ФВЗЧК-2025

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАТОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ И ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ АРГОНА И ПАРОВ РТУТИ

## Г.Г. Бондаренко<sup>1)</sup>, В.И. Кристя<sup>2)\*</sup>, Д.О. Савичкин<sup>3)</sup>, М.Р. Фишер<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

<sup>2)</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

3) ЗАО «Топ Системы», Москва, Россия

\***e-mail:** kristya@bmstu.ru

Результаты

## Введение

Одним из типов газоразрядных приборов являются ртутные осветительные лампы, в которых рабочий газ представляет собой смесь аргона с фиксированной концентрацией и паров ртути, концентрация которых возрастает с увеличением температуры. После подачи напряжения на электроды лампы в межэлектродном промежутке происходит пробой газа и возникает тлеющий разряд. Через некоторое время после зажигания разряда температура катода достигает значений, при которых возможна термическая электронная эмиссия, и разряд переходит в дуговую форму [1, 2]. Срок службы газоразрядных приборов определяется процессом распыления катода приходящими из разряда ионами и быстрыми атомами до перехода разряда в дуговой. Для уменьшения напряжения поддержания тлеющего разряда в газоразрядных приборах на поверхности их электродов часто формируют тонкие диэлектрические пленки толщиной  $H_f$  [3]. В разряде на электроде, выполняющем функции катода, на поверхности пленки накапливаются положительные заряды, что приводит к возникновению в ней электрического поля с напряженностью E<sub>i</sub>, достаточной для появления усиленной температурой полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в пленку, и к увеличению его эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии у<sub>eff</sub>. Процессы переноса частиц у поверхности катода, а также влияние эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку на его эмиссионные свойства и характеристики разряда ранее изучались только для слаботочного газового разряда в смеси аргон-ртуть [4]. В данной работе формулирована модель катодного слоя тлеющего газового разряда в смеси аргона и паров ртути при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки. Рассчитаны зависимости характеристик катодного слоя разряда от температуры в интервале ее изменения, в котором влияние ионизации атомов ртути метастабильными возбужденными атомами аргона, т.е. реакции Пеннинга, на величину ионизационного коэффициента смеси максимально.

## Модель

Пусть на плоском металлическом катоде газоразрядного прибора, нагретом в тлеющем разряде до температуры T, находится тонкая диэлектрическая пленка толщиной  $H_f$ . Напряженность электрического поля E в катодном слое тлеющего разряда линейно убывает с удалением от катода [1]. Поэтому, если считать, что координата z направлена перпендикулярно поверхности катода, находящейся в плоскости z = 0, а граница катодного слоя разряда совпадает с плоскостью  $z = d_c$ , его уравнения можно записать в виде [5]:

$$\int_{0}^{a_{c}} \alpha E z dz = \ln 1 + 1/\gamma_{eff} , j_{i}/p^{2} = KU_{c}^{3/2}/pd_{c}^{5/2},$$

$$j = 1 + \gamma_{eff} j_{i}, U_{c} + U_{f} + RSj = U_{0},$$
(1)

где j – плотность разрядного тока,  $j_i$  – плотность ионного тока у поверхности катода,  $U_c$  и  $U_f = E_f H_f$  – падение напряжения на катодном слое разряда и на диэлектрической пленке,  $\alpha(E(z))$  – ионизационный коэффициент рабочего газа,  $E(z) = E_c(1 - z/d_c)$  – распределение напряженности электрического поля в катодном слое разряда,  $E_c = 2U_c/d_c$  – напряженность электрического поля у катода, S – площадь поверхности катода, занятой разрядом, R – величина балластного сопротивления в разрядной цепи,  $U_0$  – приложенное к разрядной цепи внешнее напряжение, от которого зависит плотность разрядного тока,  $K = 4\varepsilon_0(ep\lambda_c/M_i)^{1/2}$ , p – давление рабочего газа, e – величина заряда электрона,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

В разряде происходит бомбардировка поверхности катода ионами, в результате чего на диэлектрической пленке накапливаются положительные заряды, создающие в пленке электрическое поле. Когда его напряженность достигает величины порядка 10<sup>9</sup> В·м<sup>-1</sup>, начинается усиленная температурой полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку, плотность тока которой определяется выражением [6]:

$$i_{\rm f} \quad H_{\rm t} = \frac{aE_{\rm f}^2}{t^2 y_0 \quad \varphi_{\rm m} - \chi_{\rm d}} \exp\left(-\frac{bv \quad y_0}{E_{\rm f}} \quad \varphi_{\rm m} - \chi_{\rm d}^{-3/2}\right) \frac{\pi kT/\varepsilon_{\rm d}}{\sin \ \pi kT/\varepsilon_{\rm d}},\tag{2}$$

где  $H_t$  – длина туннелирования электрона с энергией вблизи уровня Ферми  $\varepsilon_F$  металла в пленку,  $v y_0 = 1 - y_0^2 + 1/3 y_0^2 \ln y_0$ ,  $t y_0 = 1 + 1/9 y_0^2 1 - \ln y_0$ ,  $y_0 = cE_f^{1/2} / \varphi_m - \chi_d$ ,  $\varepsilon_d = \hbar eE_f / (2(2m(\varphi_m - \chi_d))^{1/2} t(y_0))$ ,  $a = 1.541 \times 10^{-6}$  А·эВ·В<sup>-2</sup>,  $b = 6.831 \times 10^9$  В·м<sup>-1</sup>·эВ<sup>-3/2</sup>,  $c = 3.795 \times 10^{-5}$  эВ·м<sup>1/2</sup>·В<sup>-1/2</sup>,  $\hbar = h/2\pi$ , h – постоянная Планка,  $\varphi_m$  и  $\chi_d$  – работа выхода подложки и электронное сродство материала пленки, m – масса электрона,  $E_f = U_f \varepsilon_f H_f$  – напряженность электрического поля в пленке,  $\varepsilon_f$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки.

Величина напряженности электрического поля в пленке E<sub>f</sub> может быть найдена из усло-

Вычисления проводили для разрядного промежутка, заполненного смесью аргона с концентрацией  $n_{\rm Ar} = 6.57 \times 10^{23} \, {\rm m}^{-3}$ , соответствующей его давлению 2660 Па при комнатной температуре, и насыщенных паров ртути, концентрация которых быстро растет с увеличением температуры *T*. В частности, в рассматриваемом в данной работе интервале изменения температуры рабочего газа от 240 К до 400 К, в котором вклад реакции Пеннинга в ионизационный коэффициент смеси максимален [7], относительная концентрация ртути изменяется от  $4 \times 10^{-7}$  до  $4 \times 10^{-2}$ . При этом для вычисления значений ионизационного коэффициента  $\alpha = \alpha (E/n, T)$  использовали предложенную в [7] зависимость. Предполагали, что катод является алюминиевым с монослоем оксида алюминия на поверхности (т.е. без диэлектрической пленки) или с диэлектрической пленкой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной  $H_{\rm f} = 6$  нм.



Рассчитанные зависимости характеристик катодного слоя разряда от температуры при наличии диэлектрической пленки на катоде и при ее отсутствии смеси приведены на рис. 1 сплошными и штриховыми линиями, соответственно . Из него следует, что в случае разряда с катодом без диэлектрической пленки, т.е. когда  $\gamma_{eff} = \gamma_i$ , при повышении температуры с 240 К до 320 К и до достижения относительного содержания ртути в смеси порядка  $5 \times 10^{-3}$ , происходит уменьшение напряженности электрического поля у катода, а следовательно и в катодном слое разряда, обусловленное увеличением ионизационного коэффициента смеси (что согласуется с результатами [7]). При дальнейшем же повышении температуры, из-за снижения вклада в ионизационный коэффициент смеси реакции Пеннинга, он начинает уменьшаться, что приводит к увеличению напряженности электрического поля E<sub>c</sub> и к уменьшению плотности разрядного тока *j*, сопровождающемуся увеличением катодного падения напряжения U<sub>c</sub>. В случае наличия на катоде диэлектрической пленки вклад в  $\gamma_{\rm eff}$ , наряду с ионно-электронной эмиссией, дает также усиленная температурой полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в диэлектрическую пленку, возникающая из-за существования в ней сильного электрического поля  $E_{\rm f}$ . В результате, при повышении температуры с 240 К до 320 К происходит уменьшение эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии у<sub>eff</sub> катода, обусловленное снижением напряженности электрического поля  $E_{\rm f}$  в пленке из-за уменьшения плотности разрядного тока j (что следует из соотношения (3)). Это приводит к меньшему снижению напряженности электрического поля в катодном слое разряда, чем в случае катода без пленки. Величина у<sub>еff</sub> для катода с пленкой в несколько раз превышает ее значение для катода без пленки, что обусловливает существенно большую величину плотности разрядного тока.

Найденные с использованием рассчитанных методом Монте-Карло распределений по энергии бомбардирующих катод частиц плотности потока атомов материала катода, распыляемых с его поверхности в разряде, представлены на рис. 2. Из него видно, что реакция Пеннинга дает наибольший вклад в ионизацию рабочего газа при в интервале изменения.

вия равенства плотности тока усиленной температурой полевой электронной эмиссий в пленку и плотности разрядного тока: $j_f H_t = j.$ (3) Эмиттированные в пленку электроны ускоряются в ней электрическим полем и тормо-	температуры от 280 К до 360 К. В случае отсутствия на катоде диэлектрической пленки, когда основным механизмом эмиссии с катода электронов, необходимых для поддержания разряда, является ионно-электронная эмиссия, увеличение температуры до 320 К сопровож-
зятся при столкновениях с фононами. Когда они достигают внешней поверхности пленки, некоторая их доля $\delta_f$ , называемая эмиссионной эффективностью пленки [6], выходит из нее в разряд, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода $\gamma_{eff} = \gamma_i + \delta_f / 1 - \delta_f$ . (4) Уравнения (1)–(4) образуют систему, позволяющую рассчитать характеристики катодно- го слоя тлеющего разряда в смеси аргон–ртуть при наличии на катоде тонкой диэлектриче- ской пленки, а также при ее отсутствии (когда $H_f = 0$ и $\delta_f = 0$ ).	дается заметным снижением напряженности электрического поля у катода, что обусловли- вает уменьшение энергии бомбардирующих катод частиц и снижение интенсивности его распыления. При наличии же на катоде диэлектрической пленки, когда существенный вклад в $\gamma_{eff}$ дает усиленная температурой полевая электронная эмиссия из металлической подложки катода в пленку, при увеличении температуры с 280 К до 320 К происходит лишь незначительное уменьшение напряженности электрического поля у катода, что обусловли- вает более интенсивное распыление катода. Но происходит это лишь в течение времени порядка 0,1 сек [5], что обусловливает бо́льшую долговечность ламп с такими катодами.
Литература [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с. [2] Zissis G., Kitsinelis S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 173001. [3] Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. Р. 114. [4] Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Савичкин Д.О., Фишер М.Р. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2024. № 3. С. 81.	<ul> <li>[5] Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха, Фишер М.Р. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2022. № 8. С. 25.</li> <li>[6] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Bondariev V. // High Temperature Material Proc. 2022. V. 26. № 1. Р. 17.</li> <li>[7] Бондаренко Г.Г., Дубинина М.С., Фишер М.Р., Кристя В.И. // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 12. С. 48.</li> </ul>