

На правах рукописи

Мьо Ти Ха

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕВОЙ И ТЕРМОПОЛЕВОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ ЭЛЕКТРОДОВ С ТОНКИМИ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПЛЕНКАМИ НА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМОЙ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2021

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
Кристя 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

Штокал Александр Олегович,
кандидат технических наук, Филиал акционерного общества «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», ведущий конструктор сектора конструирования наземных систем

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»

Защита состоится «26» мая 2021 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: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э. Баумана и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Лоскутов С. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в различных областях человеческой деятельности используются газоразрядные приборы. Они разделяются на приборы тлеющего разряда (например, газовые лазеры) и приборы дугового разряда (осветительные лампы). В приборах тлеющего разряда после приложения напряжения между электродами сначала происходит пробой рабочего газа и зажигается слаботочный разряд, который затем переходит в тлеющий разряд, поддерживающийся в течение всего времени работы прибора. В приборах дугового разряда сначала также зажигается тлеющий разряд, а через некоторое время температура катода в результате его нагрева потоком тепла, поступающего из разряда, достигает значений, при которых возможна термическая электронная эмиссия, и разряд переходит в дуговой. Срок службы обоих типов газоразрядных приборов в значительной степени определяется процессом распыления их катода в тлеющем разряде ионами и быстрыми атомами, образующимися при столкновениях ионов с атомами рабочего газа. Уменьшение катодного падения напряжения тлеющего разряда обуславливает снижение энергий ионов и атомов, бомбардирующих поверхность катода в разряде, а следовательно, уменьшение интенсивности его распыления. Поэтому одно из направлений усовершенствования электродов газоразрядных приборов состоит в улучшении их эмиссионных свойств, что обеспечивает снижение катодного падения напряжения разряда, увеличение плотности разрядного тока и уменьшение промежутка времени до возникновения в них дугового разряда.

Эмиссионные характеристики катода улучшаются при наличии на его поверхности оксидных включений, поэтому в состав материала электродов газоразрядных приборов часто вводят оксиды металлов, являющиеся диэлектриками. В результате, на их поверхности могут формироваться тонкие диэлектрические пленки, испарение вещества которых в разряде компенсируется его диффузией из объема электрода. При протекании разрядного тока на пленке накапливается положительный заряд, создающий в ней сильное электрическое поле, что приводит к возникновению полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в пленку. Некоторая доля таких электронов выходит из нее в разрядный объем, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода. В процессе нагрева катода в разряде полевая эмиссия электронов из подложки в диэлектрическую пленку должна последовательно переходить в усиленную температурой полевою, термополевою и термическую эмиссию.

Однако ряд вопросов, связанных с влиянием полевой и термополевой электронной эмиссии из катода с диэлектрической пленкой на его эмиссионные свойства в газовом разряде и на процессы, протекающие в разрядном объеме, остаются до настоящего времени не изученными. Не исследовано, в частности, влияние толщины диэлектрической пленки на катоде и температуры на его эмиссионные свойства и характеристики разряда. Экспериментальное исследование процессов, происходящих в газовом разряде, затрудняется их взаимосвязанностью и достаточно малой длиной катодного слоя раз-

ряда. Поэтому важное значение для понимания механизмов взаимодействия поверхности катода с диэлектрической пленкой и плазмы разряда имеет математическое моделирование. Это определяет актуальность данной работы, а также ее значение для физики взаимодействия газоразрядной плазмы с поверхностью твердого тела и физической электроники.

Степень разработанности темы диссертации. Вклады в исследование физических процессов, протекающих в газовых разрядах и на поверхности электродов газоразрядных приборов, внесли многие отечественные и иностранные ученые: Добрецов Л.Н., Королев Ю.Д., Райзер Ю.П., Цендин Л.Д., Benilov M.S., Boeuf J.P., Bogaerts A., Donkó Z., Forbes R.G., Go D.B., Petrović Z.Lj., Phelps A.V. и др. Но в их работах рассматривались, как правило, разряды с металлическим катодом, а эмиссионные свойства катодов с диэлектрическими пленками и характеристики разрядов с такими катодами изучались только для отдельных разрядных режимов при температурах порядка комнатной. Исследования же влияния полевой и термополевой эмиссии с таких катодов на характеристики газовых разрядов в широких интервалах изменения плотности разрядного тока, напряженности электрического поля в пленке и температуры катода до настоящего времени не проводились.

Целью диссертационной работы являлось исследование методами математического моделирования влияния полевой и термополевой электронной эмиссии из катода с тонкой диэлектрической пленкой на его взаимодействие с низкотемпературной плазмой газового разряда и на характеристики разряда. Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи:**

- построение моделей слаботочного разряда и катодного слоя тлеющего разряда в инертных газах при температуре катода порядка комнатной для случая наличия на его поверхности тонкой диэлектрической пленки, в которых принимается во внимание полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку под действием возникающего в ней в разряде электрического поля, и исследование ее влияния на характеристики разряда;
- разработка модели усиленной температурой полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку при не очень высоких значениях его температуры и исследование влияния температуры и толщины пленки на эмиссионные свойства катода в разряде и напряжение зажигания разряда;
- создание модели термополевой электронной эмиссии из катода с диэлектрической пленкой, позволяющей рассчитать зависимость его эмиссионных характеристик и характеристик разряда от напряженности электрического поля в пленке и температуры в широких интервалах их изменения.

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

1. Исследована зависимость эмиссионной эффективности тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода в слаботочном и тлеющем разрядах от ее параметров и разрядных условий при комнатной температуре, а также рассчитаны характеристики разряда как функции плотности разрядного тока.

2. Построена аналитическая модель, описывающая усиленную температурой полевую эмиссию электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, а также их движение в пленке и выход в разрядный объем, при не очень высоких значениях его температуры и изучено влияние температуры и толщины пленки на ее эмиссионную эффективность и характеристики разряда.

3. Разработана численная модель термополевой электронной эмиссии с катода с диэлектрической пленкой. Получены выражения для эмиссионной эффективности пленки и плотности тока термополевой электронной эмиссии с катода, позволяющие рассчитать зависимость его эмиссионных характеристик от напряженности электрического поля в пленке и температуры в широких интервалах их изменения.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что результаты, полученные при ее выполнении, вносят существенный вклад в понимание процессов, протекающих при взаимодействии низкотемпературной плазмы газового разряда с катодом, на поверхности которого существует тонкая диэлектрическая пленка, в широких интервалах изменения температуры катода и параметров разряда. Они могут быть использованы для:

- оценки влияния толщины диэлектрической пленки на катоде и разрядных условий на ее эмиссионную эффективность, а также на эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода;
- расчета характеристик разряда при наличии на катоде диэлектрической пленки, в частности, его вольт-амперной характеристики, и исследования устойчивости разряда;
- изучения влияния температуры на эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода с диэлектрической пленкой и на напряжение поддержания разряда, определяющее в значительной степени интенсивность распыления катода в нем и долговечность газоразрядного прибора.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование физических процессов, происходящих в прикатодном слое газоразрядной плазмы и на поверхности катода, во многих случаях представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку толщина такого слоя при повышенных давлениях газа может составлять доли миллиметра. Поэтому в данной диссертационной работе в качестве основного метода исследования использован метод математического моделирования, позволяющий детально изучить процессы, протекающие в разряде и на поверхности катода, а также их взаимосвязь.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Модели слабotoчного и тлеющего разрядов при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и результаты расчетов на их основе, показывающие, что при температуре катода порядка комнатной, в отличие от случая разряда с металлическим катодом, его эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии возрастает при увеличении плотности разрядного тока, а вольт-амперная характеристика слабotoчного разряда является падающей,

и это может быть причиной экспериментально наблюдавшейся его неустойчивости. Вольт-амперная же характеристика тлеющего разряда с таким катодом является слабо растущей, что должно приводить к снижению энергий бомбардирующих катод ионов и атомов рабочего газа, а следовательно, к уменьшению интенсивности его распыления в разряде и увеличению долговечности.

2. Аналитическая модель усиленной температурой полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, а также их движения в пленке и выхода в разрядный объем, при не очень высоких значениях температуры катода. Результаты расчетов на основе этой модели, показывающие, что увеличение температуры катода на величину порядка 100 градусов выше комнатной, соответствующее небольшому возрастанию энергии части электронов в подложке катода, приводит к заметному увеличению эмиссионной эффективности пленки при ее малых значениях, характерных для катодов газоразрядных приборов.

3. Модель слаботочного газового разряда при наличии на поверхности катода диэлектрической пленки толщиной 10-100 нм и результаты расчетов эмиссионной эффективности пленки и характеристик разряда как функций ее толщины. Вывод о том, что наблюдаемая экспериментально немонотонная зависимость эффективного коэффициента электронной эмиссии катода и напряжения зажигания разряда от толщины пленки может быть объяснена неоднородностью распределения электрического поля в ней.

4. Численная модель термополевой электронной эмиссии с катода с диэлектрической пленкой и полученные выражения для эмиссионной эффективности пленки и плотности тока термополевой электронной эмиссии с катода, позволяющие рассчитать зависимость его эмиссионных характеристик от напряженности электрического поля в пленке и температуры в широких интервалах их изменения. Вывод о том, что в предельных случаях низкой температуры катода и сильного электрического поля в пленке (модель усиленной температурой полевой эмиссии), а также высокой температуры катода и слабого поля в пленке (модель усиленной полем термической эмиссии), результаты расчетов на основе численной модели согласуются с результатами, полученными с использованием полученных ранее соответствующих аналитических формул.

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, в программной реализации 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 8 международных и всероссийских конференциях: XLVIII, XLIX Международных конференциях по физике взаимодействия за-

ряженных частиц с кристаллами (Москва, 2018 г., 2019 г.), XXVIII, XXIX, XXX Международных конференциях «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2018 г., 2019 г., 2020 г.), XXIV Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва, 2019 г.), Всероссийских конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» (Калуга, 2017 г., 2019 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК и 9 тезисов докладов на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Три статьи проиндексированы в Web of Science и Scopus и одна – в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 127 наименований. Её общий объем составляет 114 страниц, включая 41 рисунок и 1 таблицу.

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 слабotoчного и тлеющего газовых разрядов, а также их существующие математические модели. Установлено, что исследования проводились, главным образом, для разрядов с металлическим катодом при температурах порядка комнатной. Для разрядов же с катодом, на поверхности которого имеется тонкая диэлектрическая пленка, влияние плотности разрядного тока и температуры катода в широких интервалах их изменения на эмиссионную эффективность пленки, эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода и характеристики разряда, в частности, на его вольт-амперную характеристику, до настоящего времени не изучено.

Во второй главе исследовано влияние электронной эмиссии из подложки катода с тонкой диэлектрической пленкой на характеристики слабotoчного и тлеющего разрядов при температуре порядка комнатной, когда механизм эмиссии является полевым.

В первом разделе выполнена оценка влияния полевой электронной эмиссии в диэлектрическую пленку на поверхности катода и эмиссионной эффективности пленки на величину его эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии и напряжение зажигания слабotoчного разряда. Учитывалось, что при протекании разрядного тока в межэлектродном промежутке происходит бомбардировка поверхности катода ионами, плотность тока которых равна j_i , в результате чего с нее происходит эмиссия электронов с плотностью тока $\gamma_i j_i$, где γ_i – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода. При этом на диэлектрической пленке накапливаются положительные заряды, создающие в пленке электрическое поле, обуславливающее воз-

никновение полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в пленку. Некоторая доля δ_f таких электронов, называемая эмиссионной эффективностью пленки, может выходить в разрядный объем, создавая дополнительный электронный ток. В результате, полная плотность тока у поверхности катода становится равной $j = (1 + \gamma_{\text{eff}}) j_i$, где $\gamma_{\text{eff}} = (\gamma_i + \delta_f)/(1 - \delta_f)$ – эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода (Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188). С использованием условия поддержания слабotoчного разряда получено соотношение, определяющее зависимость напряжения зажигания разряда U_d от произведения давления рабочего газа p на длину межэлектродного промежутка d . Из него следует, что полевая электронная эмиссия, обусловленная существованием на катоде диэлектрической пленки, может оказывать существенное влияние на характеристики разряда и должна приниматься во внимание при моделировании таких разрядов.

Во втором разделе сформулирована аналитическая модель слабotoчного газового разряда с катодом, на поверхности которого находится диэлектрическая пленка толщиной H_f , в плоском межэлектродном промежутке. В ней учитывается, что ток такого разряда достаточно мал, т.е. электрическое поле не искажается объемным зарядом и его напряженность E_d постоянна вдоль разрядного промежутка, а плотность тока полевой электронной эмиссии в пленку и эмиссионная эффективность пленки зависят от ее параметров и напряженности E_f электрического поля в ней. Принимается во внимание, что часть электронов, эмиттированных с катода, возвращается на его поверхность вследствие рассеяния на атомах рабочего газа. Модель включает уравнение разрядной цепи, условие поддержания слабotoчного разряда и условие

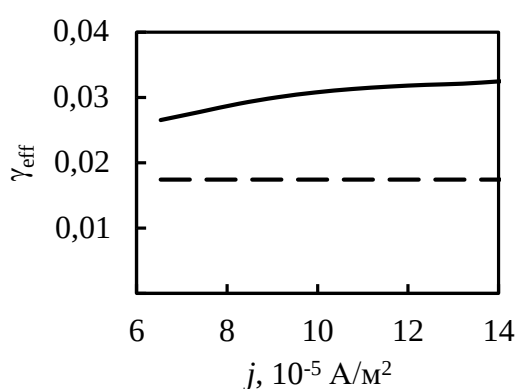


Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия) от плотности разрядного тока

равенства плотности разрядного тока j и макроскопической плотности тока полевой эмиссии j_f из подложки катода в пленку. Вычисленные с ее использованием зависимости γ_{eff} и U_d от j для разряда в аргоне с алюминиевым катодом без диэлектрической пленки и с пленкой оксида алюминия толщиной $H_f = 9 \text{ нм}$ на поверхности при $p = 400 \text{ Па}$, $d = 5 \text{ мм}$ приведены на Рис. 1 и Рис. 2. Из них следует, в частности, независимость характеристик разряда с металлическим катодом от величины j в интервале $10^{-5} - 10^{-4} \text{ А/м}^2$, что согласуется с экспериментальными дан-

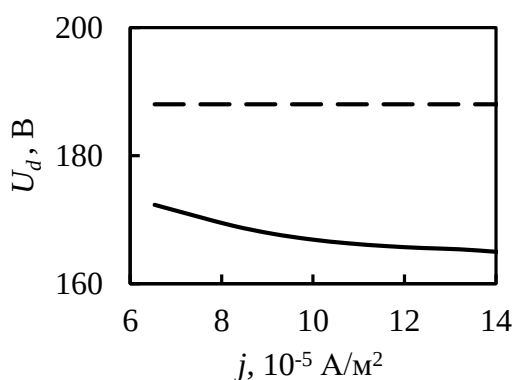


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика слабого разряда с катодом без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия)

ными (Petrović Z. Lj., Phelps A. V. // Phys. Rev. E. 1993. V. 47. P. 2806). В случае же наличия на катоде диэлектрической пленки, при увеличении плотности разрядного тока плотность эмиссионного тока из подложки катода в пленку также должна увеличиваться, что обеспечивается возрастанием напряженности электрического поля в ней. Следовательно, увеличиваются энергии электронов в пленке у ее внешней границы, что приводит к увеличению ее эмиссионной эффективности δ_f и эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} . По-

этому напряжение поддержания разряда U_d при наличии пленки имеет заметно меньшую величину, причем значения δ_f и γ_{eff} увеличиваются с ростом величины j . Это обуславливает снижение интенсивности ионизации газа в разрядном промежутке, необходимой для поддержания нужной плотности разрядного тока j и напряженности E_d электрического поля в нем. В результате, как видно из Рис. 2, разрядное напряжение U_d убывает при возрастании j , т.е. вольт-амперная характеристика разряда становится падающей при достаточно малых плотностях разрядного тока, что является необходимым условием его неустойчивости, т.е. возникновения в нем колебательных процессов, наблюдавшихся экспериментально при наличии на электродах диэлектрических пленок оксида алюминия толщиной порядка 10 нм (Гуторов К.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т.74. № 2. С. 208).

В третьем разделе сформулирована аналитическая модель катодного слоя тлеющего разряда с катодом, на поверхности которого находится диэлектрическая пленка. Она учитывает, что, поскольку плотность тока тлеющего разряда на несколько порядков превосходит ее значение для слабого 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. Найденная с использованием данной модели зависимость катодного падения напряжения разряда U_c от плотности разрядного тока j в тлеющем разряде в аргоне при $p=133$ Па с алюминиевым катодом без диэлектрической пленки и с пленкой оксида алюминия толщиной $H_f = 7$ нм на поверхности представлена на Рис. 3. Видно, что для разряда с

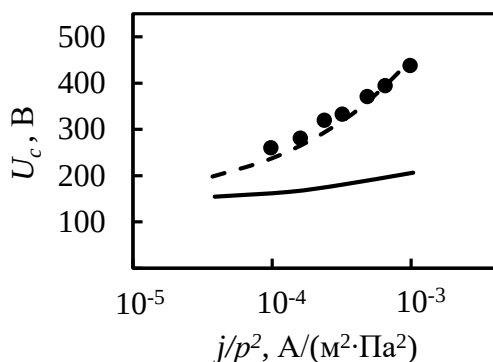


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда с катодом без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия). Точки – экспериментальные значения U_c

жению энергий бомбардирующих катод ионов и атомов рабочего газа, а следовательно, к уменьшению интенсивности его распыления в разряде и к увеличению долговечности.

В четвертом разделе сформулированная во втором разделе модель слабого газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки использована для расчета эмиссионных свойств катода и напряжения зажигания разряда в смеси аргон-ртуть, используемой в качестве рабочего газа в газоразрядных осветительных лампах. Вычисления проводились для разрядного промежутка, заполненного смесью аргона с концентрацией, соответствующей его давлению 2660 Па при температуре 293 К, и насыщенных паров ртути, концентрация которых быстро растет с увеличением температуры. Из полученной зависимости напряжения зажигания разряда от температуры смеси следует, что для разряда с катодом без диэлектрической пленки при снижении температуры с 283 К до 253 К, вследствие снижения концентрации ртути в смеси, происходит уменьшение ее ионизационного коэффициента. Поэтому напряженность электрического поля, необходимая для зажигания разряда, увеличивается, т.е. происходит возрастание напряжения на разрядном промежутке на величину около 50 В, что согласуется с экспериментальными данными (Уэймаус Д.Ф. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977. 344 с). В случае же наличия 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. Поэтому выполнение условия поддержания разряда становится возможным при меньшей интенсивности ионизации рабочего газа, т.е. при более низкой напряженности электрического поля в нем, а следовательно, и при напряжении между элект-

катодом без диэлектрической пленки имеет место согласие результатов расчета с экспериментальными данными (Rózsa K., Gallagher A., Donkó Z. // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. P. 913), подтверждающее удовлетворительную точность использованной модели катодного слоя тлеющего разряда. Наличие же на катоде тонкой диэлектрической пленки приводит к существенному уменьшению U_c при той же плотности разрядного тока j вследствие большего значения γ_{eff} . В результате, вольт-амперная характеристика такого разряда является намного медленнее растущей, чем в случае катода без оксидной пленки. Это должно приводить к сни-

тродами U_d , меньшем на величину порядка 20 В, что облегчает зажигание разряда в лампе в таких условиях.

В третьей главе исследовано влияние усиленной температурой полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку при не очень высоких значениях его температуры на эмиссионную эффективность пленки, эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода и характеристики разряда.

В первом разделе разработана аналитическая модель, описывающая усиленную температурой полевую эмиссию электронов из металлической подложки электрода в диэлектрическую пленку, а также их движение в пленке и выход из пленки в разрядный объем. В ней принимается во внимание, что когда напряженность электрического поля E_f в пленке толщиной порядка 10 нм достигает величины 10^8 – 10^9 В/м, ширина потенциального барьера у поверхности металла становится достаточно малой и начинается полевая электронная эмиссия из металла в зону проводимости диэлектрика. Эмиттированные электроны двигаются в пленке 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} . Функция распределения эмиттированных электронов по энергии их продольного движения в пленке определяется одномерным кинетическим уравнением, допускающим аналитическое решение. Когда температура T катода является не очень высокой и удовлетворяет условию $k_b T < \varepsilon_d$, это позволяет получить аналитическое выражение для эмиссионной эффективности пленки в разряде:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{H_0^i}{i! \lambda_e^i} r(\varepsilon_{ei}),$$

где

$$r(\varepsilon_{ei}) = \frac{\sin(\pi k_b T / \varepsilon_d)}{\pi} \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_{ei}}{\varepsilon_d}\right) \ln\left(1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_{ei}}{\varepsilon_d}\right)\right) + \int_0^{t_m(\varepsilon_{ei})} \frac{t^{k_b T / \varepsilon_d - 1}}{t + 1} dt \right],$$

$t_m(\varepsilon_{ei}) = \exp(-\varepsilon_{ei} / kT)$, $\varepsilon_{ei} = e E_f H_f - \varphi_m - i \Delta \varepsilon$, $H_0 = H_f - H_t$, H_t – длина туннелирования электрона через потенциальный барьер на границе подложка-пленка, φ_m – работа выхода подложки, $\Delta \varepsilon$ и λ_e – энергия, теряемая электроном в пленке при каждом столкновении с фононом, и средняя длина пробега электрона вдоль оси z между столкновениями, ε_d – величина, зависящая от параметров пленки, k_b – постоянная Больцмана. e – заряд электрона. В предельном случае $T \rightarrow 0$ оно совпадает с полученным ранее при низкой температуре катода, т.е. при учете только полевой эмиссии электронов из металла в диэлектрик (Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114).

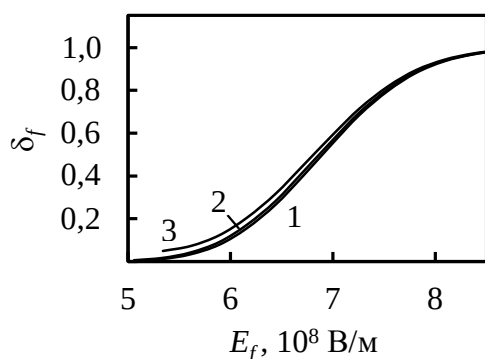


Рис. 4. Зависимость эмиссионной эффективности диэлектрической пленки от напряженности электрического поля в ней при трех значениях температуры T : 240 К (1), 300 К (2), 360 К (3)

пленки оксида алюминия толщиной $H_f = 10 \text{ нм}$. Найденная зависимость эмиссионной эффективности пленки δ_f от напряженности электрического поля E_f в ней при трех значениях температуры катода в интервале значений E_f , при которых выполняется условие $k_b T < \varepsilon_d$, приведена на Рис. 4. Видно, что при увеличении E_f происходит быстрый рост δ_f вследствие того, что все больше электронов, ускоряясь в пленке полем, имеют у ее внешней границы энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера и выхода в разряд. Возрастание температуры катода в интервале 240–360 К, соответствующее небольшому возрастанию энергии части электронов в металле,

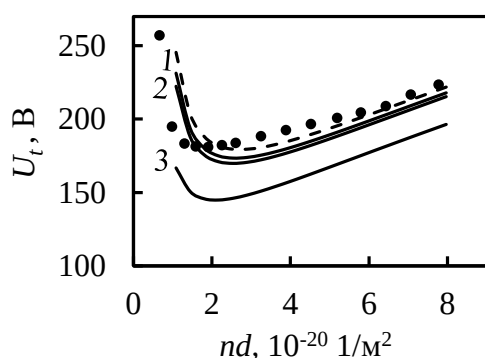


Рис. 5. Зависимости напряжения зажигания разряда U_t от nd для катода без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошные линии). Точки – экспериментальные значения U_t для катода без пленки. Обозначения те же, что на Рис. 4

Во втором разделе сформулирована модель слабotoчного разряда с катодом, на котором находится тонкая диэлектрическая оксидная пленка, при не очень высокой температуре порядка 200–400 К, когда с него происходит усиленная температурой полевая электронная эмиссия. В ней используется система уравнений для характеристик слабotoчного разряда, а эмиссионная эффективность пленки находится из аналитического соотношения, полученного в предыдущем разделе. Вычисления проводились для разряда в аргоне с алюминиевым катодом при наличии на его поверхности диэлектрической пленки оксида алюминия толщиной $H_f = 10 \text{ нм}$. Найденная зависимость эмиссионной эффективности пленки δ_f от напряженности электрического поля E_f в ней при трех значениях температуры катода в интервале значений E_f , при которых выполняется условие $k_b T < \varepsilon_d$, приведена на Рис. 4. Видно, что при увеличении E_f происходит быстрый рост δ_f вследствие того, что все больше электронов, ускоряясь в пленке полем, имеют у ее внешней границы энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера и выхода в разряд. Возрастание температуры катода в интервале 240–360 К, соответствующее небольшому возрастанию энергии части электронов в металле, а следовательно, и в пленке, приводит к заметному увеличению эмиссионной эффективности пленки при ее малых значениях, т.е. при $E_f < 7 \cdot 10^8 \text{ В/м}$.

Рассчитанные зависимости напряжения зажигания разряда $U_t = U_d + E_f H_f$ от величины nd , где n – концентрация атомов рабочего газа (кривые Пашена) для катода без пленки и с пленкой при трех значениях температуры изображены на Рис. 5. Из него следует, что для разряда с катодом без поверхностной диэлектрической пленки (т.е. при $\delta_f = 0$) имеет место согласие с экспериментальными данными (Hassouba M.A., Elakshar F.F., Garamoon A.A. // Fizika A. 2002. V. 11. №. 2. P. 81), что

подтверждает удовлетворительную точность используемой модели разряда. При этом возрастание температуры катода с 240 К до 360 К обуславливает заметное увеличение γ_{eff} , а следовательно и уменьшение U_t на величину около 20 В вследствие большего усиления температурой полевой электронной эмиссии. Таким образом, уже при температуре, менее чем на 100 К превышающей комнатную, может происходить заметное улучшение эмиссионных свойств катода и снижение напряжения зажигания разряда, обусловленное вкладом термополевого механизма электронной эмиссии из металлической подложки катода в пленку.

В третьем разделе исследована зависимость эмиссионной эффективности диэлектрической пленки на поверхности катода и характеристик слабо-точного разряда от ее толщины. Предполагалось, что если толщина пленки достаточно мала, т.е. $H_f < H_{f0} \sim 10$ нм, концентрация объемного заряда в ней низкая, а поле является однородным, т.е. величина E_f не зависит от координаты z и $E_f = E_{f0}$. В случае же $H_f > H_{f0}$ приближенно можно считать, что в прилегающей к подложке части пленки толщиной H_{f0} напряженность поля остается равной E_{f0} , а в остальной ее части, вследствие накопления объемного заряда, величина E_f уменьшается и равна sE_{f0} , где $s < 1$ (Nickmott T.W. // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 093703). Расчеты проводились с использованием сформулированной в предыдущем разделе модели для слабо-

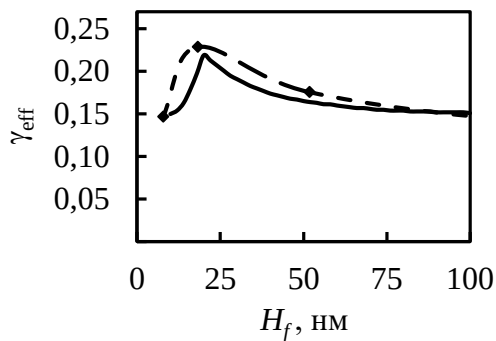


Рис. 6. Зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода от толщины диэлектрической пленки.

Сплошная линия – результаты расчета, штриховая – экспериментальные значения γ_{eff}

точного разряда в гелии с алюминиевым катодом при наличии на его поверхности пленки оксида алюминия, толщина H_f которой изменялась в интервале 10–100 нм, и следующих значениях параметров $p = 2660$ Па, $pd = 25$ Па·м, $\gamma_i = 0.15$, $H_{f0} = 20$ нм, $s = 0.7$. Найденные зависимости эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} (см. Рис. 6) и падения напряжения на разрядном промежутке от толщины пленки H_f являются немонотонными, причем, при использованных значениях параметров H_{f0} и s имеет место согласие

результатов расчета с экспериментальными значениями γ_{eff} (Зыкова Е.В., Кучеренко Е.Т., Айвазов В.Я. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 7. С. 1464). Следовательно, наблюдаемая немонотонная зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода в разряде и напряжения зажигания разряда от толщины диэлектрической пленки на поверхности катода может быть объяснена неоднородностью распределения

электрического поля в пленке, обусловленной накоплением объемного заряда вблизи ее внешней границы.

В четвертой главе исследовано влияние термополевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку при достаточно высоких температурах, наблюдающихся на этапе его разогрева в тлеющем разряде, на эмиссионные свойства катода и характеристики разряда.

В первом разделе разработана численная модель термополевой эмиссии электронов из металлической подложки электрода в диэлектрическую пленку, а также их переноса в пленке и выхода в разрядный объем, позволяющая рассчитать зависимость его эмиссионных характеристик от температуры в широком интервале ее изменения. В ней учитывается, что распределение эмиттированных в пленку электронов по продольной компоненте их энергии ε_z определяется выражением $f_t(\varepsilon_z) = N(\varepsilon_z, T)D(\varepsilon_z, E_f)$, в котором $N(\varepsilon_z, T)$ и $D(\varepsilon_z, E_f)$ – функция распределения по ε_z туннелирующих в пленку электронов и коэффициент проницаемости барьера (Modinos A. Field, thermionic, and secondary electron emission spectroscopy. N.Y.: Plenum Press, 1984. 375 p.). Функция $f_t(\varepsilon_z)$ имеет максимум при некотором значении $\varepsilon_z = \varepsilon_{z \max}$ из интервала от ε_F до $\varepsilon_F + \phi_m$, где ε_F – энергия Ферми подложки. Поэтому основной вклад в термополевую эмиссию из металла в диэлектрик вносят электроны с энергиями вблизи $\varepsilon_{z \max}$, для которых ширина барьера H_t может быть найдена из выражения, описывающего зависимость энергии электрона от координаты z в пленке. Это позволяет получить выражения для макроскопической плотности тока полевой электронной эмиссии из подложки

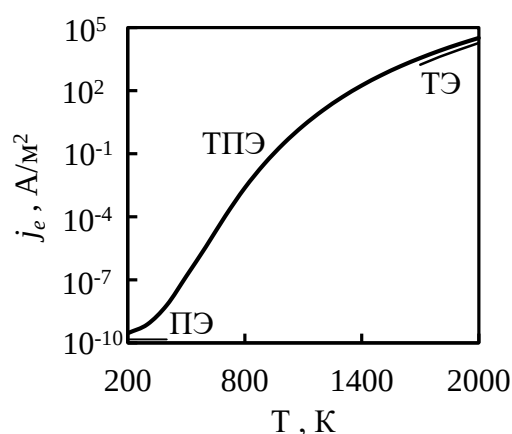


Рис. 7. Зависимость плотности тока электронной эмиссии из катода с диэлектрической пленкой от температуры, найденная на основе моделей термополевой эмиссии (ТПЭ), полевой эмиссии (ПЭ) и термической эмиссии (ТЭ)

ки электрода в зону проводимости диэлектрика j_f и эмиссионной эффективности пленки δ_f , содержащие интегралы от функций $N(\varepsilon_z, T)$ и $D(\varepsilon_z, E_f)$.

Во втором разделе с использованием полученных в предыдущем разделе соотношений вычислены эмиссионная эффективность пленки и плотность тока термополевой эмиссии как функции температуры для вольфрамового катода с диэлектрической пленкой оксида алюминия толщиной $H_f = 7$ нм на его поверхности. Зависимость плотности тока термополевой эмиссии с поверхности катода j_e от температуры при $E_f = 7 \cdot 10^8$ В/м, найденная на основе сформулированной в предыдущем разделе модели термополевой эмиссии

(ТПЭ), а также моделей полевой эмиссии (ПЭ) и термической эмиссии (ТЭ), представлена на Рис. 7. Из него следует, что зависимость $j_e(T)$, полученная из модели термополевой эмиссии, при низких температурах порядка 200–400 К согласуется с результатами, полученными с использованием модели полевой эмиссии, а при высоких температурах порядка 1700–2000 К – с результатами, полученными в рамках модели термической эмиссии. Таким образом, модель термополевой эмиссии описывает эмиссионные характеристики катода с тонкой диэлектрической пленкой в газоразрядной плазме в широких интервалах изменения температуры и напряженности электрического поля в пленке.

В третьем разделе построена модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки для случая, когда механизм эмиссии электронов с катода является термополевым. Показано, что термополевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в пленку под действием возникающего в ней сильного электрического поля оказывает существенное влияние на изменение эмиссионных свойств катода и характеристик разряда на этапе его разогрева.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулирована модель слаботочного (таунсендовского) газового разряда при наличии на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки, в которой, наряду с ионно-электронной эмиссией с катода, принимается во внимание также полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку под действием сильного электрического поля, возникающего в диэлектрике при протекании разрядного тока, их движение в пленке и выход в разрядный объем. Это позволяет учесть зависимость эмиссионной эффективности пленки в разряде от ее параметров и разрядных условий. Рассчитаны характеристики разряда при комнатной температуре как функции плотности тока и показано, что, в отличие от случая разряда с металлическим катодом, эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода возрастает при ее увеличении. В результате, вольт-амперная характеристика такого разряда является падающей, и это может быть причиной экспериментально наблюдавшейся его неустойчивости.

2. Предложена самосогласованная модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки. Рассчитаны зависимости характеристик тлеющего разряда в аргоне с катодом, на поверхности которого находится пленка оксида алюминия, от плотности разрядного тока. Показано, что полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в пленку может приводить к существенному уменьшению катодного падения напряжения разряда, а следовательно, к снижению энергий бомбардирующих катод ионов и атомов рабочего газа, к уменьшению интенсивности его распыления в разряде и увеличению долговечности.

3. Рассчитаны зависимости характеристик слаботочного разряда в смеси аргона с парами ртути, используемой в газоразрядных осветительных лампах, от температуры смеси. Показано, что, так как при ее снижении быстро

уменьшается концентрация насыщенных паров ртути, обуславливающая уменьшение ионизационного коэффициента смеси, то увеличивается напряженность электрического поля в разрядном промежутке и напряжение на нем, что может затруднять зажигание разряда в лампе при низкой температуре. Наличие же тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода приводит, вследствие существования полевой эмиссии электронов в пленку, к увеличению эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода. В результате, становится возможным зажигание лампы при меньшем напряжении питающей сети и делает ее более надежной при эксплуатации в условиях низких температур окружающей среды.

4. Разработана аналитическая модель, описывающая усиленную температурой полевою эмиссию электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, а также их движение в пленке и выход из пленки в разрядный объем, при не очень высоких значениях его температуры из интервала 200–400 К. Получено выражение для эмиссионной эффективности пленки и изучена ее зависимость от напряженности электрического поля в пленке и температуры. Установлено, что уже при температуре, менее чем на 100 К превышающей комнатную, может происходить заметное улучшение эмиссионных свойств катода и снижение напряжения зажигания разряда на величину около 20 В, обусловленное вкладом механизма усиленной температурой полевой электронной эмиссии из металлической подложки катода в пленку. Этот фактор нужно принимать во внимание, например, при моделировании процесса перезажигания газоразрядных приборов на этапе их остывания после погасания, обусловленного кратковременным снижением напряжения в питающей сети.

5. Сформулирована модель слаботочного газового разряда при наличии на поверхности катода диэлектрической пленки толщиной 10–100 нм. Рассчитана эмиссионная эффективность пленки и характеристики разряда как функции ее толщины. Показано, что наблюдаемая экспериментально немонотонная зависимость эффективного коэффициента электронной эмиссии катода и напряжения зажигания разряда от толщины пленки может быть объяснена неоднородностью распределения электрического поля в ней.

6. Разработана численная модель термополевой электронной эмиссии с катода с диэлектрической пленкой. Получены выражения для эмиссионной эффективности пленки и плотности тока термополевой электронной эмиссии с катода, позволяющие рассчитать зависимость его эмиссионных характеристик от напряженности электрического поля в пленке и температуры в достаточно широких интервалах их изменения. В предельных случаях низкой температуры катода и сильного электрического поля в пленке (модель полевой эмиссии), а также высокой температуры катода и слабого поля в пленке (модель термической эмиссии), результаты расчетов для вольфрамового катода с диэлектрической пленкой оксида алюминия согласуются с полученными из соответствующих аналитических формул. Показано, что при моделировании процессов в газовом разряде при наличии на катоде диэлектрических пленок термополевой механизм эмиссии электронов с его поверхности нужно учи-

тивать уже при температуре катода, превосходящей комнатную на несколько сотен градусов.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Кристя В.И., Вершинин Е.В., Мьо Ти Ха. Влияние полевой электронной эмиссии из катода с тонкой диэлектрической пленкой на минимальное напряжение зажигания слаботочного газового разряда // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 22-27 (0,56 п.л./0,20 п.л.).

2. Влияние термополевой электронной эмиссии из катода с тонкой диэлектрической пленкой на эмиссионную эффективность пленки и напряжение зажигания таунсендовского газового разряда / Мьо Ти Ха [и др.] // Известия высших учебных заведений, Физика. 2019. Т. 62. № 1. С. 72-78 (англоязычная версия: Influence of the thermo-field electron emission from the cathode with a thin insulating film on the film emission efficiency and ignition voltage of the Townsend gas discharge / Myo Thi Ha [et al.] // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62. No. 1. P. 82-89) (0,42 п.л./0,15 п.л.).

3. Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. Моделирование влияния толщины диэлектрической пленки на поверхности катода на его эффективный коэффициент электронной эмиссии в слаботочном газовом разряде // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 4. С. 79-83 (англоязычная версия: Kristya V.I., Myo Thi Ha, Fisher M. R. Modeling of the influence of the thickness of an insulating film on a cathode surface on its effective secondary-electron emission yield in low-current gas discharge // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13. No. 2. P. 339-343) (0,62 п.л./0,25 п.л.).

4. Кристя В.И., Мьо Ти Ха. Моделирование влияния полевой электронной эмиссии из катода с тонкой диэлектрической пленкой на вольт-амперную характеристику и устойчивость слаботочного газового разряда // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 5. С. 63-67 (англоязычная версия: Kristya V.I., Myo Thi Ha. Modeling of impact of the field electron emission from the cathode with an insulating film on the voltage-current characteristic and stability of the low-current gas discharge // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. Vol. 14. No. 3. P. 490-493) (0,38 п.л./0,22 п.л.).

5. Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. Моделирование влияния диэлектрической пленки на поверхности катода на вольт-амперную характеристику тлеющего газового разряда // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 846-850 (англоязычная версия: Kristya V.I., Myo Thi Ha, Fisher M. R. Modeling of influence of the cathode surface insulating film on the voltage-current characteristic of the glow gas discharge // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. Vol. 84. No. 6. P. 698-701) (0,53 п.л./0,20 п.л.).

6. Кристя В.И., Мьо Ти Ха. Расчет характеристик катодного слоя разряда в смеси аргона с парами ртути // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Все-

русской научно-технической конференции. Калуга. 2017. Т. 2. С. 66-68 (0,15 п.л./0,10 п.л.).

7. Фишер М.Р., Мьo Ти Ха, Кристиa В.И. Расчет зависимости эффективного коэффициента электронной эмиссии катода с тонкой диэлектрической пленкой от ее толщины и температуры в слабoточном газовом разряде // XLVIII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2018. С. 31 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

8. Бондаренко Г.Г., Кристиa В.И., Мьo Ти Ха. Расчет напряжения зажигания слабoточного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки // Радиационная физика твердого тела: Труды XXVIII Международной конференции. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018. С. 35-39 (0,20 п.л./0,12 п.л.).

9. Кристиa В.И., Мьo Ти Ха. Расчет характеристик слабoточного газового разряда при наличии диэлектрической пленки на поверхности катода // XLIX Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов. М.: МГУ, 2019. С. 59 (0,06 п.л./0,03 п.л.).

10. Расчет напряжения зажигания разряда в смеси аргона с парами ртути при низких температурах / Мьo Ти Ха [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXIX Международной конференции. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2019. С. 44-50 (0,24 п.л./0,10 п.л.).

11. Кристиa В.И., Мьo Ти Ха. Моделирование влияния тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода на вольт-амперную характеристику слабoточного газового разряда // Взаимодействие ионов с поверхностью: Труды XXIV Международной конференции. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. Т. 3. С. 242-245 (0,15 п.л./0,08 п.л.).

12. Мьo Ти Ха., Кристиa В.И. Расчет влияния диэлектрической пленки на катоде на характеристики слабoточного газового разряда // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции Калуга. 2019. Т. 3. С. 110-112 (0,12 п.л./0,08 п.л.).

13. Влияние диэлектрической пленки на поверхности катода на характеристики тлеющего разряда / Мьo Ти Ха [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXX Международной конференции. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020. С. 205-211 (0,26 п.л./0,10 п.л.).

14. Влияние температуры на эмиссию электронов из катода с тонкой диэлектрической пленкой в тлеющем разряде / Мьo Ти Ха [и др.] // Радиационная физика твердого тела: Труды XXX Международной конференции. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020. С. 285-290 (0,20 п.л./0,08 п.л.).

Мьо Ти Ха

Моделирование влияния полевой и термополевой электронной эмиссии из электродов с тонкими диэлектрическими пленками на их взаимодействие с низкотемпературной газоразрядной плазмой

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 22.03.2021г. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. (4842) 57-31-87