

Введение

Одним из типов газоразрядных приборов являются ртутные осветительные лампы, в которых в качестве рабочего газа используется смесь аргона с фиксированной концентрацией и паров ртути, концентрация которых зависит от температуры T . Важной характеристикой таких ламп является напряжение зажигания разряда U_d , при котором происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и возникает разряд [1, 2]. Уменьшение U_d приводит к снижению энергоёмкости прибора, а также к увеличению его долговечности. Величина U_d 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 Пеннинга) [1, 3]. Если на поверхности катода газоразрядного прибора имеются тонкие диэлектрические пленки, то в разряде на их поверхности 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 к внешней поверхности диэлектрика и могут выходить в разрядный объем, улучшая эмиссионные характеристики катода. Процессы переноса основных типов частиц и их вклады в распыление катода для разряда в смеси аргон-ртуть с зависящим от температуры содержанием ртути изучались ранее в [4] для случая металлического катода без диэлектрических пленок. Влияние же полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку на его эмиссионные свойства и характеристики разряда изучалось в [5] лишь для разрядов в инертных газах. В данной работе сформулирована модель слаботочного газового разряда в смеси аргон-ртуть при наличии на металлическом катоде тонкой диэлектрической пленки.

Модель

Пусть к разрядному промежутку длины d между плоскими металлическим катодом, на поверхности которого имеется тонкая диэлектрическая оксидная плёнка толщиной H_f , и анодом приложено напряжение, достаточное для возникновения слаботочного газового разряда. В разряде происходит бомбардировка поверхности катода ионами, в результате чего на пленке накапливаются положительные заряды, создающие в ней электрическое поле. Когда его напряжённость E_f достигает величины порядка $10^8 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, начинается полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в плёнку, макроскопическая плотность тока которой равна [6]:

$$j_f H_t = \frac{a s_f E_f^2}{t^2 y_0 \varphi_m - \chi_d} \exp\left(-\frac{b v y_0}{E_f} \varphi_m - \chi_d^{3/2}\right) \frac{\pi k T / \varepsilon_d}{\sin \pi k T / \varepsilon_d}, \quad (1)$$

где H_t – длина туннелирования электрона с энергией вблизи уровня Ферми металла ε_F в плёнку, $v y_0 = 1 - y_0^2 + 1/3 y_0^2 \ln y_0$, $t y_0 = 1 + 1/9 y_0^2 (1 - \ln y_0)$, $\varepsilon_d = \hbar e E_f / 2 \sqrt{2 m \varphi_m - \chi_d} t y_0$, $y_0 = c \sqrt{E_f} / \varphi_m - \chi_d$, φ_m и χ_d – работа выхода подложки и электронное сродство материала плёнки, а напряжённость электрического поля E_f в плёнке может быть найдена из условия равенства макроскопической плотности тока полевой электронной эмиссии и плотности разрядного тока $j_f H_t = j$.

Некоторая доля электронов δ_f выходит из пленки в разряд, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , причем величина δ_f определяется выражением [6]:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} r \varepsilon_{en} \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n}, \quad (2)$$

где $r \varepsilon_{en} = \frac{\sin \pi k T / \varepsilon_d}{\pi} \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right) \ln\left(1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right)\right) + I \varepsilon_{en} \right]$, $I \varepsilon_{en} = \int_0^{t_m \varepsilon_{en}} \frac{t^{kT/\varepsilon_d - 1}}{t + 1} dt$, $t_m \varepsilon_{en} = \exp(-\varepsilon_{en}/kT)$, $\varepsilon_{en} = e E_f H_f - \varphi_m - n \Delta \varepsilon$, $H_0 = H_f - H_t$, $\Delta \varepsilon$ – энергия, теряемая электроном при столкновении с фоном, λ_e – средняя длина пробега электрона в пленке между столкновениями в направлении, перпендикулярном к поверхности катода.

В газовом разряде существенная часть электронов, эмиттируемых с поверхности катода, возвращается к нему вследствие рассеяния на атомах рабочего газа, а в разрядный объем уходит лишь их доля f_{es} . В результате, эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} определяется выражением [5]:

$$\gamma_{eff} = f_{es} \gamma_i + \delta_{fe} / (1 - \delta_{fe}), \quad (3)$$

где γ_i – его коэффициент ионно-электронной эмиссии, а условие поддержания слаботочного разряда в межэлектродном промежутке имеет вид [1]:

$$\alpha E_d T d = \ln(1 + 1/\gamma_{eff}), \quad (4)$$

где $\alpha E_d T$ – ионизационный коэффициент смеси аргона с парами ртути, равный среднему числу ионизаций атомов электроном на единице длины разряда, который зависит от температуры и определяется предложенным в [7] выражением.

Уравнения (1) – (4) 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 плёнки, а также при её отсутствии (когда $H_f = 0$ и $\delta_f = 0$).

Результаты

Вычисления проводились для разрядного промежутка, заполненного используемой в газоразрядных осветительных лампах смесью аргона с концентрацией, соответствующей его давлению 266 Па при комнатной температуре, и насыщенных паров ртути, концентрация которых быстро растёт с увеличением температуры T [7]. Предполагалось, что катод является алюминиевым с монослоем оксида алюминия на поверхности (т.е. без диэлектрической пленки) или с диэлектрической плёнкой Al_2O_3 толщиной $H_f = 15 \text{ нм}$ [6].

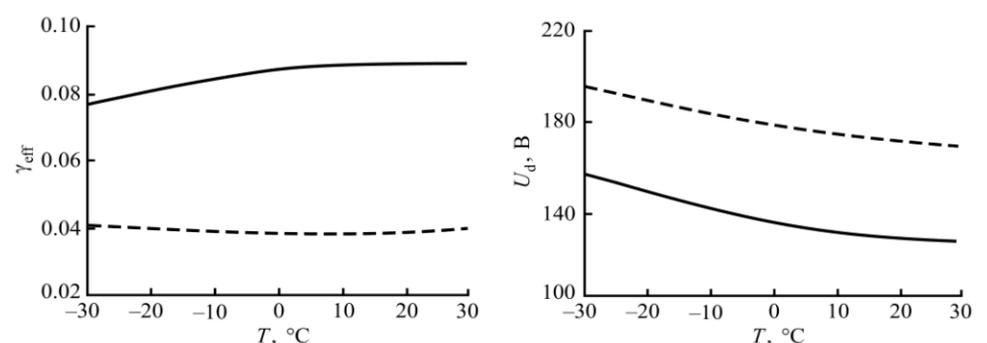


Рис. 1

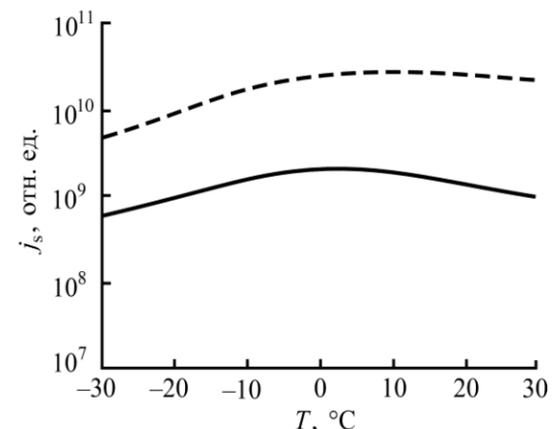


Рис. 2

Рассчитанные зависимости характеристик разряда от температуры смеси приведены на Рис. 1, где сплошные линии соответствуют катоду с пленкой, а штриховые – без пленки. Из него следует, что в случае разряда с катодом без диэлектрической плёнки при понижении температуры с +30 °С до –30 °С, вследствие снижения концентрации ртути, происходит уменьшение её вклада в ионизационный коэффициент смеси [7]. Поэтому напряжённость электрического поля в разрядном промежутке, необходимая для зажигания разряда, увеличивается. В результате, происходит возрастание напряжения на разрядном промежутке на величину около 30 В, что согласуется с экспериментальными результатами. В случае наличия на катоде диэлектрической плёнки вклад в его эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии γ_{eff} даёт полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в диэлектрическую плёнку, обусловленная существованием в ней сильного электрического поля. Поэтому величина γ_{eff} существенно превосходит её значение для катода без плёнки и выполнение условия поддержания разряда становится возможным при меньшем напряжении U_d . Ионы, образующиеся в разрядном объеме, под действием поля двигаются к катоду, сталкиваясь с атомами рабочей газовой смеси. Их распределения по энергии у поверхности катода в смеси аргон-ртуть могут быть найдены с использованием метода Монте-Карло. Найденные температурные зависимости плотности потока j_s атомов материала катода, распыляемых с его поверхности в разряде при отсутствии и наличии диэлектрической плёнки, приведены на Рис. 2. Из него видно, что наличие на катоде диэлектрической плёнки приводит, из-за улучшения его эмиссионных свойств, к снижению напряжённости электрического поля в разряде, к уменьшению энергий бомбардирующих катод частиц и к значительному уменьшению интенсивности его распыления.

Литература

[1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. 691 с.
[2] Zissis G., Kitsinelis S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 173001.
[3] Бондаренко Г.Г., Фишер М.Р., Кристья В.И. // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 2. С. 197.
[4] Кристья В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р. // Поверхность. 2016. № 4. С. 84.

[5] Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.
[6] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Bondariev V. // High Temperature Material Proc. 2022. V. 26. №. 1. P. 17.
[7] Бондаренко Г.Г., Дубинина М.С., Фишер М.Р., Кристья В.И. // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60. №12. С. 48.