

УДК 537.525:621.32.032

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ КАТОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ НА ЕГО РАСПЫЛЕНИЕ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ В СМЕСИ АРГОНА И ПАРОВ РТУТИ

© 2024 г. Г. Г. Бондаренко^а, *, В. И. Кристья^б, **, Д. О. Савичкин^с, М. Р. Фишер^б

^аНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, 101000 Россия

^бМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Калужский филиал, Калуга, 248000 Россия

^сЗАО “Топ Системы”, Москва, 127055 Россия

*e-mail: gbondarenko@hse.ru

**e-mail: kristya@bmstu.ru

Поступила в редакцию 26.08.2023 г.

После доработки 27.10.2023 г.

Принята к публикации 27.10.2023 г.

Предложена модель слаботоочного газового разряда в смеси аргона и паров ртути при наличии на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки. Модель учитывает, что в такой смеси существенный вклад в ионизацию рабочего газа может давать ионизация атомов ртути при их столкновениях с метастабильными возбужденными атомами аргона. В разряде на поверхности пленки накапливаются положительные заряды, создающие в диэлектрике электрическое поле, достаточное для возникновения полевой эмиссии электронов из металлической подложки электрода в диэлектрик. Такие электроны ускоряются в пленке полем и могут выходить из нее в разрядный объем. В результате увеличивается эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода. Рассчитаны температурные зависимости характеристик разряда и показано, что вследствие быстрого уменьшения при снижении температуры концентрации паров ртути в смеси увеличиваются напряженность электрического поля в разрядном промежутке и разрядное напряжение. Наличие на катоде тонкой диэлектрической пленки может приводить к улучшению его эмиссионных свойств и существенному снижению разрядного напряжения. Это обуславливает уменьшение энергии ионов и атомов, бомбардирующих поверхность катода и, следовательно, интенсивности распыления катода в разряде.

Ключевые слова: слаботоочный газовый разряд, диэлектрическая пленка на катоде, ионно-электронная эмиссия, полевая электронная эмиссия, эмиссионная эффективность пленки, эффективный коэффициент электронной эмиссии катода.

DOI: 10.31857/S1028096024030132, **EDN:** HEKAFE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из типов газоразрядных приборов являются ртутные осветительные лампы [1–3], в которых в качестве рабочего газа используется смесь аргона с фиксированной концентрацией и паров ртути, концентрация которых зависит от температуры. Важная характеристика таких ламп — напряжение зажигания разряда, равное минимальной разности потенциалов между их электродами, при которой происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и возникает слаботоочный разряд, который затем

переходит в тлеющий разряд, а через некоторое время — в дуговой разряд [4–7]. Уменьшение напряжения зажигания разряда приводит к снижению энергоемкости прибора, а также к увеличению его долговечности.

Напряжение зажигания в значительной степени определяется процессами ионизации рабочего газа в разрядном объеме и эмиссии электронов с катода. В смеси аргон–ртуть существенный вклад в ионизацию газа наряду с ионизацией атомов электронами может давать ионизация атомов ртути при столкновениях с метастабильными возбужденными атомами аргона (реакция Пен-

нинга) [8–10]. Это обуславливает увеличение напряжения зажигания разряда при снижении температуры окружающей среды из-за уменьшения концентрации паров ртути в смеси.

Если на поверхности катода газоразрядного прибора имеются тонкие диэлектрические пленки, то в разряде на их поверхности накапливаются положительные заряды. Они создают в диэлектрике электрическое поле, достаточное для возникновения усиленной температурой полевой эмиссии электронов из металлической подложки электрода в диэлектрик [11–14]. Такие электроны ускоряются полем к внешней поверхности диэлектрика и могут преодолевать потенциальный барьер на границе пленки и выходить в разрядный объем, улучшая эмиссионные характеристики катода. Поэтому одним из способов снижения напряжения зажигания разряда в лампе может быть формирование на поверхности ее металлических электродов слоя диэлектрика толщиной порядка 10 нм.

Процессы переноса частиц основных типов, а также энергетические распределения ионов и быстрых атомов у поверхности катода и их вклады в его распыление изучали ранее для разрядов в чистых инертных газах или их смесях, состав которых не зависит от температуры [15–18]. В случае разряда в смеси аргон–ртуть с зависящим от температуры содержанием ртути и наличием пеннинговой ионизации ее атомов эти вопросы исследовали в [19], рассматривая металлический катод без поверхностных диэлектрических пленок. Влияние же полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку на его эмиссионные свойства и характеристики разряда изучали в [20, 21] только для разрядов в инертных газах. Показано, что оно определяется эмиссионной эффективностью пленки δ_f , равной доле эмитированных из подложки электронов, которые выходят из пленки в разрядный объем.

В настоящей работе представлена модель слабого газового разряда в смеси аргон–ртуть при наличии на металлическом катоде тонкой диэлектрической пленки. Рассчитана зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода от температуры рабочего газа и изучено влияние диэлектрической пленки на напряжение зажигания разряда при низких температурах окружающей среды, а также на энергетические спектры потоков ионов и быстрых атомов, бомбардирующих поверхность катода в разряде, и на интенсивность его распыления.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Пусть к разрядному промежутку длиной d между плоским металлическим катодом, на поверхности которого имеется тонкая диэлектрическая оксидная пленка толщиной H_f , и плоским анодом приложено напряжение, достаточное для возникновения в нем слабого газового разряда. Плотность разрядного тока j определяется уравнением разрядной цепи:

$$U_d + U_f + RSj = U_0, \quad (1)$$

где $U_d = E_d d$ и $U_f = E_f H_f$ – падение напряжения на разрядном промежутке и на диэлектрической пленке соответственно, E_d и E_f – напряженность электрического поля в них, S – площадь поверхности катода, занятая разрядом, U_0 – приложенное к цепи внешнее напряжение, R – балластное сопротивление, которое считают достаточно большим, чтобы обеспечить малую плотность разрядного тока, при которой разряд слабый [6].

В разряде происходит бомбардировка поверхности катода ионами, в результате на диэлектрической пленке накапливаются положительные заряды, создающие в пленке электрическое поле. Когда его напряженность E_f достигает величины порядка 10^8 В м⁻¹, начинается усиленная температурой полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку. Макроскопическая плотность тока эмиссии равна [22, 23]:

$$j_f(H_t) = \frac{as_f E_f^2}{t^2(y_0)(\phi_m - \chi_d)} \times \exp \left(- \frac{bv(y_0)(m^*/m)^{1/2}}{E_f} (\phi_m - \chi_d)^{3/2} \right) \frac{\pi kT/\varepsilon_d}{\sin(\pi kT/\varepsilon_d)}. \quad (2)$$

Здесь T – температура катода, H_t – длина туннелирования в пленку электрона с энергией вблизи уровня Ферми металла: ε_F , $v(y_0) = 1 - y_0^2 + (1/3)y_0^2 \ln y_0$, $t(y_0) = 1 + (1/9)y_0^2(1 - \ln y_0)$, $y_0 = cE_f^{1/2}/(\phi_m - \chi_d)$, $\varepsilon_d = \hbar e E_f / (2(2m^*(\phi_m - \chi_d))^{1/2} t(y_0))$, $a = 1.541 \times 10^{-6}$ А эВ В⁻², $b = 6.831 \times 10^9$ В м⁻¹ эВ^{-3/2}, $c = 3.795 \times 10^{-5}$ эВ м^{1/2} В^{-1/2}, $\hbar = h/2\pi$, h – постоянная Планка, e – заряд электрона, ϕ_m и χ_d – работа выхода подложки и электронное сродство материала пленки, m и m^* – эффективная масса электрона в вакууме и в диэлектрике, $E_f = \beta U_f / \varepsilon_f H_f$, β – коэффициент усиления электрического поля на элементах рельефа границы ме-

талл–диэлектрик, s_f – доля поверхности границы вблизи вершин рельефа, с которой происходит полевая эмиссия электронов, обусловленная усилением поля, ε_f – высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки.

Напряженность электрического поля E_f в пленке может быть найдена из условия равенства макроскопической плотности тока полевой электронной эмиссии и плотности разрядного тока:

$$j_f(H_f) = j. \quad (3)$$

Эмитированные электроны ускоряются в пленке электрическим полем и тормозятся при столкновениях с фононами. Когда они достигают внешней поверхности пленки, некоторая их доля δ_f выходит из нее в разряд, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , равный среднему числу электронов, эмитируемых с его поверхности в расчете на один падающий на него из разряда ион. Величина δ_f при температуре порядка комнатной определяется выражением [22, 23]:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} r(\varepsilon_n) \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n}, \quad (4)$$

где

$$r(\varepsilon_n) = \frac{\sin(\pi kT/\varepsilon_d)}{\pi} \times \\ \times \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_d}\right) \ln\left(1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_d}\right)\right) + I(\varepsilon_n) \right], \\ I(\varepsilon_n) = \int_0^{t_m(\varepsilon_n)} \frac{t^{kT/\varepsilon_d - 1}}{t + 1} dt, \quad t_m(\varepsilon_n) = \exp(-\varepsilon_n/kT),$$

$\varepsilon_{en} = eE_f H_f - \varphi_m - n\Delta\varepsilon$, $H_0 = H_f - H_r$, $\Delta\varepsilon$ – энергия, теряемая электроном при столкновении с фононом, λ_e – средняя длина пробега электрона в пленке между столкновениями в направлении, перпендикулярном поверхности катода. В предельном случае $T \rightarrow 0$ выражения (2) и (4) совпадают с соответствующими выражениями для плотности эмиссионного тока и эмиссионной эффективности пленки при низкой температуре, когда механизм электронной эмиссии является полевым [21].

В газовом разряде существенная часть электронов, эмитируемых с поверхности катода, возвращается к нему вследствие рассеяния на атомах рабочего газа, а в разрядный объем уходит лишь их доля f_{es} . Поэтому реальная эмиссионная эффективность пленки в разряде равна $\delta_{fe} = f_{es}\delta_f$ [4],

где $f_{es} = 1/(1 + \bar{v}/4w_e)$, $\bar{v}$ – средняя скорость эмитируемых катодом электронов, w_e – дрейфовая скорость электронов в газе. Эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} определяется выражением [14]:

$$\gamma_{\text{eff}} = (f_{es}\gamma_i + \delta_{fe}) / (1 - \delta_{fe}), \quad (5)$$

где γ_i – его коэффициент ионно-электронной эмиссии.

Условие поддержания слаботочного разряда в межэлектродном промежутке имеет вид [6]:

$$\alpha(E_d, T)d = \ln(1 + 1/\gamma_{\text{eff}}), \quad (6)$$

где $\alpha(E_d, T)$ – ионизационный коэффициент смеси аргона с парами ртути, равный среднему числу актов ионизации атомов электроном на единице длины разряда, который зависит от температуры и определяется предложенным в [24] выражением.

Уравнения (1)–(6) образуют систему, позволяющую рассчитать характеристики слаботочного разряда в смеси аргон–ртуть, в том числе и напряжение его поддержания U_d , при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, а также в ее отсутствие (когда $H_f = 0$ и $\delta_f = 0$).

Вычисления проводили для разрядного промежутка длиной $d = 2 \times 10^{-3}$ м, заполненного используемой в газоразрядных осветительных лампах смесью аргона с концентрацией $n_{\text{Ar}} = 6.57 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, соответствующей его давлению 266 Па при комнатной температуре, и насыщенных паров ртути, концентрация которых быстро растет с увеличением температуры [24]. Предполагали, что катод алюминиевый с монослоем оксида алюминия на поверхности (т.е. без диэлектрической пленки) или с диэлектрической пленкой Al_2O_3 толщиной $H_f = 15$ нм, поскольку, как показано в [25], в разряде не происходит пробой таких тонких пленок, обусловленный образованием в них электронных лавин. Использовали следующие параметры пленки [21, 26]: $\varphi_m = 4.25$ эВ, $\chi_d = 2.0$ эВ, $\varepsilon_f = 3$, $\Delta\varepsilon = 0.125$ эВ, $\lambda_e = 0.3$ нм, $m^* = m$, $\beta = 3.8$, $s_f = 10^{-3}$, $\gamma_i = 0.04$. Балластное сопротивление выбирали таким, чтобы плотность разрядного тока была порядка 10^{-5} А м^{-2} , т.е. разряд был слаботочным [6].

Рассчитанные зависимости характеристик разряда от температуры смеси приведены на рис. 1. Из него следует, что в случае разряда с катодом без диэлектрической пленки при понижении температуры от +30 до –30°C вследствие снижения концентрации ртути уменьшается ее вклад в ионизационный коэффициент смеси [24]. Поэтому напряженность электрического поля в раз-

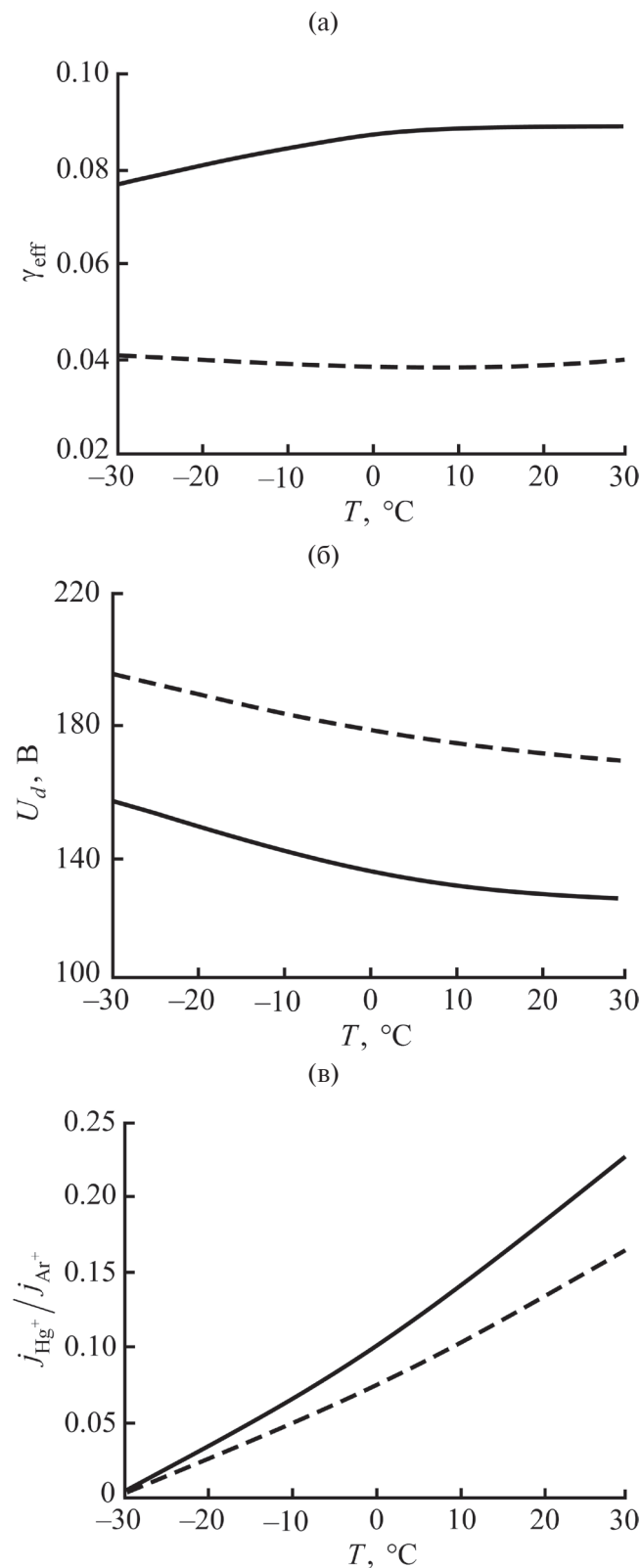


Рис. 1. Зависимость от температуры эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода (а), напряжения зажигания разряда (б) и отношения плотностей тока ионов ртути и аргона у катода (в). Сплошные линии соответствуют катоду с пленкой, а штриховые — без пленки.

рядном промежутке, необходимая для зажигания разряда, увеличивается, а плотность разрядного тока уменьшается. В результате возрастает напряжение на разрядном промежутке на ~ 30 В, что согласуется с экспериментальными результатами [27]. При температуре ниже -30°C характеристики разряда изменяются незначительно вследствие того, что содержание ртути в смеси становится пренебрежимо малым и разряд происходит в практически чистом аргоне. В случае диэлектрической пленки на катоде вклад в его эффективный коэффициент электронной эмиссии γ_{eff} наряду с ионно-электронной эмиссией дает также усиленная температурой полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, обусловленная существованием в ней сильного электрического поля. Поэтому величина γ_{eff} существенно превосходит ее значение в случае катода без пленки, и выполнение условия поддержания разряда (б) становится возможным при меньшем коэффициенте ионизации рабочего газа, т.е. при меньшей напряженности электрического поля в нем, а следовательно, и при меньшем напряжении U_d . Как видно из рис. 1, уменьшение U_d , обусловленное наличием полевой электронной эмиссии из подложки катода, при низких температурах составляет величину порядка 40 В, что облегчает зажигание разряда в лампе в таких условиях.

Ионы, образующиеся в разрядном объеме, под действием поля двигаются к катоду, сталкиваясь с атомами рабочей газовой смеси. При столкновении иона с атомом собственного газа может происходить резонансная перезарядка иона на атоме. В результате возникают медленный ион (его скорость составляет доли электрон-вольта, и ее можно считать равной нулю) и быстрый атом, энергия которого равна энергии иона в момент перезарядки. Кроме перезарядки может происходить упругое рассеяние ионов и быстрых атомов на медленных атомах, в результате которого они теряют часть энергии, а медленные атомы становятся быстрыми, т.е. в результате каждого упругого столкновения образуется новый быстрый атом. Так как относительное содержание ртути в колбе лампы при температуре порядка комнатной обычно мало [24], необходимо учитывать только столкновения ионов и быстрых атомов с атомами аргона. Следовательно, можно считать, что катод бомбардируют ионы аргона и ртути, а также быстрые атомы аргона. Их распределения по энергии у поверхности катода могут быть найдены с использованием предложенной в [28] методики, основанной на применении метода Монте-Карло для расчета движения ионов и атомов в смеси

аргон—ртуть. Результаты, полученные при $+30^\circ\text{C}$, представлены на рис. 2. Видно, что в случае катода с диэлектрической пленкой энергетические спектры бомбардирующих катод частиц смещаются в область меньших значений энергии вследствие более низкого напряжения поддержания разряда, обуславливающего меньшую напряженность электрического поля в разрядном промежутке. Вычисленные с использованием полученных энергетических распределений температурные зависимости эффективных (усредненных по энергии) коэффициентов распыления [29–32] поверхности катода без пленки и с пленкой ионами ртути и быстрыми атомами аргона, образующимися при упругих столкновениях ионов ртути с медленными атомами аргона, которые вносят наибольшие вклады в распыление катода [28],

изображены на рис. 3. Температурные зависимости плотности потока j_s атомов материала катода, распыляемых с его поверхности в разряде при отсутствии и наличии диэлектрической пленки, приведены на рис. 4. Из него следует, что интенсивность распыления катода в разряде в смеси аргона с парами ртути растет с увеличением температуры от -30 до 0°C из-за увеличения содержания ртути в смеси и обусловленного этим возрастания у катода плотности потоков ионов ртути, а также создаваемых ими быстрых атомов аргона. При дальнейшем увеличении температуры начинается снижение j_s , обусловленное уменьшением длины резонансной перезарядки ионов ртути и, следовательно, их энергии. Наличие на катоде диэлектрической пленки из-за улучшения

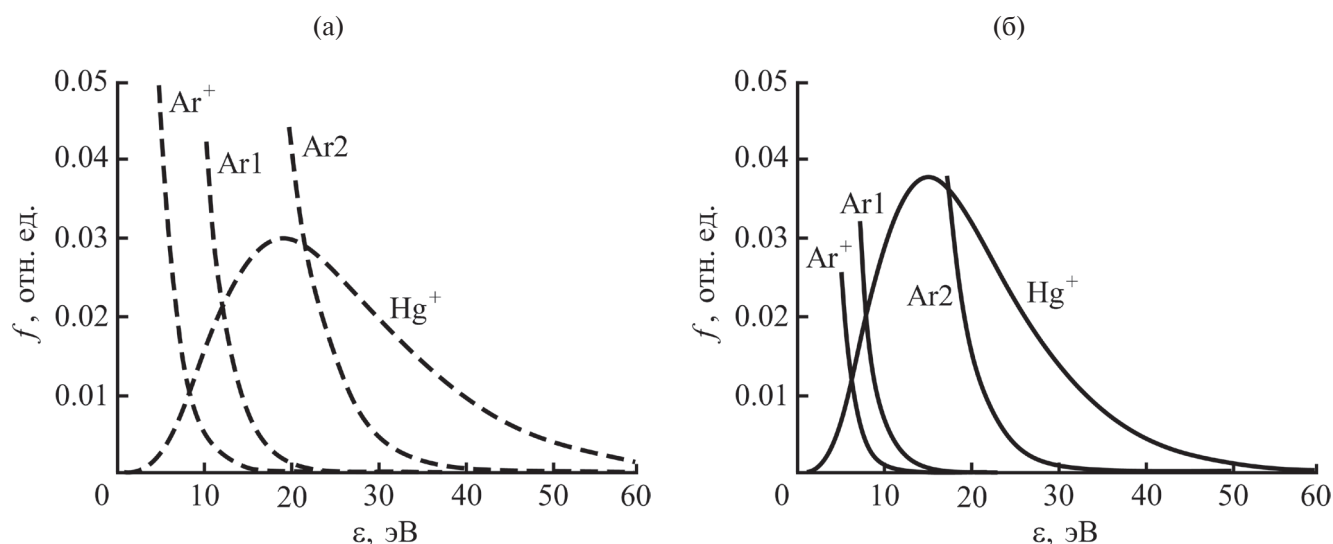


Рис. 2. Энергетические распределения у катода потоков ионов аргона (Ar^+) и ртути (Hg^+), а также быстрых атомов аргона, возникающих при упругом рассеянии ионов аргона и ртути на медленных атомах аргона (Ar1) и (Ar2) в отсутствие на катоде диэлектрической пленки (а) и при ее наличии (б).

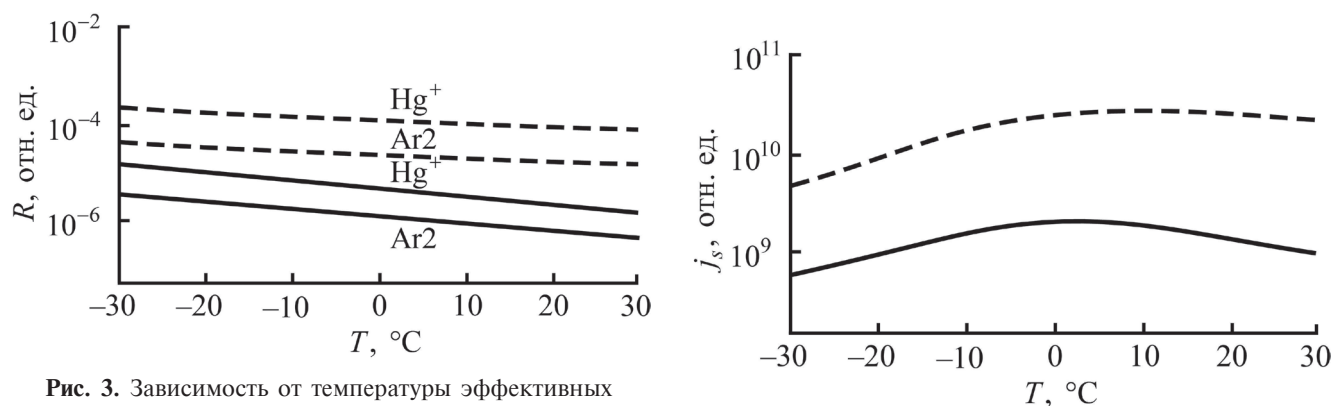


Рис. 3. Зависимость от температуры эффективных коэффициентов распыления алюминиевого катода ионами ртути (Hg^+) и быстрыми атомами аргона, возникающими при упругом рассеянии ионов ртути на атомах аргона (Ar2). Сплошные линии соответствуют катоду с пленкой, а штриховые — без пленки.

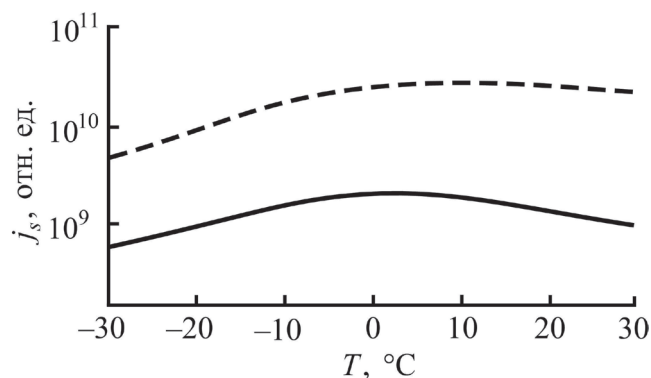


Рис. 4. Зависимость от температуры плотности потока распыленных с катода атомов. Сплошная линия соответствует катоду с пленкой, а штриховая — без пленки.

его эмиссионных свойств приводит к снижению напряженности электрического поля в разряде и к уменьшению энергии бомбардирующих катод частиц. Существенное отличие плотностей потоков распыленного вещества при наличии на катоде диэлектрической пленки и в ее отсутствие объясняется тем, что лишь небольшая доля ионов и быстрых атомов, бомбардирующих поверхность катода, имеет энергию, превышающую его пороговую энергию распыления. Поэтому при снижении энергии ионов и атомов на несколько электрон-вольт она становится намного меньше, что приводит к значительному уменьшению суммарного эффективного коэффициента распыления катода и, следовательно, интенсивности его распыления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель слаботочного газового разряда в смеси аргона и паров ртути, используемой в осветительных лампах, при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки. Она учитывает кроме ионно-электронной эмиссии с поверхности катода также усиленную температурой полевую эмиссию электронов из металлической подложки катода в пленку под действием сильного электрического поля, которое возникает в ней в разряде. Рассчитаны зависимости характеристик разряда от температуры, и показано, что вследствие быстрого уменьшения концентрации паров ртути в смеси при снижении температуры, обуславливающим уменьшение ее ионизационного коэффициента, увеличиваются напряженность электрического поля в разрядном промежутке и разрядное напряжение. Наличие же на катоде диэлектрической пленки приводит к улучшению его эмиссионных свойств и существенному уменьшению разрядного напряжения. Найдено распределение по энергии ионов и быстрых атомов у поверхности катода, и показано, что наличие на нем тонкой диэлектрической пленки может приводить к заметному снижению энергии бомбардирующих его частиц и, следовательно, к увеличению долговечности катода в газоразрядном приборе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Научно-исследовательского университета “Высшая школа экономики”.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атаев А.Е.* Зажигание ртутных разрядных источников излучения высокого давления. М.: Изд-во МЭИ, 1995. 168 с.
2. *Zissis G., Kitsinelis S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. № 17. P. 173001.
<http://doi.org/10.1088/0022-3727/42/17/173001>
3. *Langer R., Garner R., Paul I., Horn S., Tidecks R.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2016. V. 76. № 1. P. 10802.
<http://doi.org/10.1051/epjap/2016160277>
4. *Phelps A.V., Petrović Z.L.* // Plasma Sources Sci. Tech. 1999. V. 8. № 3. P. R21.
<http://doi.org/10.1088/0963-0252/8/3/201>
5. *Lay B., Moss R.S., Rauf S., Kushner M.J.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. № 1. P. 8.
<http://doi.org/10.1088/0963-0252/12/1/302>
6. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
7. *Saifutdinov A.I.* // Plasma Sources Sci. Tech. 2022. V. 31. № 9. P. 094008.
<http://doi.org/10.1088/1361-6595/ac89a7>
8. *Sakai Y., Sawada S., Tagashira H.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1989. V. 22. № 2. P. 282.
<http://doi.org/10.1088/0022-3727/22/2/007>
9. *Petrov G.M., Giuliani J.L.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 1. P. 62.
<http://doi.org/10.1063/1.1576895>
10. *Крестя В.И., Фишер М.Р.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 2. С. 298.
11. *Riedel M., Düsterhöft H., Nagel F.* // Vacuum. 2001. V. 61. № 2. P. 169.
[http://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00112-9](http://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00112-9)
12. *Гуморов К.М., Визгалов И.В., Маркина Е.А., Курнаев В.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 2. С. 208.
13. *Stamenković S.N., Marković V.Lj., Gocić S.R., Jovanović A.P.* // Vacuum. 2013. V. 89. P. 62.
<http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.09.010>
14. *Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I.* // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188.
<http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.01.008>
15. *Hagelaar G.J.M., Kroesen G.M.W., Klein M.H.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 5. P. 2240.
<http://doi.org/10.1063/1.1287758>
16. *Capdeville H., Pédoussat C., Pitchford L.C.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. № 3. P. 1026.
<http://doi.org/10.1063/1.1430891>
17. *Ito T., Cappelli M.A.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. № 10. P. 101503.
<http://doi.org/10.1063/1.2711416>
18. *Sukhomlinov V.S., Mustafaev A.S., Murillo O.* // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 1. P. 013513.
<http://doi.org/10.1063/1.5017309>
19. *Крестя В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2016. № 4. С. 84.
<http://doi.org/10.7868/S0207352816040119>
20. *Бондаренко Г.Г., Крестя В.И., Савичкин Д.О.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 2. С. 129

21. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.
<http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.028>
22. Бондаренко Г.Г., Фишер М.Р., Мьо Ту Ха, Крестя В.И. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 1. С. 72.
23. Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Bondarev V. // High Temperature Material Proc. 2022. V. 26. № 1. P. 17.
<http://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2021041820>
24. Бондаренко Г.Г., Дубинина М.С., Фишер М.Р., Крестя В.И. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 12. С. 48.
25. Зыкова Е.В., Кучеренко Е.Т., Айвазов В.Я. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 7. С. 1464.
26. Suzuki M., Sagawa M., Kusunoki T., Nishimura E., Ikeda M., Tsuji K. // IEEE Trans. ED. 2012. V. 59. P. 2256.
<http://doi.org/10.1109/TED.2012.2197625>
27. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977. 344 с.
28. Савичкин Д.О., Крестя В.И. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2019. № 2. С. 107.
<http://doi.org/10.1134/S0207352819020112>
29. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 1 / Ред. Бериш Р. М.: Мир, 1984. 336 с.
30. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2. / Ред. Бериш Р. М.: Мир, 1986. 488 с.
31. Hine K., Yoshimura S., Ikuse K., Kiuchi M., Hashimoto J., Terauchi M., Nishitani M., Hamaguchi S. // Jpn. J. Appl. Phys. 2007. V. 46. № 12L. P. L1132.
<http://doi.org/10.1143/JJAP.46.L1132>
32. Yoshimura S., Hine K., Kiuchi M., Hashimoto J., Terauchi M., Honda Y., Nishitani M., Hamaguchi S. // Jpn. J. Appl. Phys. 2012. V. 51. № 8S1. P. 08HB02.
<http://doi.org/10.1143/JJAP.51.08HB02>

Modeling of the Influence of Field Electron Emission from a Cathode with a Thin Insulating Film on its Sputtering in a Gas Discharge in a Mixture of Argon and Mercury Vapor

G. G. Bondarenko^{1, *}, V. I. Kristya^{2, **}, D. O. Savichkin³, M. R. Fisher²

¹HSE University, Moscow, 101000 Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000 Russia

³Top Systems Ltd, Moscow, 127055 Russia

*e-mail: gbondarenko@hse.ru

**e-mail: kristya@bmstu.ru

A model of the low-current gas discharge in a mixture of argon and mercury vapor in the presence of a thin insulating film on the cathode surface is proposed. The model takes into account that in such a mixture a substantial contribution to the ionization of the working gas can come from the ionization of mercury atoms during their collisions with metastable excited argon atoms. In the discharge, positive charges accumulate on the film surface, creating an electric field in the film sufficient to cause field emission of electrons from the cathode metal substrate into the insulator. Such electrons are accelerated in the film by the field and can escape from it into the discharge volume. As a result, the effective yield of ion-electron emission from the cathode increases. The temperature dependences of discharge characteristics are calculated and it is shown that, due to a rapid decrease in the concentration of mercury vapor in the mixture with decreasing temperature, the electric field strength in the discharge gap and the discharge voltage increase. The presence of a thin insulating film on the cathode can result in an improvement in its emission characteristics and a significant reduction in the discharge voltage. This causes a decrease in the energies of the ions and atoms bombarding the cathode surface, and, consequently, in the intensity of cathode sputtering in the discharge.

Keywords: low-current gas discharge, insulating film on the cathode, ion-electron emission, field electron emission, film emission efficiency, cathode effective electron emission yield.