

## Заключение

диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19 февраля 2020 г. № 4

О присуждении Савичкину Денису Олеговичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование взаимодействия низкотемпературной плазмы газового разряда в смеси аргон – пары ртути и электрода с диэлектрической пленкой на поверхности» по специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния принята к защите 09.12.2019 г. (протокол заседания № 28) диссертационным советом Д 212.141.17, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Савичкин Денис Олегович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил магистратуру факультета общей и прикладной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) по направлению подготовки «Прикладные математика и физика». С 2016 года соискатель является аспирантом очной формы обучения на кафедре проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия.

Диссертация выполнена на кафедре проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Крестя Владимир Иванович, профессор, профессор кафедры высшей математики и физики Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

Волков Степан Степанович – доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова» Министерства обороны Российской Федерации, профессор кафедры автомобильной техники:

Тимохин Максим Юрьевич – кандидат физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», научный сотрудник кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Отделения экспериментальной и теоретической физики Физического факультета

дали положительные отзывы на диссертацию.

В то же время официальные оппоненты сделали ряд критических замечаний, на которые соискатель ученой степени Савичкин Денис Олегович дал убедительные разъяснения.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», в своем положительном отзыве, подписанном Шешиным Евгением Павловичем, доктором физико-математических наук, заслуженным профессором МФТИ (НИУ), заместителем заведующего кафедрой вакуумной электроники и утвержденном Баганом Виталием Анатольевичем, проректором по научной

работе и программам развития, указала, что диссертация Савичкина Дениса Олеговича, посвященная решению одной из фундаментальных задач физики конденсированного состояния – исследованию взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с твердым телом в низкотемпературной газоразрядной плазме, актуальна и представляет большой интерес как с общефизической, так и с прикладной точек зрения. Она является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных автором исследований решена важная для физики конденсированного состояния, а также электронного материаловедения, научная и практическая задача исследования влияния температуры рабочей газовой смеси аргон – пары ртути и наличия тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода на особенности его взаимодействия с плазмой в газоразрядных приборах. Результаты диссертации могут быть использованы в исследовательских лабораториях, в научно-исследовательских центрах и институтах, занимающихся исследованием взаимодействия твердого тела с плазмой (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Московский физико-технический институт, Московский инженерно-физический институт, Московский энергетический институт, Рязанский государственный радиотехнический университет).

Критические замечания, высказанные в отзыве ведущей организации, Савичкин Денис Олегович подробно прокомментировал.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликованы 6 работ. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации 4,76 п. л., из которых 2,03 п. л. принадлежат лично соискателю. Требования п.п. 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемые к публикации основных научных результатов диссертации, выполняются. Требования, установленные п. 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, соблюдаются. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Кристя В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р. Моделирование распыле-

ния катода в слаботочном газовом разряде в смеси аргона с парами ртути // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 4. С. 84–87 (англоязычная версия: Kristya V.I., Savichkin D.O., Fisher M.R. Modeling of cathode sputtering in a low-current gas discharge in a mixture of argon with mercury vapor // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10. No. 2. P. 441–444).

2. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О. Влияние полевой электронной эмиссии из катода с диэлектрической пленкой на характеристики нормального тлеющего разряда // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. №2. С. 129-134 (англоязычная версия: Bondarenko G.G., Kristya V.I, Savichkin D.O. Influence of the field electron emission from the cathode with an insulating film on the normal glow discharge characteristics // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60. No. 2. P. 346-352).

3. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. Modeling of the effect of field electron emission from the cathode with a thin insulating film on its emission efficiency in gas discharge plasma // Vacuum. 2018. Vol.149. P.114-117.

4. Савичкин Д.О., Кристя В.И. Моделирование методом Монте-Карло энергетических спектров ионов и быстрых атомов у поверхности электрода в слаботочном разряде в смеси аргона с парами ртути // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 2. С. 107-112 (англоязычная версия: Savichkin D.O., Kristya V.I. Modeling of the glow discharge cathode sheath and the cathode surface sputtering in a mixture of argon with mercury vapor // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13. No. 1. P. 163-167).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: **Симакова С.В.** доктора физико-математических наук, заведующего лабораторией ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН» (г. Москва); **Коробейщикова Н.Г.**, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника отдела прикладной физики физического факультета ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г. Новосибирск); **Суворинова А.В.**, доктора технических наук, главного научного сотрудника ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий» (г. Москва), **Хасаншина Р.Х.**, кандидата физико-математических наук, доцента, начальника лаборатории радиационных и вакуумно-тепловых испыта-

ний Акционерного общества «Композит» (г. Королев Московской обл.); **Смоланова Н.А.**, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (национальный исследовательский университет)» (г. Саранск).

Все отзывы положительные. В качестве замечаний отмечено, что: в работе не изучено представляющее несомненный интерес влияние углового распределения бомбардирующих катод ионов и быстрых атомов на эффективный коэффициент распыления ими катода в разряде (Симаков С.В.); в ней не изучен вопрос о влиянии возможной неравномерности толщины диэлектрической пленки по поверхности катода на эмиссионную эффективность катода и процесс его распыления в разряде (Коробейщиков Н.Г.). Моделирование распыления катода с диэлектрической пленкой на поверхности выполнено в диссертации только для слаботочного разряда, возникающего непосредственно после пробоя разрядного промежутка. Однако более интенсивное распыление катода может происходить после перехода слаботочного разряда в тлеющий разряд, который горит до возникновения в приборе дугового разряда. Но влияние диэлектрической пленки на катод на характеристики тлеющего разряда (за исключением его нормального режима) в диссертации не исследовано (Суворинов А.В.). Расчеты в диссертации проводились только при достаточно низких температурах рабочей смеси, характерных для начального этапа горения разряда в газоразрядных приборах, в то время как в их рабочих режимах она может принимать существенно более высокие значения (Хасаншин Р.Х.). В автореферате используется формула Фаулера-Нордгейма для плотности тока полевой эмиссии из подложки в пленку. Но первоначально эта формула была получена для случая полевой эмиссии из металла в вакуум. В автореферате не поясняется, остается ли она справедливой для описания полевой эмиссии электронов из металла в диэлектрик (Смоланов Н.А.).

На все критические замечания, содержащиеся в отзывах на автореферат диссертации, Савичкин Денис Олегович дал аргументированные ответы.

В то же время все специалисты, представившие свои отзывы, считают, что высказанные замечания не снижают общей значимости диссертации Савичкина Д.О., представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, а ее

автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обоснован тем, что они являются компетентными учеными в области физики взаимодействия низкотемпературной плазмы с поверхностью твердого тела и эмиссионной электроники (Волков С.С.) и в области моделирования движения атомных частиц в газовых средах и их взаимодействия с твердыми поверхностями (Тимохин М.Ю.). Выбор ведущей организации обоснован тем, что ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» имеет научную школу, исследующую влияние температуры и химического состава материалов на их свойства, и в частности, на эмиссионные свойства катодных материалов. В штате университета состоят высококвалифицированные специалисты, способные объективно и всесторонне оценить результаты и выводы диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** модель слаботочного газового разряда в смеси аргона с парами ртути, позволяющая рассчитать движение в разрядном промежутке ионов и быстрых атомов, основанная на использовании метода статистического моделирования Монте-Карло и позволяющая учесть стохастичность межчастичных столкновений в разряде;

**предложена** модель переноса электронов в тонкой диэлектрической пленке при наличии в ней сильного электрического поля, учитывающая полевою эмиссию электронов из металлической подложки катода в пленку, их движение в ней и выход в разрядный объем;

**доказано**, что, несмотря на малую концентрацию ртути в смеси, существенный вклад в распыление катода в таком разряде могут вносить ионы ртути и быстрые атомы аргона, образующиеся при упругом рассеянии ионов ртути на медленных атомах аргона;

**введено понятие** эмиссионной эффективности диэлектрической пленки на катоде как функции ее параметров.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: **доказано**, что при перезарядке и упругих столкновениях ионов с медленными атомами образуется большое количество быстрых атомов аргона, причем

ионы ртути вносят в этот процесс основной вклад, так как значительная их доля имеет энергии, превосходящие энергии ионов аргона;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** аналитические и численные методы математического моделирования движения ионов и атомов в объеме газового разряда, а также эмиттированных в диэлектрическую пленку электронов в ее зоне проводимости;

**изложены** результаты исследования энергетических распределений потоков ионов и быстрых атомов у поверхности катода, а также величины эффективного коэффициента распыления ими катода при различных разрядных условиях;

**раскрыта** необходимость учета вклада Пеннинговской ионизации атомов ртути метастабильными возбужденными атомами аргона в моделях разрядов в смеси аргон-ртуть при ее температурах порядка комнатной;

**изучена** связь между интенсивностью распыления катода в газоразрядном приборе и наличием на его поверхности диэлектрической пленки;

**проведена модернизация** существующих моделей распыления поверхности катода газоразрядного прибора для случая наличия на его поверхности диэлектрической пленки.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработан** метод расчета эмиссионной эффективности диэлектрической пленки в газовом разряде;

**определены** вклады различных типов частиц в распыление катода в смеси аргон-ртуть при различных температурах и напряженностях электрического поля;

**создана** методика расчета эффективного коэффициента распыления катода с поверхностной диэлектрической пленкой в разряде в смеси аргон-ртуть при ее различных температурах;

**представлены** рекомендации по усовершенствованию конструкции электродов газоразрядных приборов с целью увеличения их срока службы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**все теоретические положения** построены на основе классических уравнений физики, при этом для их решения применены теоретически обоснованные методы;

**идея** о возможности увеличения долговечности катода при наличии на нем диэлектрической пленки **базируется** на опубликованных в научной литературе результатах;

**использовано** сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными (Donkó Z., Suzuki M., Kusunoki T.);

**установлено** качественное и количественное соответствие авторских результатов с результатами, полученными другими авторами;

**использованы** современные методы математического моделирования, основанные на аналитическом и численном решении моделирующих уравнений с помощью компьютерных технологий.

**Личный вклад соискателя состоит в:** участии в формулировке задач исследования, разработке представленных в диссертации моделей и их анализе, разработке алгоритмов решения поставленных задач и осуществлении их программной реализации, апробации результатов исследования, а также в участии в их анализе и в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертационная работа Савичкина Дениса Олеговича «Моделирование взаимодействия низкотемпературной плазмы газового разряда в смеси аргон – пары ртути и электрода с диэлектрической пленкой на поверхности» соответствует критериям, установленным п.п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Она является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной для физики конденсированного состояния научной задачи, связанной с разработкой методов расчета распыления в газовом разряде в смеси аргон-ртуть поверхности катода при наличии на ней диэлектрической пленки, с целью увеличения долговечности газоразрядных приборов. Диссертация Савичкина Дениса Олеговича обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку.

На заседании 19 февраля 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Савичкину Денису Олеговичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.



При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель

диссертационного совета  Коржавый Алексей Пантелеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета  Лоскутов Сергей Александрович

Дата оформления Заключения 19 февраля 2020 года.