаций по теме диссертационной работы, входящих в перечень ВАК, следует исключить статьи в журнале «Известия ВУЗов. Физика» выпуски с дробной чертой (автореферат, номера в списке публикаций по теме диссертации 6,11,12,13), поскольку эти выпуски не переводились и являются трудами конференций.

В отзыве официального оппонента д.т.н., доцента Владимира Яковлевича Мартенса имеются следующие замечания:

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.

В отзыве официального оппонента д.т.н., профессора Александра Петровича Семенова имеются следующие замечания:

1. В диссертации (с. 11, п. 3 выносимых на защиту научных положений) утверждается «Увеличение степени диссоциации и ионизации реакционной газовой среды под действие низкоэнергетического... электронного пучка в процессе осаждения покрытий обеспечивает возможность кратного снижения давления реакционного газа, ... позволяет синтезировать при пониженных давлениях газа ... покрытия из бинарных соединений TiN с повышенной твердостью 35 ГПа ...». Определенно требует пояснения, какими факторами (технологическими, структурными) обусловлены столь высокие величины микротвердости покрытий TiN.

2. На рисунке 2.6, с. 61 приведены зависимости ионного тока на коллектор от давления газа с наблюдаемым немонотонным ходом зависимости для размеров ячейки сетки 1,2 мм при токах разряда 0,2-0,6 А, требует пояснения, немонотонный ход зависимости в отличие от растущих зависимостей для размеров ячейки 0,6 мм.

3. Экспериментальная зависимость отношения тока на коллектор к току разряда I_k/I от давления газа (с. 87, рисунок 3.3), имеет крутой и пологий участки с ростом давления, требует пояснения такой ступенчатый характер зависимости при постоянных токе разряда 2 А и ускоряющем напряжении 100 В.

4. Установлено, - максимальное значение твердости покрытий TiAlSiN достигается при токе эмиссии электронов 20 А (рисунок 6.12, с. 182) при

меньших и больших значениях твердость покрытий снижается каковы доминирующие факторы достижения максимальной твердости покрытий.

5. В автореферате (раздел «Список основных работ, опубликованных по теме диссертации, с. 42) имеет место, - список статей включается ссылки (п.п. 21-25) на российские переводные журналы и тут же в перечне повторяются ссылки на те же самые переводные статьи, достаточно указать ссылки на статьи, опубликованные, либо в исходных российских журналах, либо их переводные версии.

В положительном отзыве от д.ф.-м.н., Никифорова Сергея Владимировича, доцента, заведующего кафедрой физических методов и приборов контроля качества Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина отмечено следующее замечание: В тексте автореферата следовало бы раскрыть понятие «биполярный диод», применяемого в отношении системы с плазменным катодом и пучковой плазмой, что сделало работу более доступной широкому кругу специалистов из смежных областей.

В положительном отзыве д.т.н., ведущего научного сотрудника Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники Виктора Алексеевича Бурдовицина отмечено следующее замечание: Ряд наблюдаемых эффектов, в частности, высокоэффективный режим эмиссии плазменного катода, автоколебания потенциала плазмы объясняются влиянием ионного потока из пучковой плазмы в плазму электронного эмиттера. В отсутствие прямых измерений ионного тока это объяснение представляется спорным.

В положительном отзыве д.т.н., профессора кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, заведующего лабораторией «In situ диагностики структурных превращений» НУЦ СВС МИСИС-ИСМАН Филиппа Владимировича Кирюханцева-Корнеева отмечены следующие замечания: а) желательно было бы привести в автореферате информацию о научных проектах, в рамках которых выполнялись разработки и

исследования, б) в автореферате отсутствует информация, связанная с внедрением результатов, хотя в самом тексте диссертации приведено два акта внедрения результатов диссертационной работы, в) хотелось бы видеть в описании методической части более детализированную информацию о методах исследований и используемых приборах.

В положительном отзыве д.ф.-м.н., руководителя Отдела материаловедения Института металлургии УрО Бориса Рафаиловича Гельчинского и к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории порошковых и композитных материалов Отдела материаловедения Института металлургии УрО РАН Нины Иосифовны Ильиных отмечены следующие 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?

В положительном отзыве к.т.н., старшего научного сотрудника лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники Максима Валентиновича Шандрикова отмечены следующие замечания: 1. В тексте встречаются ошибки (опечатки): стр.3, «не одни атом»; стр.10, высокоскоростное осаждения; стр. 25, «Из анализ образцов»; стр. 32, «Плоский анодразмещался». 2. Во введении автор неоднократно отмечает важность достижения такого параметра, как «высокий ионный флюенс», однако далее ни в автореферате, ни в самой диссертационной работе этот термин больше не встречается ни разу. 3. Также автор использует термин «распределенная эмиссия». Полагаю, что наряду с таким

общепринятыми и известными терминами как взрывная электронная, термоэлектронная, ион-электронная эмиссия, введения нового термина «распределенная эмиссия» требует дополнительных пояснений.

В положительном отзыве к.т.н., доцента, Дмитрия Александровича Довгяло, заведующего кафедрой энергетики и электроники Полоцкого государственного университета имени Ефросинии Полоцкой и доцентов кафедры к.т.н. Виктора Фрацевича Янушкевича и к.т.н. Татьяны Викторовны Молодечкиной отмечено следующее замечание: на странице 38 обнаружена грамматическая ошибка ...ускоряющих напряжения...

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что совокупность результатов диссертационной работы позволяет решить важную научную проблему 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, является научным базисом для метода осаждения покрытий реакционным анодным испарением в разряде с самонакаливаемым полым катодом.

Представлены новые научно обоснованные технические решения, обеспечившие расширение диапазона рабочих давлений, при котором обеспечивается стабильная эмиссия плазменного катода с высокими значениями эффективности извлечения электронов и частоты ионизации газа в области дрейфа электронного пучка, а также повышение ресурса наиболее критического узла источника электронов с плазменным катодом – сеточного электрода.

Обнаружен автоколебательный режим эмиссии плазменного катода в источнике низкоэнергетических электронных пучков, характеризующийся

большой глубиной модуляции энергии электронов. Определен и экспериментально обоснован механизм развития автоколебаний.

Предложен и реализован способ управления ионным сопровождением синтеза покрытий и плазмохимическими процессами в реакционных газовых средах в магнетронных распылительных системах, основанный на генерации плазмы широким пучком низкоэнергетических электронов. Показано, что воздействие на газовую среду указанным способом обеспечивает кратное снижение давления реакционного газа, необходимого для формирования покрытий стехиометрического состава, позволяет достигать высоких значений отношения плотностей тока ионного сопровождения и потока осаждаемых атомов, снижать энергию ионов и обеспечивать формирование требуемого структурно-фазового состояния покрытий при низком уровне внутренних напряжений. С применением указанного способа в магнетронных распылительных системах получен ряд покрытий с улучшенными функциональными характеристиками, в числе которых покрытия из Mn-Co шпинели, обеспечивающие стабильно низкий уровень удельного поверхностного сопротивления стальных токовых коллекторов твердооксидных топливных элементов.

На основе разработанных самонакаливаемых полых катодов из нитрида титана с повышенным ресурсом реализованы технологии, обеспечивающие интенсивное ионное сопровождение с отношением плотностей ионного тока и потока осаждаемых атомов вплоть до 25 и высокоскоростной (вплоть до 10 мкм/ч) низкотемпературный (500 °C) синтез нанокристаллических покрытий из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ реакционным анодным испарением.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что создан ряд новых газоразрядных устройств на основе плазменного катода, работающих в широком диапазоне давлений газа, токов эмиссии электронов и обеспечивающих высокую эффективность генерации ионов и ресурс эмиссионного электрода. Эти газоразрядные устройства позволяют существенно расширить возможности по управлению параметрами

технологических процессов синтеза покрытий в реакционных средах. Перспективность разработанного высокоскоростного метода получения покрытий анодным термическим испарением в сильноточном разряде обусловлена совокупностью основных характеристик, возможностью регулировки плотности тока ионного сопровождения и степени диссоциации реакционного газа в широком диапазоне значений. Результаты работы используются в течение 12 лет в действующей установке ионно-плазменного нанесения покрытий в АО «Институт реакторных материалов», а также при подготовке студентов по направлению 11-04-04 Электроника и наноэлектроника.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются систематическими исследованиями с использованием современных апробированных методов и независимых дублирующих методик, непротиворечивостью полученных данных, их согласием с результатами теоретических расчетов и известными из литературных источников.

Личный вклад соискателя заключается в экспериментальных исследованиях, представленных в диссертации, развитии диагностических методик, анализе и обобщении полученных результатов, создании на основе полученных результатов газоразрядных устройств, экспериментального и технологического оборудования, апробации результатов на научных конференциях.

В ходе защиты диссертации были заданы следующие вопросы:

- 1) Какие максимальные размеры подложек, на которые осаждались покрытия в разработанных системах?
- 2) В каких случаях использовался импульсно-периодический режим горения разряда?
- 3) Какие максимальные толщины покрытий были достигнуты и насколько они вакуумно-плотные?

4) Для получения этих стабильных эффектов достаточно стабильности промышленной сети или требуются повышенные стабильности источников питания?

5) Как регулировалась энергия ионов, воздействующих на покрытий в процессе их осаждения?

Соискатель подробно и обоснованно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и согласился с некоторыми замечаниями.

На заседании 21.10.2025 г. диссертационный совет 24.1.160.01 принял решение:

за новые научно обоснованные физико-технические решения в области создания источников широких пучков низкоэнергетических электронов и разработку методов вакуумно-плазменного синтеза покрытий, отвечающие на большие вызовы, обозначенные приоритетным направлением Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, и имеющие важное значение для развития критических технологий Российской Федерации, присудить Каменецких Александру Сергеевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту человек 0, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н, чл.-корр.РАН

С. Чайковский

Чайковский Станислав Анатольевич

Ученый секретарь диссертационного

совета д.ф.-м.н

Медведев

Медведев Михаил Владимирович



Дата оформления Заключения

21.10.2025 г.