

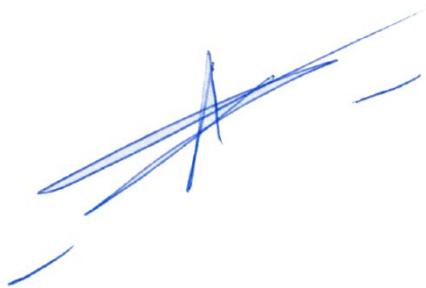
На правах рукописи

Савичкин Денис Олегович

Моделирование взаимодействия низкотемпературной плазмы газового разряда в смеси аргон – пары ртути и электрода с диэлектрической пленкой на поверхности

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Кристиа Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Волков Степан Степанович**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГКВОУ ВО «Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова», профессор кафедры автомобильной техники

Тимохин Максим Юрьевич
кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», научный сотрудник кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Отделения экспериментальной и теоретической физики Физического факультета

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «19» февраля 2020 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» и на сайтах www.bmstu.ru , www.bmstu-kaluga.ru

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Лоскутов С. А.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время, несмотря на интенсивную разработку светодиодных технологий, одним из основных типов осветительных приборов, а также источников ультрафиолетового излучения в системах обеззараживания воды, являются газоразрядные лампы, в которых в качестве рабочего газа используется смесь аргона и паров ртути. При включении лампы под действием напряжения, приложенного к ее электродам, происходит пробой газа в межэлектродном промежутке и зажигается слаботочный (таунсендовский) разряд, переходящий затем в тлеющий разряд, в котором основным механизмом эмиссии с катода электронов, необходимых для поддержания разряда, является ионно-электронная эмиссия. Когда температура электрода, выполняющего функцию катода, в результате его нагрева поступающим из разряда потоком тепла становится достаточно высокой, с него начинается термическая эмиссия электронов, и разряд переходит в дуговой, характеризующийся значительно меньшим межэлектродным напряжением, чем тлеющий разряд. Срок службы газоразрядных ламп в значительной степени определяется процессом распыления катода ионами и быстрыми атомами до перехода разряда в дуговой, так как их долговечность в непрерывном режиме работы существенно больше, чем в режиме периодических включений – выключений.

Особенность газового разряда в смеси аргона с парами ртути состоит в том, что в нем, кроме прямой ионизации атомов электронами, происходит ионизация атомов ртути при их столкновениях с метастабильными возбужденными атомами аргона (реакция Пенninga). Это обуславливает зависимость характеристик разряда от температуры, так как при ее снижении быстро уменьшается концентрация насыщенных паров ртути и возрастает напряжение горения разряда, что может влиять на энергию бомбардирующих катод частиц и срок службы прибора.

Один из методов снижения напряжения горения разряда в газоразрядных приборах состоит в формировании на поверхности их электродов тонкой диэлектрической пленки. При бомбардировке поверхности диэлектрика в разряде положительно заряженными ионами в пленке возникает электрическое поле, достаточное для туннелирования в него электронов из металлической подложки электрода, часть из которых может выходить в разряд. В результате, улучшаются эмиссионные свойства катода, уменьшается напряжение поддержания разряда, а, следовательно, снижаются энергии бомбардирующих его частиц, что увеличивает долговечность лампы.

Однако ряд вопросов, связанных с влиянием температуры смеси аргона-ртуть и наличия на катоде диэлектрической пленки на процессы, протекающие в приэлектродном слое разряда, а также на распыление катода в нем, до настоящего времени остаются недостаточно изученными. Экспериментальное исследование физических процессов в осветительных лампах затрудняется тем, что разряд горит внутри запаянной кварцевой колбы достаточно малого размера. Поэтому важное значение для понимания механизмов взаимодействия поверхности электродов с газоразрядной плазмой ртутных ламп имеет математи-

ческое моделирование. Это определяет актуальность данной работы, а также ее значение для физики взаимодействия плазмы сложного состава с поверхностью твердого тела и физической электроники.

Степень разработанности темы диссертации. Теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, протекающих в различных типах газовых разрядов и на поверхности электродов газоразрядных приборов, проводились в работах многих отечественных и иностранных авторов: Ю.П. Райзера, Ю.Д. Королева, Л.Д. Цендина, В.В. Кучинского, L.C. Pitchford, J.P. Boeuf, Z. Donkó, A. Bogaerts, A.V. Phelps, Z.Lj. Petrović и других. Но в них рассматривались, как правило, разряды в чистых инертных газах и их смесях с не зависящим от температуры содержанием компонент. Характеристики же слаботочного и тлеющего разрядов в смеси аргона и паров ртути с зависящим от температуры составом и, в частности, энергетические спектры основных типов частиц, бомбардирующих катод, а также их вклады в его распыление, не изучены. Не исследовано также влияние наличия на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки на его эмиссионные свойства и параметры разряда.

Целью диссертационной работы являлось исследование методами математического моделирования взаимодействия низкотемпературной плазмы в смеси аргона и паров ртути с поверхностью катода газоразрядного прибора при наличии на нем тонкой диэлектрической пленки. Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи:**

- построение моделей слаботочного разряда и катодного слоя тлеющего разряда в смеси аргон-ртуть, исследование зависимости их характеристик от температуры смеси и разрядных условий, а также расчет энергетических спектров ионов и быстрых атомов, бомбардирующих катод;

- разработка модели, описывающей туннелирование электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку на его поверхности, их перенос в зоне проводимости пленки и выход из нее;

- изучение влияния наличия на катоде диэлектрической пленки на характеристики газового разряда в смеси аргона с парами ртути и интенсивность его распыления ионами и быстрыми атомами.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Исследована зависимость характеристик слаботочного разряда и катодного слоя тлеющего разряда в смеси аргон-ртуть от температуры и рассчитаны плотности потоков ионов и быстрых атомов у поверхности металлического катода в такой смеси, а также плотности потоков распыленных с него атомов, определяющие долговечность катода в разряде.

2. Установлено, что при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки полевая эмиссия электронов из подложки может приводить к существенному снижению катодного падения напряжения нормального тлеющего разряда вследствие увеличения эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода.

3. Построена модель, описывающая туннелирование электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку и их перенос в ней.

Получено аналитическое выражение для эмиссионной эффективности пленки, равной доле эмитированных электронов, которые выходят из пленки в разряд, описывающее ее зависимость от толщины пленки и напряженности электрического поля в ней.

4. Построена модель слаботочного разряда с катодом, на поверхности которого находится тонкая диэлектрическая пленка. Рассчитаны распределения по энергиям частиц, бомбардирующих катод в таком разряде, а также интенсивности распыления катода ионами обоих компонент смеси и быстрыми атомами аргона при различных температурах. Проведено сравнение их величин, найденных при наличии на катоде пленки и при ее отсутствии.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что результаты, полученные при ее выполнении, вносят существенный вклад в понимание процессов, протекающих при взаимодействии низкотемпературной плазмы разряда в смеси аргон-ртуть с катодом, на поверхности которого существует тонкая диэлектрическая оксидная пленка. Они могут быть использованы для:

- оценки вкладов различных типов частиц в распыление катода в слаботочном и тлеющем разряде в смеси аргона с парами ртути;
- определения эмиссионной эффективности диэлектрической пленки на катоде как функции ее параметров, а также изучения влияния этой величины на эффективный коэффициент электронной эмиссии катода при наличии на его поверхности такой пленки;
- изучения влияния толщины диэлектрической пленки на поверхности катода на характеристики катодного слоя разряда, определяющие интенсивность распыления катода и его долговечность, а также усовершенствования конструкции электродов с целью улучшения их эмиссионных свойств и увеличения срока службы газоразрядного прибора.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в прикатодном слое разряда и на поверхности катода, во многих случаях затруднительно, поскольку толщина такого слоя при достаточно высоких давлениях газа может составлять доли миллиметра. Поэтому в данной диссертационной работе в качестве основного метода исследования использован метод математического моделирования, который позволяет детально изучить процессы, протекающие в разряде и на поверхности катода, а также их взаимосвязь.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Модель слаботочного разряда в смеси аргона и паров ртути с зависящим от температуры составом. Вывод о том, 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.

2. Модель переноса электронов в тонкой диэлектрической пленке при наличии в ней сильного электрического поля, учитывающая полевую эмиссию электронов из металлической подложки катода в пленку, их движение в ней и

выход в разрядный объем, а также аналитическое выражение для эмиссионной эффективности пленки как функции ее параметров.

3. Модель слаботочного разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и результаты расчетов на основе этой модели, показывающие, что полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода может приводить к существенному увеличению его эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии и снижению напряжения горения разряда.

4. Рассчитанные спектры ионов и быстрых атомов, плотности их потоков у поверхности катода, а также эффективные коэффициенты его распыления различными типами частиц и плотности потоков распыленных ими атомов материала катода. Вывод о том, что при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки происходит существенное снижение энергий бомбардирующих его частиц и уменьшение эффективного коэффициента распыления катода, что может обуславливать увеличение его долговечности в разряде.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректной постановкой задач с использованием классических уравнений физики, применением для их решения теоретически обоснованных методов, а также согласием результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в постановке задач и разработке алгоритмов их численного решения, выполнил программную реализацию построенных математических моделей, провел расчеты и обработку полученных результатов, а также принимал участие в их анализе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на 10 международных и всероссийских конференциях: XLV, XLVI, XLVII, XLVIII, XLIX Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г.), XXV, XXVI Международных конференциях «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2015 г., 2016 г.), X Международной конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (Москва, 2016 г.), XXIII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва, 2017 г.), Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (Казань, 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК и 10 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях. Шесть статей проиндексированы в Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 167 наименований. Её общий объем составляет 119 страниц, включая 42 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы ее цель и задачи, указаны научная новизна и практическая значимость результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы основные физические процессы, протекающие в прикатодном слое слаботочного и тлеющего газовых разрядов, а также их существующие математические модели. Установлено, что исследования проводились, главным образом, для разрядов с металлическим катодом в чистых инертных газах и их смесях. Для разрядов же в смеси аргона с парами ртути энергетические спектры основных типов частиц, бомбардирующих катод, также как и зависимость их вкладов в его распыление от температуры, в том числе и при наличии тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода, до настоящего времени не изучены.

Во второй главе исследовано влияние характеристик разряда с металлическим катодом в смеси аргон-ртуть и температуры смеси на энергетические спектры различных типов быстрых частиц у поверхности катода, а также на их вклады в его распыление.

В первом разделе построена аналитическая модель переноса ионов в слаботочном разряде, возникающем после пробоя разрядного промежутка длины d между плоскими параллельными анодом и катодом, заполненного смесью аргона и паров ртути, концентрации которых равны n_{Ar} и n_{Hg} . В ней принимается во внимание, что ток такого разряда достаточно мал, т.е. внешнее электрическое поле не искажается объемным зарядом и его напряженность постоянна вдоль разрядного промежутка. Под действием поля ионы, образующиеся в результате ионизации атомов компонент смеси электронами и пенниговской ионизации атомов ртути метастабильными возбужденными атомами аргона, ускоряются в направлении от анода к катоду. Так как относительное содержание ртути в колбе лампы на стадии ее зажигания обычно мало ($n_{Hg}/n_{Ar} \sim 10^{-5} - 10^{-3}$), можно принимать во внимание только столкновения ионов с атомами аргона. При этом для ионов аргона основным типом столкновений является резонансная перезарядка, а для ионов ртути – упругое рассеяние на атомах аргона. Так как масса атома ртути значительно больше массы атома аргона, его движение можно приближенно рассматривать в рамках модели непрерывного торможения в аргоне, пренебрегая рассеянием на малые углы при упругих столкновениях с атомами аргона. Это позволяет найти аналитические выражения для функций распределения по энергии ε потоков ионов аргона и ртути у поверхности катода $f_{Ar^+}(d, \varepsilon)$ и $f_{Hg^+}(d, \varepsilon)$. Затем с их помощью можно рассчитать эффективные (усредненные по энергиям ионов) коэффициенты распыления поверхности катода в разряде ионами аргона и ртути

$$R_{Ar^+} = \int_{\varepsilon_{tAr}}^{\varepsilon_{mAr}} Y_{Ar^+}(\varepsilon) f_{Ar^+}(d, \varepsilon) d\varepsilon \text{ и } R_{Hg^+} = \int_{\varepsilon_{tHg}}^{\varepsilon_{mHg}} Y_{Hg^+}(\varepsilon) f_{Hg^+}(d, \varepsilon) d\varepsilon, \text{ а также плотно-}$$

сти потоков атомов материала катода $J_{sAr^+} = R_{Ar^+} J_{Ar^+}$, и $J_{sHg^+} = R_{Hg^+} J_{Hg^+}$, распыляемых ими с его поверхности, где $Y_{Ar^+}(\varepsilon)$, $Y_{Hg^+}(\varepsilon)$ и ε_{tAr} , ε_{tHg} - коэффициенты распыления материала катода ионами аргона и ртути с энергией ε и их пороговые энергии распыления, ε_{mAr} , ε_{mHg} и J_{Ar^+} , J_{Hg^+} - максимальные энергии ионов и плотности их потоков у катода.

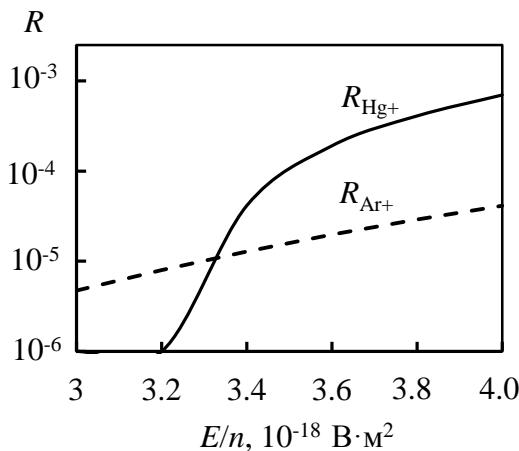


Рис. 1. Эффективные коэффициенты распыления катода ионами ртути (сплошная линия) и аргона (штриховая линия) как функции E / n

т.е. эффективный коэффициент распыления катода для ионов ртути имеет большую величину, чем для ионов аргона.

Во втором разделе рассмотрена модель катодного слоя тлеющего разряда в смеси аргон-ртуть. Она учитывает, что, поскольку плотность тока тлеющего разряда на несколько порядков превосходит ее значение для слаботочного разряда, объемный заряд ионов оказывает существенное влияние на распределение электрического поля в разрядном промежутке. Поэтому в нем существует тонкий катодный слой разряда с большой напряженностью электрического поля, практически линейно убывающей с удалением от поверхности катода. Движение заряженных частиц в катодном слое описывается уравнениями их переноса, а распределение создаваемого ими электрического поля – уравнением Пуассона. Значения ионизационного коэффициента смеси и ее компонент при различных величинах приведенной напряженности электрического поля E/n и температуры T вычислялись на основе гибридной модели слаботочного разряда (Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188). Рассчитанная с использованием данной модели зависимость катодного падения напряжения разряда от приведенной плотности разрядного тока при температуре смеси $T = -30^{\circ}\text{C}$, когда относительное содержание ртути в смеси пренебрежимо мало, согласуется с экспериментальными данными для тлеющего разряда в чистом аргоне (Rózsa K., Gallagher A., Donkó Z. // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. P. 913), что подтверждает ее удовлетворительную точность. После нахождения

На Рис. 1 представлены вычисленные зависимости эффективных коэффициентов распыления вольфрамового катода ионами компонент смеси от приведенной напряженности электрического поля в разряде E / n (где $n = n_{Ar} + n_{Hg}$) при $n_{Hg} / n_{Ar} = 2.34 \cdot 10^{-4}$. Видно, что, при величинах приведенной напряженности, меньших $3.2 \cdot 10^{-18} \text{ В} \cdot \text{м}^2$, ионы ртути практически не участвуют в распылении катода, так как их энергии не превосходят его пороговой энергии распыления ε_{tHg} . При более же высоких значениях E / n имеет место соотношение $R_{Ar^+} < R_{Hg^+}$,

параметров катодного слоя разряда могут быть рассчитаны энергетические распределения ионов аргона и ртути у катода и их вклады в его распыление с использованием модели их движения в разряде, описанной в предыдущем разделе.

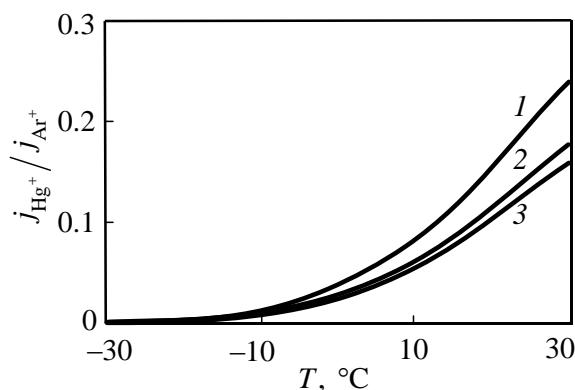


Рис. 2. Зависимость отношения плотностей токов ионов ртути и аргона у поверхности катода от температуры смеси при значениях j/p^2 , равных 0.1 (1), 0.5 (2) и 1.0 (3) $\text{mA} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Па}^{-2}$

тельное содержание в рабочей смеси порядка 10^{-3} . Сравнение результатов моделирования распыления катода в смеси аргон-ртуть для слаботочного и тлеющего разрядов показывает, что имеет место их качественное согласие, а отличия носят лишь количественный характер.

В третьем разделе сформулирована численная модель слаботочного разряда, позволяющая более точно рассчитать движение ионов, а также быстрых атомов, возникающих при их столкновениях с медленными атомами аргона, в разрядном промежутке. Она основана на использовании метода статистического моделирования Монте-Карло и позволяет учесть стохастичность межчастичных столкновений в разряде и найти распределения по энергиям потоков бомбардирующих поверхность катода частиц без использования приближения их непрерывного торможения в газе. В данной модели межэлектродный промежуток разбивается на s интервалов длины $\Delta z = d/s$. В каждом из них на основе гибридной модели слаботочного разряда рассчитывается количество $\Delta n_{i\text{Ar}}$ ионов аргона, образующихся в единицу времени в единице разрядного объема в результате ионизации атомов аргона электронами, и количество $\Delta n_{i\text{Hg}}$ ионов ртути, возникающих при ионизации атомов ртути электронами и метастабильными атомами аргона. Затем вычисляются плотности потоков ионов, а также быстрых атомов, образующихся при их столкновениях с медленными атомами аргона, у поверхности катода. Расчет траектории каждой быстрой частицы производится путем решения уравнения ее движения последовательно на каждом малом временном шаге до достижения катода. В результате формируются функции их распределения по энергиям у его поверхности.

Вычисленная зависимость отношения плотностей токов ионов аргона и ртути вблизи катода от температуры T при трех значениях приведенной плотности разрядного тока j/p^2 (где p - давление смеси), изображена на Рис. 2. Из него следует, что величина $j_{\text{Hg}^+}/j_{\text{Ar}^+}$ быстро увеличивается с ее ростом и при $T > 20$ °C величины j_{Hg^+} и j_{Ar^+} имеют одинаковый порядок из-за возрастающей роли пенниговской ионизации атомов ртути. Следовательно, ионы ртути могут вносить заметный вклад в распыление катода, несмотря на ее малое относи-

тельное содержание в рабочей смеси порядка 10^{-3} . Сравнение результатов моделирования распыления катода в смеси аргон-ртуть для слаботочного и тлеющего разрядов показывает, что имеет место их качественное согласие, а отличия носят лишь количественный характер.

В четвертом разделе приведены результаты расчета энергетических распределений быстрых частиц у поверхности катода в слаботочном разряде в смеси аргон-ртуть и их вкладов в его распыление на основе численной модели при $n_{Ar} = 6.6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $T = +30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $E/n = 3.2 \times 10^{-18} \text{ В} \cdot \text{м}^2$. На Рис. 3 символами

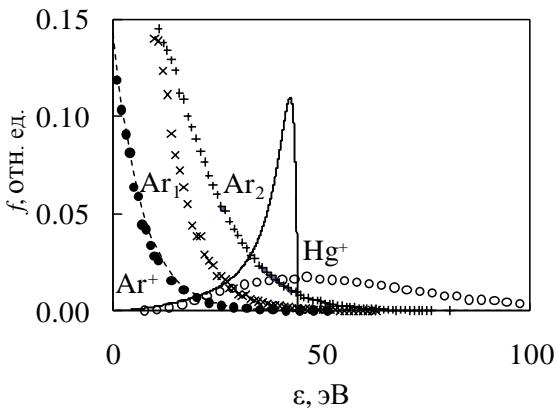


Рис. 3. Энергетические спектры потоков быстрых частиц у поверхности катода

•, ○, ×, + изображены найденные энергетические спектры ионов аргона (Ar^+), ионов ртути (Hg^+), быстрых атомов аргона, возникающих при перезарядке и упругом рассеянии ионов аргона на медленных атомах аргона (Ar_1), а также быстрых атомов аргона, возникающих при упругом рассеянии ионов ртути на атомах аргона (Ar_2). Штриховой и сплошной линиями представлены результаты расчета для ионов аргона на основе аналитического выражения, учитывающего только их резонансную перезарядку, и для ионов ртути на атомах аргона (Ar_2).

ионов ртути в рамках приближения их непрерывного торможения в аргоне. Видно, что распределение по энергии ионов аргона, полученное с использованием метода Монте-Карло, достаточно хорошо согласуется с их энергетическим спектром, полученным в рамках аналитической модели, учитывающей только перезарядку ионов аргона на атомах. Это объясняется тем, что сечение резонансной перезарядки ионов аргона существенно превосходит сечение их упругого рассеяния, а также иллюстрирует удовлетворительную точность использованного алгоритма численного моделирования. Рассчитанное же распределение по энергии ионов ртути существенно отличается от найденного из аналитической модели, что является следствием использования в ней приближения непрерывного торможения ионов ртути в аргоне. Из Рис. 3 следует также, что

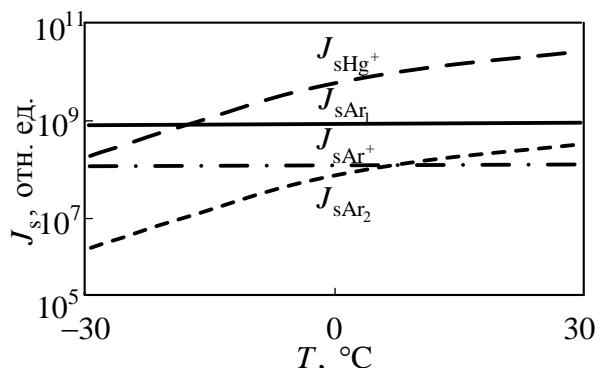


Рис. 4. Плотности потоков атомов материала катода, распыленных с его поверхности ионами и быстрыми атомами

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.

На Рис. 4 приведены зависимости плотностей потоков атомов, распыленных с поверхности вольфрамового катода различными типами частиц, от температуры смеси T , найденные с использованием экспериментальных за-

висимостей $Y_{Ar^+}(\varepsilon)$ и $Y_{Hg^+}(\varepsilon)$ (Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р.М. Бериша. М.: Мир, 1984. С. 336). Из него следует, что при низких температурах порядка $-30^{\circ}C$ основной вклад в распыление катода вносят быстрые атомы, создаваемые ионами аргона. Однако при температурах, превосходящих $0^{\circ}C$, катод распыляется, главным образом, ионами ртути, поскольку плотность их потока приближается при этом к плотности потока быстрых атомов аргона, а энергии являются существенно большими, чем энергии атомов аргона. Следовательно, этот фактор необходимо учитывать при моделировании процесса распыления катода в ртутных газоразрядных лампах на этапе их зажигания.

В третьей главе исследовано влияние тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода на его эмиссионные свойства в газовом разряде.

В первом разделе выполнена оценка влияния величины эмиссионной эффективности пленки на поверхности катода на характеристики нормального тлеющего разряда с использованием его аналитической модели. В ней учитывается, что при бомбардировке катода с диэлектрической пленкой ионами, плотность тока которых равна j_i , с его поверхности происходит эмиссия электронов с плотностью тока $j_{ei} = \gamma_i j_i$, где γ_i - коэффициент ионно-электронной эмиссии материала пленки. В результате, на поверхности пленки накапливается положительный заряд, создающий в ней сильное электрическое поле E_f , достаточное для возникновения полевой эмиссии электронов из металлической подложки с плотностью тока, определяемой формулой Фаулера-Нордгейма (Forbes R. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 113122). Эмитированные электроны двигаются в пленке под действием поля и нейтрализуют положительный поверхностный заряд на ней, обеспечивая стационарный режим разряда. Некоторая доля таких электронов δ_f , называемая эмиссионной эффективностью пленки, имеет у ее внешней поверхности энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера на границе диэлектрик-разряд, и выходит из нее, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} . С учетом этого фактора сформулирована система уравнений для характеристик катодного слоя нормального тлеющего разряда. Рассчитана зависимость катодного падения напряжения U_{cn} такого разряда от величины δ_f и показано, что, несмотря на малую величину эмиссионной эффективности пленки, не превосходящую 0.1, полевая электронная эмиссия может обуславливать заметное увеличение γ_{eff} и снижение U_{cn} на несколько десятков вольт.

Во втором разделе разработана модель переноса электронов в диэлектрической пленке, учитывающая их туннелирование из металлической подложки электрода, движение в ней и выход в разрядный объем. В модели принимается во внимание, что при увеличении заряда на пленке толщиной H_f напряженность электрического поля E_f в ней возрастает.

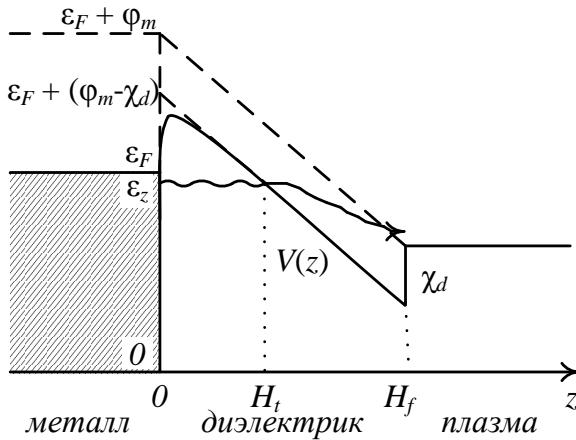


Рис. 5. Энергетическая диаграмма системы металл – диэлектрик – плазма

– диэлектрик – плазма изображена на Рис. 5. Функция распределения эмитированных электронов в пленке по энергии их продольного движения определяется одномерным кинетическим уравнением, допускающим аналитическое решение, что позволяет получить выражение для эмиссионной эффективности пленки в разряде:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n} \left(1 + \frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right),$$

где $H_0 = H_f - H_t$, $\varepsilon_{en} = eE_fH_f - e\Phi_m - n\Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon$ и λ_e – энергия, теряемая электроном при каждом столкновении с фононом, и средняя длина пробега электрона вдоль оси z между столкновениями, ε_d – величина, зависящая от параметров пленки, ε_F и Φ_m – энергия Ферми и работа выхода подложки, χ_d – электронное сродство материала пленки, e – заряд электрона.

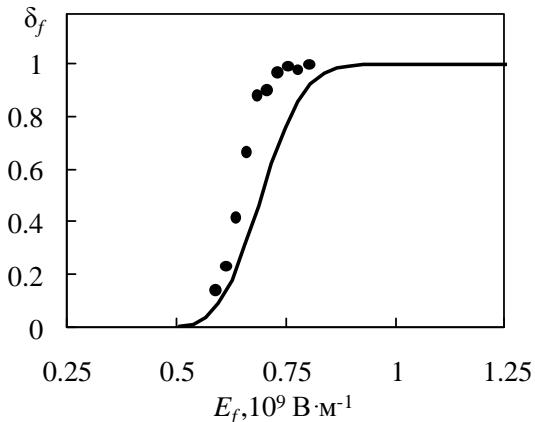


Рис. 6. Рассчитанная зависимость эмиссионной эффективности диэлектрической пленки от напряженности электрического поля в ней (линия) и ее экспериментальные значения (точки)

Когда она достигает величины порядка 10^8 В·м⁻¹, ширина потенциального барьера у поверхности металла становится достаточно малой и начинается полевая электронная эмиссия из металла в зону проводимости диэлектрика. Эмиттированные из металла в пленку электроны двигаются к ее внешней границе, ускоряясь электрическим полем и тормозясь при столкновениях с фононами. Если у внешней границы пленки энергия электрона превосходит высоту потенциального барьера, он выходит в разрядный объем и вносит вклады в δ_f и γ_{eff} . Энергетическая диаграмма системы металл

– диэлектрик – плазма изображена на Рис. 5. Функция распределения эмитированных электронов в пленке по энергии их продольного движения определяется одномерным кинетическим уравнением, допускающим аналитическое решение, что позволяет получить выражение для эмиссионной эффективности пленки в разряде:

Рассчитанная на основе полученного аналитического выражения зависимость эмиссионной эффективности пленки от напряженности электрического поля в ней, а также ее нормированные экспериментальные значения для туннельного МДМ катода (Suzuki M. et al. // IEEE Trans. 2012. V. 59. P. 2256) представлены на Рис. 6. Имеет место достаточно хорошее согласие результатов, демонстрирующее удов-

лективительную точность данной модели.

В третьем разделе приведены результаты численного расчета движения электронов в пленке с использованием метода Монте-Карло. Отличие полученной на их основе зависимости $\delta_f(E_f)$ от приведенной на Рис. 6 соответствующей аналитической зависимости достаточно мало, что подтверждает возможность ее использования при моделировании эмиссионных свойств катодов с диэлектрическими пленками.

В четвертой главе изучено влияние тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода на характеристики слаботочного разряда в смеси аргона с парами ртути, а также на энергетические спектры ионов и быстрых атомов у поверхности катода и потоки распыленных с него атомов.

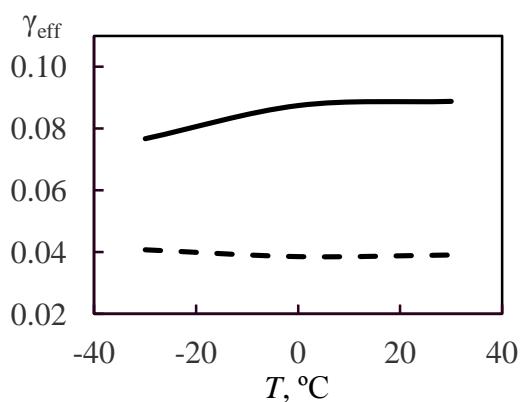


Рис. 7. Эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода с диэлектрической пленкой (сплошная линия) и без пленки (штриховая линия) как функция температуры

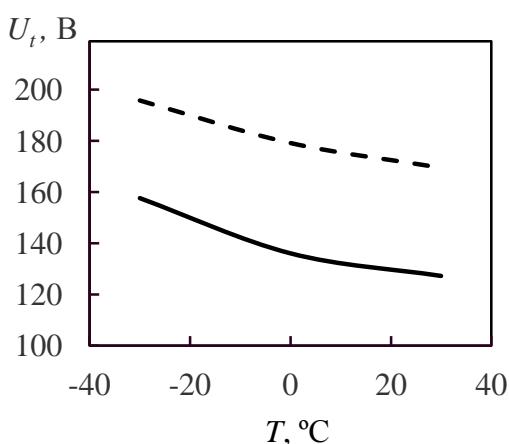


Рис. 8. Напряжение поддержания разряда как функция температуры для катода с диэлектрической пленкой (сплошная линия) и без пленки (штриховая линия)

В первом разделе сформулирована самосогласованная модель слаботочного разряда в смеси аргон ртуть с катодом, на котором находится тонкая диэлектрическая оксидная пленка. В ней напряженность E_f электрического поля, возникающего в пленке вследствие накопления на ней в разряде положительного заряда, находится из условия равенства макроскопической плотности тока полевой электронной эмиссии из подложки катода в пленку и плотности разрядного тока. Эмиссионная эффективность пленки в разряде и эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} находятся из аналитических соотношений, полученных в предыдущей главе, а ионизационный коэффициент смеси в разрядном промежутке рассчитывается на основе гибридной модели разряда.

Во втором разделе рассчитаны значения характеристик разряда, в том числе эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} и напряжения поддержания разряда U_t , как функции температуры рабочей смеси, при наличии на алюминиевом катоде диэлектрической пленки толщиной 15 нм и при ее отсутствии для $d = 2$ мм (см Рис. 7 и Рис. 8). Концентрация атомов аргона в смеси считалась равной

$n_{\text{Ar}} = 6.57 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, что соответствует его давлению 2660 Па при температуре +30 °C, а концентрация насыщенных паров ртути зависела от температуры (Бондаренко Г.Г., Дубинина М.С., Фишер М.Р., Кристя В.И. // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 12. С. 48). Видно, что в разряде с катодом без диэлектрической пленки при понижении температуры, вследствие снижения содержания ртути в смеси, происходит уменьшение ее ионизационного коэффициента. Поэтому напряженность электрического поля в разрядном промежутке, необходимая для поддержания разряда, увеличивается и напряжение на разрядном промежутке возрастает на величину около 20 В. В случае же существования на катоде диэлектрической пленки вклад в эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода, наряду с ионно-электронной эмиссией, дает также полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, обусловленная существованием в ней сильного электрического поля.

В результате, величина γ_{eff} при наличии пленки существенно превосходит ее значение для катода без пленки и выполнение условия поддержания разряда становится возможным при меньшей напряженности электрического поля в нем, а следовательно, и при меньшем напряжении между электродами U_t .

В третьем разделе приведены результаты расчета энергетических спектров ионов и быстрых атомов у катода, эффективных коэффициентов распыления ими его поверхности и плотностей потоков распыленных с катода атомов. Показано, что при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, вследствие снижения напряженности электрического поля в разрядном промежутке, энергии бомбардирующих катод частиц уменьшаются на величину порядка 10 эВ (см. Рис. 9). В результате, доля частиц с энергиями, превосходящими пороговую энергию распыления материала катода, становится существенно меньшей, что обуславливает уменьшение интенсивности распыления катода и должно приводить к увеличению его срока службы в газоразрядном приборе.

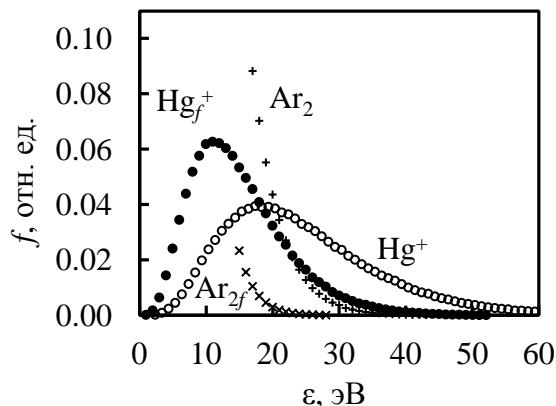


Рис. 9. Энергетические спектры потоков ионов ртути и быстрых атомов аргона, возникающих при упругом рассеянии ионов ртути на медленных атомах аргона, у поверхности катода с диэлектрической пленкой (Hg_f^+ и Ar_{2f}) и без пленки (Hg^+ и Ar_2)

вие снижения напряженности электрического поля в разрядном промежутке, энергии бомбардирующих катод частиц уменьшаются на величину порядка 10 эВ (см. Рис. 9). В результате, доля частиц с энергиями, превосходящими пороговую энергию распыления материала катода, становится существенно меньшей, что обуславливает уменьшение интенсивности распыления катода и должно приводить к увеличению его срока службы в газоразрядном приборе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена аналитическая модель движения ионов в слаботочном и тлеющем разрядах в смеси аргона и паров ртути, использующая приближение непрерывного торможения ионов ртути в рабочем газе. Вычислены эффективные коэффициенты распыления вольфрамового катода ионами обоих типов и

плотности потоков распыленных ими с катода атомов как функции приведенной напряженности электрического поля в разрядном промежутке. Показано, что при малом содержании ртути в смеси порядка 10^{-3} эффективные коэффициенты и интенсивности распыления катода ионами ртути и аргона могут быть сравнимы по величине.

2. Установлено, что при низких температурах смеси аргон-ртуть вольт-амперная характеристика тлеющего разряда практически не зависит от ее величины вследствие малого содержания ртути в смеси, а вычисленные значения катодного падения напряжения разряда хорошо согласуются с экспериментальными данными для разряда в чистом аргоне, что подтверждает удовлетворительную точность модели. При более высоких же значениях температуры происходит заметное изменение характеристик разряда из-за увеличения содержания ртути в смеси и возрастающей роли пеннинговской ионизации атомов ртути метастабилиями аргона. В частности, уменьшается катодное падение напряжения разряда, увеличивается отношение плотностей потоков ионов ртути и аргона вблизи катода и вклад ионов ртути в его распыление.

3. Разработана численная модель движения ионов и быстрых атомов в слаботочном разряде в смеси аргона с парами ртути, основанная на использовании статистического метода Монте-Карло, которая позволяет учесть стохастичность межчастичных столкновений. Рассчитаны энергетические спектры потоков быстрых частиц и эффективные коэффициенты распыления ими катода, а также плотности потоков атомов, распыленных с него ионами и быстрыми атомами, как функции приведенной напряженности электрического поля в разрядном промежутке и температуры. Показано, что существенный вклад в распыление катода, наряду с ионами, вносят быстрые атомы аргона, образующиеся при столкновениях ионов ртути и аргона с атомами рабочего газа. При низких (отрицательных) температурах смеси основной вклад в него вносят быстрые атомы аргона, создаваемые ионами аргона при их столкновениях с медленными атомами аргона. При более высоких температурах (порядка комнатной), несмотря на содержание ртути в смеси порядка 10^{-3} , распыление катода происходит, главным образом, ионами ртути, так как их энергии существенно превосходят энергии других типов частиц, причем их вклад в распыление уменьшается с увеличением приведенной напряженности электрического поля.

4. Исследовано влияние на характеристики нормального тлеющего разряда и эмиссионные свойства катода с тонкой диэлектрической пленкой полевой эмиссии электронов из его металлической подложки в пленку под действием возникающего в ней сильного электрического поля. Показано, что наличие пленки может приводить к уменьшению катодного падения напряжения разряда на несколько десятков вольт. При этом в случае катода с пленкой оксида бария рассчитанное нормальное катодное падение напряжения разряда в аргоне совпадает с его измеренным значением при величине эмиссионной эффективности пленки порядка 0.1, согласующейся с ее экспериментальными оценками.

5. Разработана модель, описывающая полевую эмиссию электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, их движение в пленке, а также выход из неё в разрядный промежуток. Найдено аналитическое ре-

шение одномерного кинетического уравнения для функции распределения по энергиям электронов, эмитированных в зону проводимости пленки, и получено выражение для эмиссионной эффективности пленки. Найдена зависимость эмиссионной эффективности катода из алюминия с тонкой диэлектрической оксидной пленкой на поверхности от напряженности электрического поля в ней, согласующаяся с экспериментальными данными для туннельных катодов металл-диэлектрик-металл. Полученное аналитическое выражение для эмиссионной эффективности пленки может быть использовано при самосогласованном моделировании газового разряда в случае наличия на поверхности катода тонкого слоя диэлектрика.

6. Рассчитаны характеристики слаботочного разряда в смеси аргон ртуть с катодом, на котором находится диэлектрическая оксидная пленка. Показано, что в разряде с катодом без диэлектрической пленки при снижении температуры, вследствие уменьшения концентрации ртути, происходит увеличение напряженности электрического поля в разрядном промежутке, т.е. напряжение поддержания разряда возрастает. Наличие же на катоде диэлектрической пленки приводит, вследствие существования полевой электронной эмиссии из подложки катода, к снижению напряжения поддержания разряда, а следовательно, и к уменьшению энергий бомбардирующих катод ионов и быстрых атомов. Это обуславливает уменьшение эффективного коэффициента распыления катода и к увеличение его срока службы в газоразрядном приборе.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Кристя В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р. Моделирование распыления 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 (0,75 п.л./0,30 п.л.).

2. Моделирование катодного слоя тлеющего разряда и распыления поверхности катода в смеси аргона с парами ртути / Д. О. Савичкин [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 6. С. 22–28; (англоязычная версия: Modeling of the glow discharge cathode sheath and the cathode surface sputtering in a mixture of argon with mercury vapor / D. O. Savichkin [et al.] // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2017. Vol. 11. No. 3. P. 595–600) (0,81 п.л./0,28 п.л.).

3. 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) (0,38 п.л./0,15 п.л.).

4. 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 (0,63 п.л./0,25 п.л.).

5. Simulation of cathode surface sputtering by ions and fast atoms in Townsend discharge in argon-mercury mixture with temperature-dependent composition / D. O. Savichkin [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2018. Vol. 9. No. 3. P. 227-233 (0,38 п.л./0,15 п.л.).

6. 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) (0,69 п.л./0,40 п.л.).

7. Кристя В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р. Моделирование распыления катода в слаботочном газовом разряде в смеси аргона с парами ртути // XLV Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ. 2015. С. 79 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

8. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О. Расчет коэффициента распыления катода в слаботочном газовом разряде в смеси аргон-ртуть // Радиационная физика твердого тела: Труды XXV Международной конференции. Севастополь: ФГБНУ «НИИПМТ». 2015. С.531-535 (0,25 п.л./0,10 п.л.).

9. Моделирование характеристик катодного слоя тлеющего разряда и распыления катода в смеси аргона с парами ртути / Д. О. Савичкин [и др.] // XLVI Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2016. С. 20 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

10. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О. Расчет энергетических спектров ионов, бомбардирующих катод в тлеющем разряде в смеси аргон-ртуть // Радиационная физика твердого тела: Труды XXVI Международной конференции. Севастополь: ФГБНУ «НИИПМТ», 2016. С.34-38 (0,25 п.л./0,10 п.л.).

11. Савичкин Д.О. Исследование энергетических спектров ионов ртути на границе катодного слоя тлеющего разряда в смеси с аргоном // X Международная конференция современные средства диагностики плазмы и их применение. Тезисы докладов. М.: МИФИ, 2016. С. 138-141 (0,06 п.л./0,06 п.л.).

12. Савичкин Д.О., Кристя В.И. Моделирование методом Монте-Карло энергетических спектров ионов и атомов у поверхности электрода в тлеющем разряде в смеси аргона с парами ртути // XLVII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2017. С. 66 (0,06 п.л./0,03 п.л.).

13. Savichkin D.O., Kristya V.I. Modeling of the ion and fast atom energy spectra in an argon Townsend discharge // Всероссийская (с международным участи-

ем) конференция «Физика низкотемпературной плазмы»: Сборник тезисов. Казань: К(П)ФУ, 2017. С. 96 (0,07 п.л./0,04 п.л.).

14. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. Modeling of the effect of field electron emission from the cathode with a thin dielectric film on its effective secondary electron emission yield in gas discharge plasma // Ion-surface interactions. Proceedings of the XXIII International Conference. V.3. M.: MEPhI, 2017. P. 178-181 (0,19 п.л./0,09 п.л.).

15. Савичкин Д.О., Фишер М.Р., Кристя В.И. Моделирование влияния температуры на энергетические спектры ионов и атомов и коэффициент распыления катода в слаботочном разряде в смеси аргон-ртуть // XLVIII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2018. С. 32 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

16. Савичкин Д.О., Фишер М.Р., Кристя В.И. Моделирование энергетических спектров ионов и атомов у поверхности катода с диэлектрической пленкой и его распыления в газовом разряде в смеси аргон-ртуть // XLIX Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2019. С. 60 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

Савичкин Денис Олегович

Моделирование взаимодействия низкотемпературной плазмы газового
разряда в смеси аргон – пары ртути и электрода с диэлектрической
пленкой на поверхности

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 09 декабря 2019 г. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ №

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2