УДК 538.971

На правах рукописи

Йе Наинг Тун

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРАХ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в Калужском филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

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

Официальные оппоненты: **Волков Степан Степанович,**
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», профессор кафедры электронных приборов;

Волков Николай Викторович,
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», доцент кафедры физических проблем материаловедения.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий».

Защита состоится « 23 » декабря 2015 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

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

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в различных областях человеческой деятельности используются газоразрядные приборы. Они разделяются на приборы тлеющего разряда (такие как плазменные дисплеи, газовые лазеры) и приборы дугового разряда (например, осветительные лампы). В приборах тлеющего разряда после приложения напряжения между электродами происходит пробой рабочего газа и зажигается тлеющий разряд, который и поддерживается в течение всего времени их работы. В тлеющем разряде катодное падение напряжения составляет 100-200 В, а основным механизмом эмиссии с катода электронов, необходимых для поддержания разряда, является ионно-электронная эмиссия. В приборах же 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 термоэлектронная эмиссия, и разряд переходит в дуговой с катодным падением напряжения 10-20 В. Срок службы таких приборов в значительной степени ограничивается процессом распыления катода ионами, ускоряющимися в катодном слое тлеющего разряда, и быстрыми атомами, образующимися при резонансной перезарядке быстрых ионов на атомах газа, причем этот механизм является основным и для приборов дугового разряда, так как их долговечность в непрерывном режиме работы существенно больше, чем в режиме периодических включений – выключений. Тлеющий разряд используется также в электронике для травления микроструктур и напыления тонких пленок, поскольку плазменные технологии имеют ряд преимуществ перед ионно-пучковыми.

Для усовершенствования указанных приборов и технологий необходимо понимание физических процессов, протекающих в катодном слое тлеющего разряда и на поверхности катода. Однако до настоящего времени остаются недостаточно изученными ряд вопросов, связанных с исследованием влияния рельефа поверхности катода и наличия на ней диэлектрических пленок на процессы, протекающие в катодном слое, и, в частности, на распыление катода, в значительной степени влияющее на его долговечность в приборе. Это определяет актуальность данной работы, а также ее значение для физики взаимодействия газоразрядной плазмы с поверхностью твердого тела и физической электроники.

Целью диссертационной работы являлось исследование методами математического моделирования взаимодействия низкотемпературной плазмы и катода газоразрядного прибора при наличии на нем тонкой диэлектрической пленки, а также периодического поверхностного рельефа малой амплитуды. Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи**:

- построение стационарной модели катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и исследование ее влияния на характеристики разряда;

М Г Т У
ИМ. Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

- создание нестационарной модели, описывающей динамику нагрева катода, поверхность которого покрыта диэлектрической пленкой, и изучение влияния пленки на переход тлеющего разряда в дуговой;

- нахождение энергетических спектров бомбардирующих катод ионов и атомов при наличии на нем периодического рельефа малой амплитуды и оценка его влияния на эффективный коэффициент распыления катода и степень неоднородности его распыления в разряде;

- исследование неоднородности потоков ионов, бомбардирующих катод, и распыленных с катода атомов при наличии на нем тонкой диэлектрической пленки переменной толщины.

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

1. Разработана модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, учитывающая полевую электронную эмиссию из металлической подложки катода; показано, что полевая эмиссия может приводить к существенному снижению катодного падения напряжения разряда, а следовательно, к уменьшению энергий бомбардирующих катод частиц и эффективного коэффициента распыления материала катода в разряде.

2. Исследовано влияние диэлектрической пленки на температурный режим катода в разряде и установлено, что она обусловливает более интенсивный его разогрев вследствие увеличения плотности разрядного тока и более быстрый переход разряда в дуговую форму.

3. Рассчитаны распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления и плотности потока распыленных атомов вдоль искривленной поверхности металлического катода в тлеющем разряде; подтверждено, что эффективный коэффициент распыления катода имеет минимальную величину на вершинах рельефа из-за преимущественной фокусировки на них низкоэнергетичных ионов, плотность же потока атомов, распыленных с поверхности катода, достигает на вершинах рельефа максимального значения вследствие большей плотности потока бомбардирующих их частиц.

4. Установлено, что основной вклад в неоднородность распыления катода с поверхностным рельефом в тлеющем разряде вносит неоднородность ионного потока, а вклад неоднородности потока быстрых атомов мал и может не приниматься во внимание, если ширина катодного слоя разряда существенно превосходит поперечные размеры элементов рельефа.

5. Рассчитаны распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления и плотности потока распыленных атомов вдоль катода с диэлектрической пленкой переменной толщины; показано, что бомбардирующий ее в разряде ионный поток максимален на участках с наименьшей толщиной пленки, а эффективный коэффициент распыления принимает на них минимальные значения в результате того, что на них преимущественно фокусируются ионы с малыми энергиями; поток же распыленных атомов с участков пленки с ее наименьшей толщиной имеет наибольшую величину вследствие большей плотности бомбардирую-

щего их ионного потока, что должно приводить к увеличению неравномерности толщины пленки в процессе ее распыления и к образованию в ней пор с течением времени.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что результаты, полученные при ее выполнении, вносят существенный вклад в понимание процессов, протекающих при взаимодействии низкотемпературной плазмы с поверхностью катода газоразрядного прибора при наличии на ней рельефа и диэлектрических оксидных пленок. Они могут быть использованы для:

- изучения влияния неоднородности поверхности катода на характеристики катодного слоя разряда, определяющие интенсивность ее распыления;
- выбора оптимального рельефа поверхности катода, снижающего интенсивность его распыления при различных разрядных режимах;
- оптимизации процесса нагрева катода в тлеющем разряде с целью ускорения его перехода в дуговую форму в приборах дугового разряда.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в катодном слое тлеющего разряда и на поверхности катода, во многих случаях затруднительно, поскольку толщина катодного 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 распределение изучаемых характеристик разряда в пространстве и во времени, а также их взаимосвязь.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Модель катодного слоя тлеющего 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 уменьшению энергий бомбардирующих катод частиц и эффективного коэффициента распыления материала катода в разряде.

2. Модель, описывающая динамику разогрева катода с поверхностной диэлектрической пленкой в тлеющем разряде; вывод о том, что диэлектрическая пленка может обеспечивать более быстрый переход тлеющего разряда в дуговой.

3. Рассчитанные распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления и плотности потока распыленных атомов вдоль искривленной поверхности металлического катода в тлеющем разряде; вывод о том, что эффективный коэффициент распыления металлического катода с поверхностным рельефом имеет минимальную величину на вершинах рельефа из-за преимущественной фокусировки на них низкоэнергетичных ионов, плотность же потока атомов, распыленных с

поверхности катода, достигает на вершинах рельефа максимального значения вследствие большей плотности потока бомбардирующих их частиц.

4. Рассчитанные распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления и плотности потока распыленных атомов вдоль диэлектрической пленки переменной толщины на поверхности катода; вывод о том, что эффективный коэффициент распыления катода с поверхностной диэлектрической пленкой переменной толщины принимает на участках с наименьшей толщиной пленки минимальные значения, а поток распыленных атомов с участков пленки с ее наименьшей толщиной имеет наибольшую величину вследствие большей плотности бомбардирующего их ионного потока, что должно приводить к увеличению неравномерности толщины пленки в процессе ее распыления и к образованию в ней пор с течением времени.

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 8 международных и всероссийских конференциях: XLII, XLIII и XLIV Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2012 г., 2013 г., 2014 г.), XXI и XXII Международных конференциях «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Ярославль, 2013 г., Москва, 2015 г.), Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2012 г., 2013 г., 2014 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК по физике (Известия РАН. Серия физическая, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования). Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 131 наименования. Её общий объем составляет 118 страниц, включая 32 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 на катоде и в катодном слое тлеющего разряда, а также их существующие математические модели.

Во второй главе исследовано влияние наличия на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки толщиной порядка 10 нм на характеристики катодного слоя тлеющего разряда и распыление катода.

В первом разделе сформулирована модель катодного слоя разряда, учитывающая, что при протекании в нем тока происходит бомбардировка катода ионами, плотность тока которых равна j_i. При этом с его поверхности происходит ионно-электронная эмиссия электронов с плотностью тока $j_{ei} = \gamma_i j_i$, где γ_i - коэффициент ионно-электронной эмиссии. В результате, на поверхности пленки накапливается положительный заряд, создающий в пленке электрическое поле с напряженностью E_f, и при достижении ею величины порядка 10^9 В/м начинается полевая эмиссия (называемая также автоэмиссией) электронов из металлической подложки в пленку, плотность тока которой j_a определяется формулой Фаулера – Нордгейма. Эмиттированные электроны, достигая внешней границы пленки, нейтрализуют поверхностный заряд, а их доля δ_f выходит из пленки, создавая дополнительный электронный ток с плотностью $j_{ea} = \delta_f j_a$. Величина δ_f в условиях, характерных для тлеющего разряда низкого давления, имеет порядок 10^{-1} и при малых толщинах пленки она растет с увеличением H_f. Это объясняется увеличением энергий электронов на внешней границе пленки, что обусловливает возрастание вероятности их выхода из нее. В результате, плотность полного электронного тока с поверхности катода равна $j_e = j_{ei} + j_{ea} = \gamma_s j_i$, где $\gamma_s = \gamma_i + \gamma_a$ - эффективный коэффициент электронной эмиссии катода, в котором $\gamma_a = j_{ea}/j_i$. Следовательно, плотность разрядного тока равна $j = j_i + j_e = (1+\gamma_s) j_i$, а напряженность электрического поля E_f в пленке в установившемся режиме разряда определяется из условия равенства полной плотности тока на поверхности пленки и плотности тока полевой эмиссии из подложки $j = j_a$. Модель включает также условие поддержания разряда, следующее из уравнения переноса ионов выражение для плотности ионного тока у катода, а также учитывает, что напряженность электрического поля E в катодном слое линейно убывает с удалением от катода. В результате сформулирована система нелинейных уравнений, позволяющая рассчитать катодное падение потенциала разряда U_c и длину катодного слоя разряда d_c при заданной плотности разрядного тока j.

Во втором разделе разработан алгоритм численного решения полученной системы с использованием итерационных процедур.

В третьем разделе записаны выражения для функций распределения по энергиям потоков ионов и быстрых атомов, бомбардирующих поверхность катода в разряде, $f_i(d_c,\varepsilon)$ и $f_a(d_c,\varepsilon)$. С их использованием найдены соотношения для эффективных (усредненных по энергиям бомбардирующих частиц) коэффициентов распыления катода ионами и быстрыми атомами $\overline{Y}_i$ и $\overline{Y}_a$, а также полный эффективный коэффициент распыления $\overline{Y}_t$, равный среднему числу атомов катода, распыляемых в расчете на один падающий на него ион, в который вносят вклад как сами ионы, так и образующиеся при их перезарядке быстрые атомы.

В четвертом разделе приведены результаты расчетов для разряда в аргоне с катодом из вольфрама с монослоем оксида бария на поверхности (т.е. при отсутствии оксидной пленки) и при наличии пленки оксида бария. Найденные зависимости $U_c(j)$ для катода без оксидной пленки на поверхности согласуются с результатами, полученными в работе Phelps A.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10, № 2. P. 329 с использованием модели, основанной на использовании метода статистического моделирования Монте-Карло, что подтверждает удовлетворительную точность данной аналитической модели при значениях отношения j/p^2 порядка 1 мА/м^{2}Па^2, где p - давление рабочего газа.

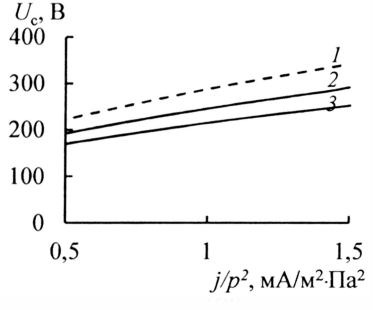


Рис. 1.
Зависимость катодного падения напряжения U_c от плотности разрядного тока j при $H_f = 0$ нм (*1*), $H_f =$ 10 нм (*2*), $H_f = 20$ нм (*3*) и $\gamma_i = 0{,}05$, $\delta_f = 0{,}01 E_f H_f$

Рассчитанные зависимости U_c от j/p^2 при различных значениях толщины H_f оксидной пленки на катоде изображены на Рис. 1. Из него видно, что увеличение H_f приводит к заметному снижению катодного падения напряжения U_c из-за роста эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_s, обусловленного увеличением вклада в него электронов, эмитированных из подложки под действием существующего в пленке поля (вследствие возрастания коэффициента δ_f). Величина такого снижения возрастает с уменьшением γ_i, т.е. при ухудшении эмиссионных свойств материала катода. Это приводит к уменьшению энергий ионов и быстрых атомов, бомбардирующих катод, причем, при уменьшении коэффициента ионно-электронной эмиссии и

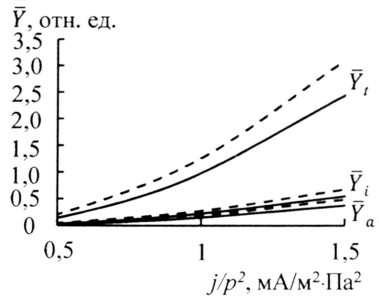


Рис. 2.
Зависимость эффективного коэффициента распыления катода $\bar{Y}_t$ и его ионной и атомной составляющих $\bar{Y}_i$ и $\bar{Y}_a$ от плотности разрядного тока j при $\gamma_i = 0{,}05$.
Сплошные линии – $H_f = 10$ нм, штриховые – $H_f = 0$

увеличении плотности разрядного тока энергии бомбардирующих катод частиц существенно возрастают из-за обусловленного этим увеличения U_c.

Вычисленный эффективный коэффициент распыления катода $\bar{Y}_t$, а также его ионная и атомная составляющие $\bar{Y}_i$ и $\bar{Y}_a$, как функции плотности разрядного тока j, приведены на Рис. 2, из которого следует, что при увеличении j и обусловленном этим увеличении U_c и энергий бомбардирующих катод частиц происходит быстрый рост эффективного коэффициента распыления и его компонент из-за возрастания энергий ионов и атомов. При этом присутствие на катоде оксидной пленки заметно уменьшает его величину (примерно на 20% в случае H_f=10 нм), что должно приводить к снижению интенсивности распыления катода и, соответственно, к увеличению его долговечности.

В третьей главе исследовано влияние тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода на динамику разогрева катода в тлеющем разряде и его переход в дуговой разряд.

В первом разделе сформулирована нестационарная модель катодного слоя разряда, в которой, наряду с ионно-электронной и полевой эмиссией, учитывается также термоэмиссия электронов с катода, возникающая при его нагреве до температуры порядка 10^3 К, плотность тока которой j_{et} определяется формулой Ричардсона-Дэшмана. Плотность электронного тока с поверхности катода при этом равна $j_e = j_{ei} + j_{ea} + j_{et} = \gamma_s j_i$, где $\gamma_s = \gamma_i + \gamma_a + \gamma_t$ - эффективный коэффициент электронной эмиссии катода, в котором $\gamma_t = j_{et}/j_i$, а плотность разрядного тока равна $j = j_i + j_e = (1+\gamma_s) j_i$. Изменение температуры катода T_c с течением времени определяется нестационарным уравнением его теплового баланса, а уменьшение концентрации рабочего газа в катодном слое разряда в результате его нагрева учитывается путем введения эффективного давления p согласно соотношению $p = p_0 T_0 / T_c$, где p_0 - давление газа при начальной температуре T_0. Эти соотношения вместе с уравнениями для характеристик катодного слоя разряда образуют нелинейную нестационарную систему уравнений, позволяющую рассчитать измене-

ние температуры катода и характеристик катодного слоя в течение времени горения тлеющего разряда до его перехода в дуговой разряд.

Во втором разделе разработан алгоритм численного решения полученной системы, состоящий в том, что на каждом достаточно малом шаге по времени с использованием алгоритма, описанного в главе 2, находится решение уравнений катодного слоя разряда, после чего из уравнения теплового баланса вычисляется температура катода на следующем шаге. Такие шаги повторяются до момента начала быстрого уменьшения катодного падения напряжения U_c, соответствующего переходу тлеющего разряда в дуговой разряд.

В третьем разделе приведены результаты расчетов для разряда в аргоне с цилиндрическим катодом из вольфрама с пленкой оксида бария на поверхности и без нее. Найденные зависимости катодного падения напряжения U_c и температуры катода T_c от времени горения разряда приведены на Рис. 3.

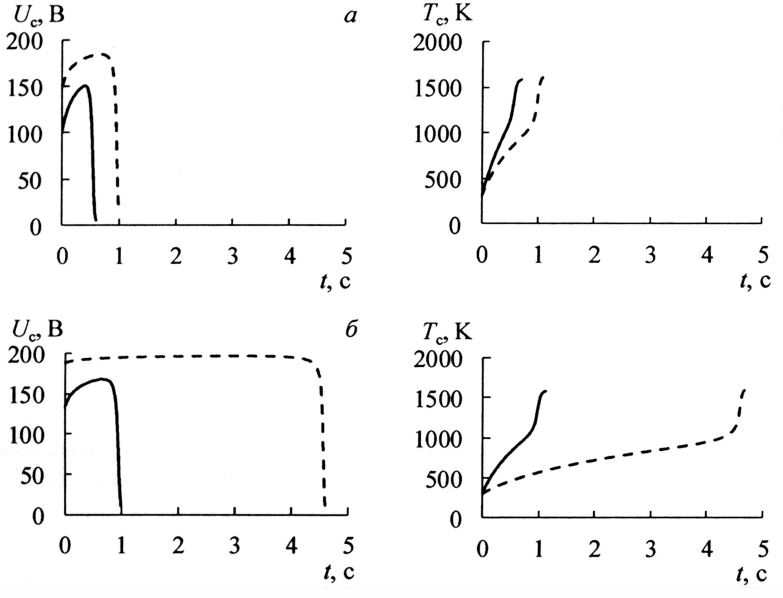


Рис. 3.

Зависимости U_c и T_c от времени для катода с диэлектрической пленкой (сплошные линии) и без пленки (штриховые линии) при $\delta_f = 0{,}01 E_f H_f$, H_f=10 нм и γ_i=0,2 (а), γ_i=0,05 (б)

Из него видно, что при наличии на поверхности катода тонкого слоя диэлектрика происходит его более интенсивный нагрев. Это объясняется тем, что в случае металлического катода при $T_c < 10^3$ К основным механизмом

эмиссии электронов является ионно-электронная эмиссия (т.е. $\gamma_s = \gamma_i$), а при наличии на катоде диэлектрической пленки существенный вклад в нее вносит также полевая эмиссия из металлической подложки в пленку ($\gamma_s = \gamma_i + \gamma_a$), причем при рассматриваемых условиях $\gamma_a \sim \gamma_i$. В результате катод эмиттирует дополнительные электроны, обеспечивающие более интенсивную ионизацию газа у его поверхности, что приводит к увеличению разрядного тока и теплового потока, поступающего на катод из катодного слоя разряда, а следовательно, к более быстрому его нагреву и ускоренному переходу разряда в дуговую форму. Время горения тлеющего разряда с металлическим катодом существенно возрастает при уменьшении коэффициента ионно-электронной эмиссии γ_i, и при малых его величинах переход к дуговому разряду не происходит достаточно долго, в отличие от случая наличия на катоде диэлектрической пленки. Снижение доли δ_f электронов, эмитированных из подложки катода под действием сильного электрического поля, генерируемого поверхностными зарядами в пленке, и выходящих из нее в разрядный объем, приводит к снижению плотности разрядного тока у поверхности катода. Это обусловливает меньшую скорость разогрева катода и увеличение продолжительности горения тлеющего разряда до его перехода в дуговой разряд. К такому же результату приводит и уменьшение давления рабочего газа, что также связано со снижением плотности разрядного тока.

При всех рассмотренных условиях рассчитанное время перехода разряда в дуговую форму для катода с оксидной пленкой не превосходит 1 с, что согласуется с экспериментальными данными (Byszewski W.W., Li Y.M., Budinger A.B., Gregor P.D. // Plasma Sources Sci. Technol. 1996. V. 5, № 4. P. 720), в то время как для разряда с металлическим катодом оно может быть значительно большим. Это подтверждает важную роль оксидных пленок на электродах в обеспечении перехода приборов дугового разряда в рабочий режим.

В четвертой главе изучено влияние наличия на металлическом катоде периодического поверхностного рельефа малой амплитуды на потоки бомбардирующих катод частиц и интенсивность его распыления в тлеющем разряде. При этом, вследствие искривленности поверхности катода, в приповерхностном слое разряда электрическое поле имеет ненулевую компоненту, направленную вдоль катода, величина которой периодически изменяется в этом направлении. В результате происходит отклонение траекторий ионов в направлении вершин рельефа, приводящее к нарушению однородности бомбардирующего катод ионного потока, а следовательно, и потока быстрых атомов, образующихся при перезарядке ионов на атомах рабочего газа.

В первом разделе для случая, когда амплитуда элементов рельефа h_c имеет величину, намного меньшую его периода l_c и длины перезарядки ионов в газе λ_c, записаны аналитические выражения для функций распределения по энергиям потоков ионов и быстрых атомов. Они представляют собой суммы функции распределения по энергиям потока соответствующего типа

частиц у гладкого катода и малой поправки к ней, обусловленной искривленностью поверхности катода.

Во втором разделе вычислены плотности потоков ионов и быстрых атомов у искривленной поверхности катода, которые также представляют собой суммы невозмущенной плотности потока соответствующего типа частиц и малой поправки к нему, периодически изменяющейся вдоль поверхности катода.

В третьем и четвертом разделах рассчитаны плотности потоков вещества катода, распыленного с него ионами и быстрыми атомами, а также эффективные коэффициенты распыления его поверхности каждым из типов частиц.

В пятом разделе исследована зависимость неоднородности потоков частиц у поверхности катода и коэффициента его распыления от параметров рельефа и характеристик разряда. Показано, что неоднородность коэффициента распыления катода с поверхностным рельефом в тлеющем разряде определяется наличием энергетической сепарации ионов, т.е. преимущественной фокусировкой низкоэнергетичных ионов на вершинах рельефа, приводящей к снижению усредненного по энергиям ионов коэффициента распыления этих участков. Но плотность потока распыленных ионами атомов материала катода с таких участков больше, чем с других участков, вследствие повышенной плотности ионного потока на них. Это обусловливает более интенсивное распыление в разряде в чистом газе выступающих элементов рельефа.

Неоднородность потока распыленных атомов возрастает с увеличением амплитуды поверхностного рельефа h_c (и пропорциональна отношению h_c / λ_c), так как при этом усиливается фокусировка ионного потока на вершинах рельефа. Неоднородность эффективного коэффициента распыления катода также пропорциональна h_c / λ_c и растет с увеличением характерного поперечного размера элементов рельефа l_c, поскольку при этом приповерхностный слой разряда, в котором существует компонента электрического поля, направленная вдоль поверхности катода, становится шире. Поэтому фокусировке подвергаются ионы, претерпевшие последнюю перезарядку дальше от катода и имеющие у его поверхности большую энергию, т.е. количество таких ионов увеличивается.

Энергетическая сепарация ионов оказывает влияние на усредненный по энергиям ионов коэффициент распыления катода при характерном размере элементов его поверхностного рельефа $l_c \sim \lambda_c$. В частности, при давлениях рабочего газа порядка 1 Па, используемых в ряде технологий микроэлектроники, энергетическая сепарация имеет заметную величину при значениях l_c в несколько миллиметров, что соответствует результатам работы Woodworth J. R., Aragon B. P., Hamilton T. W. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. № 15. P. 1947.

На Рис. 4 приведены найденные из полученных во втором разделе выражений энергетические спектры ионов и быстрых атомов у поверхности

гладкого катода $f_{i0}(d_c,\varepsilon)$ и $f_{a0}(d_c,\varepsilon)$, а также амплитуды поправок к ним $f_{i1}(d_c,\varepsilon)$ и $f_{a1}(d_c,\varepsilon)$, обусловленные искривленностью его поверхности, при двух значениях отношения d_c/λ_c. Видно, что при возрастании отношения d_c/λ_c, т.е. при увеличении среднего числа перезарядок ионов в катодном слое разряда, доля высокоэнергетичных ионов и быстрых атомов в их потоках быстро убывает вследствие уменьшения падения напряжения на длине перезарядки иона в катодном слое.

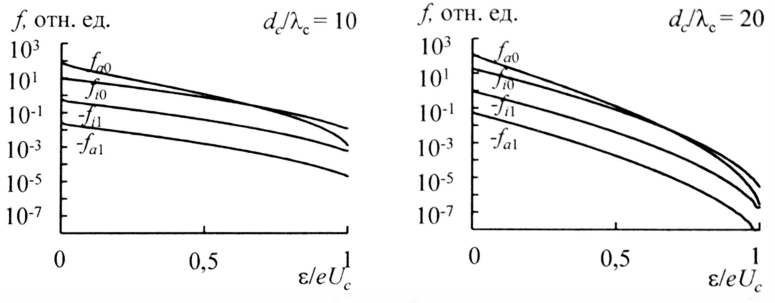


Рис. 4.

Составляющие энергетических спектров ионов и быстрых атомов у поверхности катода при двух значениях отношения d_c/λ_c и λ_c/l_c=4, h_c/l_c=0,2.

При уменьшении же поперечного размера элементов рельефа l_c, т.е. при увеличении отношения λ_c/l_c, амплитуды неоднородных компонент функции распределения потоков ионов и быстрых атомов по энергиям убывают вследствие того, что снижается доля ионов, претерпевших последнюю перезарядку в приэлектродном слое разряда толщиной порядка l_c, в котором существует заметная поперечная компонента электрического поля, и подвергающихся фокусировке на вершинах рельефа. В то же время, с увеличением амплитуды рельефа, т.е. отношения h_c/l_c, поправки к спектрам ионов и быстрых атомов, обусловленные искривленностью поверхности катода, возрастают из-за увеличения поперечной компоненты напряженности электрического поля. При этом во всех рассмотренных случаях поправки к спектру быстрых атомов имеют по крайней мере на порядок меньшую величину, чем поправки к ионному спектру. Поэтому основной вклад в неоднородность распыления катода вносит неоднородность ионного потока, а вклад неоднородности потока быстрых атомов пренебрежимо мал. Таким образом, при моделировании распыления в тлеющем разряде негладких катодов с размерами элементов поверхностного рельефа, много меньшими ширины катодного слоя разряда, неоднородность потока быстрых атомов может не приниматься во внимание.

В пятой главе исследовано влияние неравномерности толщины диэлектрической пленки на катоде на ее распыление в тлеющем разряде. Если толщина пленки изменяется вдоль поверхности катода, происходит искривление силовых линий электрического поля в приэлектродном слое разряда. В результате этого нарушается однородность бомбардирующего катод ионного потока, что должно приводить к изменению неравномерности толщины пленки с течением времени и влиять на долговечность катода.

В первом разделе для случая, когда толщина пленки периодически изменяется вдоль поверхности катода и амплитуда неравномерности толщины пленки h_f имеет величину, намного меньшую ее периода l_f и длины перезарядки ионов в газе λ_c, записано аналитическое выражение для функции распределения по энергиям потока ионов. Оно представляет собой сумму функции распределения по энергиям потока ионов у катода с диэлектрической пленкой постоянной толщины H_f и малой поправки к ней, обусловленной неравномерностью толщины пленки. Неоднородность потока быстрых атомов у поверхности негладкого катода, как показано в главе 4, намного меньше неоднородности потока ионов, поэтому она не принимается во внимание.

Во втором разделе найдены выражения для плотности потока ионов у поверхности катода, эффективного коэффициента распыления его поверхности и плотности потока вещества катода, распыляемого ионами.

В третьем разделе исследована зависимость неоднородности коэффициента распыления и потоков частиц у поверхности катода от параметров диэлектрической пленки и характеристик разряда. Так как неоднородность ионного потока пренебрежимо мала вне слоя толщиной порядка l_f у поверхности катода, то макроскопические характеристики катодного слоя разряда в этом случае вычислялись с использованием его одномерной модели, сформулированной в главе 2.

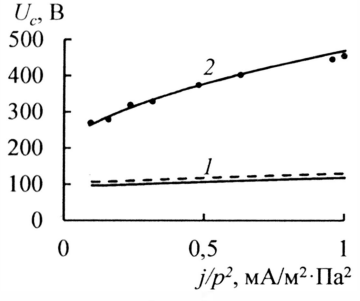


Рис. 5.
Зависимость $U_c(j/p^2)$ для случаев катода с пленкой BaO и с монослоем BaO (сплошная и штриховая линии 1), а также для случая медного катода без оксидной пленки (линия 2). Точки - экспериментальные значения U_c для разряда с медным катодом (Rozsa K., Gallagher A., Donko Z. // Phys. Rev. E. 1995. V.52. № 1. P. 913)

На Рис. 5 приведены найденные из нее зависимости величины катодного падения напряжения U_c от плотности разрядного тока j, разделенной на квадрат давления газа p, для вольфрамового катода с оксидной пленкой и без нее. Видно, что при наличии пленки происходит уменьшение U_c на величину порядка 10 В вследствие возраста-

ния эффективного коэффициента электронной эмиссии катода, обусловленного наличием полевой эмиссии электронов из его подложки. На этом рисунке также изображена рассчитанная зависимость $U_c(j/p^2)$ для разряда с медным катодом без оксидной пленки на поверхности (при $\delta_f = 0$), а также экспериментальные значения U_c для такого разряда. Хорошее согласие результатов подтверждает удовлетворительную точность используемой модели катодного слоя при значениях отношения j/p^2 в интервале 0,1–1 мА·м$^{-2}$Па$^{-2}$.

Из полученных во втором разделе соотношений следует, что энергии ионов существенно возрастают с увеличением плотности разрядного тока j из-за увеличения U_c и уменьшения d_c, а наличие на катоде оксидной пленки приводит к некоторому сужению энергетического спектра ионного потока вследствие увеличения γ_s. При этом неоднородность функции распределения по энергиям потока ионов вдоль поверхности катода, обусловленная фокусировкой ионов на участках с минимальной толщиной пленки, имеет заметную величину уже в случае $h_f/H_f \ll 1$, т.е. при достаточно малой неравномерности толщины пленки.

Рассчитанные однородная компонента J_{si0} плотности потока распыленных с поверхности катода атомов, а также амплитуда ее неоднородной компоненты J_{si1}, как функции j/p^2, приведены на Рис. 6.

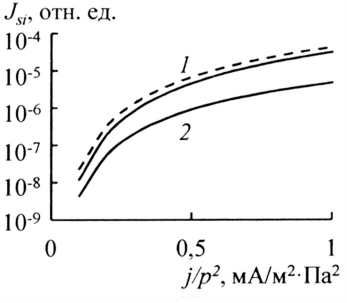


Рис. 6.
Зависимость однородной компоненты плотности потока распыленных с поверхности катода атомов J_{si0} и амплитуды ее неоднородной компоненты J_{si1} от j/p^2 в случае катода с оксидной пленкой (сплошные линии 1 и 2), а также зависимость $J_{si0}\left(j/p^2\right)$ для катода без оксидной пленки (штриховая линия) при $h_f = 0{,}2H_f$

Видно, что величина J_{si0} быстро возрастает с увеличением плотности разрядного тока j из-за роста энергий ионов. При этом уже в случае h_f/H_f=0,2 величина J_{si1} менее чем на порядок отличается от J_{si0}, т.е. происходит неравномерное распыление пленки в разряде, причем степень неравномерности убывает с увеличением j вследствие меньшей фокусировки ионов, имеющих большие энергии. В результате, происходит увеличение амплитуды h_f неравномерности толщины пленки с течением времени в результате большей интенсивности распыления ее участков с наименьшей толщиной. Это должно приводить к образованию пор в

пленке, что согласуется с наблюдаемым увеличением пористости оксидной пленки в течение срока службы катода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, учитывающая, наряду с ионно-электронной эмиссией с поверхности катода, также эмиссию электронов из металлической подложки катода под действием электрического поля, возникающего в пленке вследствие накопления на ней поверхностного заряда при ионной бомбардировке в разряде.

2. Показано, что наличие пленки толщиной порядка 10 нм приводит к заметному снижению катодного падения напряжения разряда и, соответственно, к уменьшению энергий бомбардирующих катод частиц. При этом при уменьшении коэффициента ионно-электронной эмиссии и увеличении плотности разрядного тока энергии бомбардирующих катод частиц существенно возрастают, что обусловливает быстрый рост коэффициента распыления катода с увеличением плотности разрядного тока, который, однако, заметно снижается при наличии на катоде диэлектрической пленки.

3. Предложена модель катодного слоя тлеющего разряда у катода с тонкой диэлектрической пленкой, учитывающая нагрев катода и рабочего газа потоком тепла, выделяющегося при протекании в газе электрического тока, которая, кроме ионно-электронной и полевой эмиссии электронов, принимает во внимание также термическую электронную эмиссию, возникающую при нагреве катода до достаточно высокой температуры.

4. Рассчитано изменение характеристик катодного слоя разряда и температуры поверхности катода в течение времени горения тлеющего разряда до его перехода в дуговой при различных величинах коэффициента ионно-электронной эмиссии катода и толщины пленки. Показано, что после зажигания тлеющего разряда, вследствие полевой электронной эмиссии из металлической подложки в пленку под действием возникающего в ней сильного электрического поля, увеличивается разрядный ток и интенсивность нагрева катода. Это обеспечивает более быстрое возникновение дугового разряда, т.е. ускоренный переход прибора в рабочий режим.

5. Рассчитаны энергетические спектры потоков ионов и быстрых атомов у искривленной поверхности металлического катода в тлеющем разряде. Найдены распределения плотностей потоков ионов и быстрых атомов, а также эффективного коэффициента распыления катода и плотности потока распыленных атомов вдоль его поверхности. Показано, что эффективный коэффициент распыления имеет минимальную величину на вершинах рельефа из-за преимущественной фокусировки на них низкоэнергетичных ионов, претерпевших последнюю перезарядку на атомах рабочего газа в слое порядка характерного поперечного размера элементов рельефа, где существует поперечная компонента напряженности электрического поля, причем неоднородность эффективного коэффициента распыления возрастает с увеличением амплитуды рельефа. Плотность же потока атомов, распыленных с поверхно-

сти катода, достигает на вершинах рельефа максимального значения вследствие большей плотности потока бомбардирующих их частиц. Основной вклад в неоднородность распыления катода вносит неоднородность ионного потока, а вклад неоднородности потока быстрых атомов мал и может не приниматься во внимание при моделировании распыления в тлеющем разряде, если ширина его катодного слоя существенно превосходит размеры элементов поверхностного рельефа катода.

6. Установлены закономерности процесса распыления в тлеющем разряде катода с тонкой диэлектрической пленкой, толщина которой периодически изменяется вдоль его поверхности. Показано, что уже при достаточно малой неравномерности толщины пленки бомбардирующий ее ионный поток является неоднородным и максимален на участках с наименьшей толщиной пленки. Это происходит вследствие существования фокусировки ионов на них, обусловленной нарушением однородности электрического поля у катода. Эффективный же коэффициент распыления принимает минимальные значения на участках с наименьшей толщиной пленки в результате того, что на них преимущественно фокусируются ионы с малыми энергиями, претерпевшие последнюю перезарядку вблизи катода. Поток распыленных атомов с участков пленки с ее наименьшей толщиной имеет наибольшую величину вследствие большей плотности бомбардирующего их ионного потока, что должно приводить к увеличению неравномерности толщины пленки в процессе ее распыления и к образованию в ней пор с течением времени.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние неоднородности ионного потока на распыление мишени с поверхностным рельефом в тлеющем разряде // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. №3. С. 109-112 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

2. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Расчет вклада ионов и быстрых атомов в неоднородность распыления мишени с поверхностным рельефом в тлеющем разряде // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. №3. С. 68-73 (0,38 п.л./0,18 п.л.).

3. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Моделирование влияния диэлектрической пленки на поверхности электрода на переход тлеющего разряда в дуговой // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78, № 6. С. 753-757 (0,3 п.л./ 0,1 п.л.).

4. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние оксидной пленки на поверхности катода на энергетические распределения ионов и быстрых атомов в тлеющем разряде // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 3. С. 74-80 (0,44 п.л./0,2 п.л.).

5. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние оксидной пленки на поверхности катода на характеристики ионного потока, бомбардирующего его в тлеющем разряде // Тезисы докладов XLIV Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 2014. С. 146 (0,06 п.л./0,04 п.л.).

6. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние диэлектрической пленки на поверхности катода на динамику перехода тлеющего разряда в дуговой // Взаимодействие ионов с поверхностью: Труды XXI Международной конференции. Ярославль: ЯрГУ, 2013. Т. 2. С. 496-499 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

7. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Моделирование энергетических спектров потоков частиц у искривленной поверхности электрода в тлеющем разряде // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Т. 2. С. 141-144 (0,25 п.л./0,15 п.л.).

8. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние неоднородности ионного потока на эффективный коэффициент распыления мишени с поверхностным рельефом в тлеющем разряде // Тезисы докладов XLII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 2012. С. 91 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

9. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Моделирование ионного распыления искривленной поверхности электрода в тлеющем разряде // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. Т. 3. С. 145-148 (0,25 п.л./0,12 п.л.).

10. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Расчет вклада быстрых атомов в распыление мишени с поверхностным рельефом в тлеющем разряде // Тезисы докладов XLIII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М.: МГУ, 2013. С. 68 (0,06 п.л./0,02 п.л.).

11. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Моделирование распыления поверхности электрода с диэлектрической пленкой переменной толщины в тлеющем разряде // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Т. 2. С. 300-303 (0,25 п.л./0,15 п.л.).

12. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Расчет характеристик распыления катода с диэлектрической пленкой переменной толщины в тлеющем разряде // Взаимодействие ионов с поверхностью: Труды XXII Международной конференции. М.: МИФИ, 2015. Т. 3. С. 264-267 (0,25 п.л./0,1 п.л.).