

**Введение**

В приборах дугового разряда после их включения происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и сначала зажигается тлеющий разряд, в котором катодное падение напряжения  $U_c$  имеет величину порядка  $10^2$  В. 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 с катодным падением напряжения порядка  $10^1$  В [1, 2].

Эмиссионные свойства катода улучшаются, а переход тлеющего разряда в дуговой облегчается при наличии на поверхности катода оксидных включений. В разряде на пленке накапливаются положительные заряды, что приводит к возникновению в ней сильного электрического поля и к появлению полевой эмиссии электронов из металлической подложки катода в диэлектрик. Некоторая доля  $\delta_f$  таких электронов, величина которой называется эмиссионной эффективностью пленки, имеет энергии, достаточные для преодоления потенциального барьера на поверхности пленки, и выходит из нее, увеличивая эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода  $\gamma_{\text{eff}}$  и снижая  $U_c$ . При нагреве катода в разряде полевая электронная эмиссия из подложки катода в диэлектрическую пленку должна переходить в термополевую, а затем в термическую эмиссию. Эмиссионные свойства катодов с тонкими диэлектрическими пленками при их нагреве рассматривались в [3] в предположении постоянной толщины пленки вдоль всей рабочей поверхности катода. Исследования же характеристик катодов с диэлектрической пленкой переменной толщины в широком интервале изменения их температуры до настоящего времени не проводились.

В данной работе предложена модель тлеющего газового разряда при наличии на рабочей поверхности катода или на ее части диэлектрической пленки, толщина которой изменяется вдоль нее. Изучено влияние этого фактора на эмиссионные свойства катода в широком интервале изменения его температуры и на характеристики катодного слоя разряда.

**Модель**

Пусть на участках поверхности катода, характерные размеры которых равны  $L_k$ , толщина пленки равна  $H_{fk}$ , а суммарная доля поверхности катода с такой толщиной пленки равна  $\omega_k$ , где  $k = 1, 2, \dots, N$ , а  $N$  – количество различных значений толщины пленки. На участках же поверхности катода, характерные размеры которых равны  $L_0$ , пленка отсутствует, т.е.  $H_{f0} = 0$ , а суммарная доля поверхности катода без пленки равна  $\omega_0$ . При  $H_{fk} \ll L_k$  нарушение однородности распределения электрического поля может происходить только у границ участков с различной толщиной пленки, т.е. распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности катода можно считать кусочно-однородным. Если  $L_k$  существенно меньше длины  $\lambda_c$  перезарядки бомбардирующих катод ионов на атомах рабочего газа, т.е. при

$$H_{fk} \ll L_k \ll \lambda_c \ll d_c, \quad (1)$$

где  $d_c$  – длина катодного слоя разряда, то неоднородности распределений всех величин вдоль поверхности катода малы и сосредоточены тонким приповерхностным слоем толщиной  $L_k$ . Поэтому они слабо влияют на характеристики катодного слоя тлеющего разряда, которые могут быть найдены из его одномерной модели.

В разряде катод бомбардируется ионами, что приводит к накоплению на внешней поверхности участков пленки толщиной  $H_{fk}$  положительного заряда, создающего в пленке электрическое поле с напряженностью  $E_{fk}$ . Когда она достигает величины порядка  $10^9$  В·м<sup>-1</sup>, начинается туннелирование электронов через потенциальный барьер на границе металл-диэлектрик [3, 4]. При этом для участков поверхности катода, на которых находится диэлектрическая пленка, макроскопическая (усредненная по поверхности  $k$ -го участка катода) плотность тока  $j_{fk}$  термополевой электронной эмиссии из подложки катода в зону проводимости диэлектрика, эмиссионная эффективность пленки  $\delta_{fk}$  на  $k$ -ом участке катода и плотность тока  $j_{ek}$  электронов, выходящих из него в разряд, определяются соотношениями:

$$j_{fk}(H_{fk}) = \frac{4\pi e m_e^* k_b T}{h^3} [I_1(\epsilon_{fk}) + I_2(\epsilon_{fk})], \quad \delta_{fk} = 1 - \exp\left(-\frac{H_{0k}}{\lambda_{ek}}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_{0k}^n}{n! \lambda_{ek}^n} \frac{B_n(E_{fk}, T)}{A(E_{fk}, T)}, \quad (2)$$

$$j_{ek} = j_e(H_{fk}) = \delta_{fk} j_{fk}(H_{fk}),$$

причем выражения для входящих в них функций приведены в [4]. Здесь  $T$  – температура катода,  $\epsilon_{fk} = \epsilon_f + \phi_m - \chi_d - (k_e e^3 E_{fk} / 2)^{1/2}$ ,  $H_{0k} = H_{fk} - H_{uk}$ ,  $H_{uk}$  – длина туннелирования электронов через барьер на границе подложки с пленкой,  $\lambda_{ek}$  и  $\Delta\epsilon$  – средняя длина пробега электрона в диэлектрической пленке между его столкновениями с фононами и теряемая при таком столкновении энергия,  $\epsilon_f$  и  $\phi_m$  – энергия Ферми и работа выхода материала подложки,  $\chi_d$  и  $\epsilon_f$  – электронное сродство и высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки.

В результате возрастает эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии  $k$ -го участка катода, который равен [3]:

$$\gamma_{\text{eff}k} = (\gamma_{ie} + \delta_{fek}) / (1 - \delta_{fek}), \quad (3)$$

где  $\delta_{fek} = f_{es} \delta_{fk}$ ,  $\gamma_{ie} = f_{es} \gamma_i$ .

Напряженность электрического поля  $E_{fk}$  в участке пленки толщиной  $H_{fk}$  в установившемся режиме разряда может быть найдена из условия равенства плотности разрядного тока у его поверхности и плотности тока термополевой электронной эмиссии из металлической подложки катода в пленку [3].

Возле участков поверхности катода без диэлектрической пленки напряженность электрического поля на несколько порядков меньше напряженности поля в пленке. Поэтому с таких участков, кроме ионно-электронной эмиссии, может происходить только термическая эмиссия при достаточно высокой температуре катода, плотность тока которой определяется выражением [4]:

$$j_{f0} = \frac{4\pi e m_s f (k_b T)^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\phi_m - \chi_d - \sqrt{k_e^3 E_c}}{k_b T}\right), \quad (4)$$

и так как все электроны, эмитируемые с таких участков катода, покидают его поверхность, можно считать, что  $j_{e0} = j_{f0}$  и  $\gamma_{\text{eff}0} = f_{es} \gamma_i + f_{es} j_{f0} / j_i$ .

Если все тепло, выделяемое при протекании тока в катодном слое разряда, поглощается катодом, а температура  $T$  во всем его объеме  $V$  одинакова, уравнение теплового баланса катода, определяющее зависимость  $T$  от времени  $t$ , имеет вид:

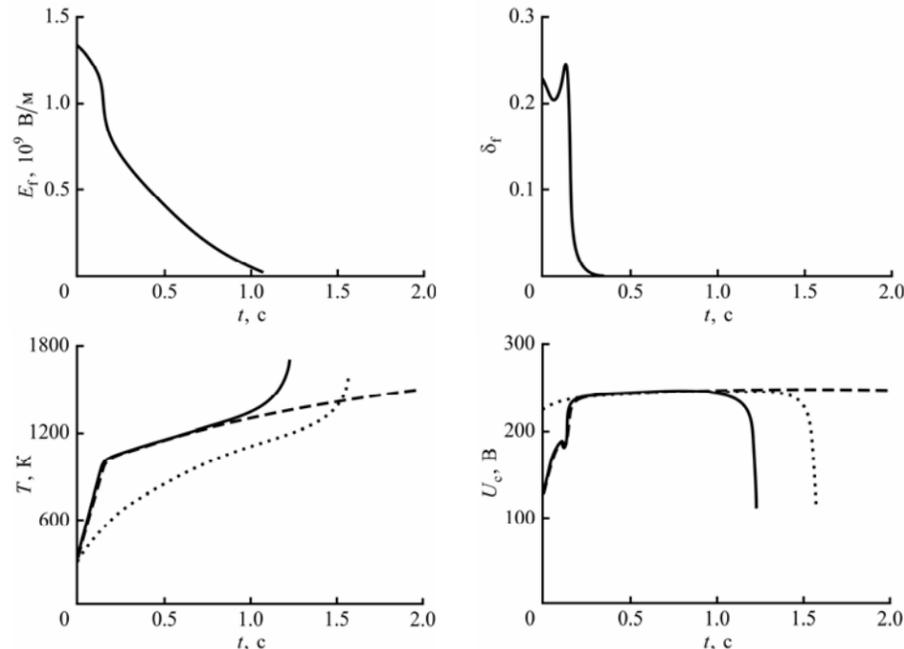
$$cV\rho \frac{dT}{dt} = j_i S [(1 + \gamma_{\text{eff}}) U_c + U_i - (1 + \gamma_{\text{eff}}) \phi_m] - 9\sigma T^4 S, \quad (5)$$

причем  $T(0) = T_0$ ,  $U_i$  – потенциал ионизации атома рабочего газа,  $c$ ,  $\rho$  и  $\vartheta$  – теплоемкость, плотность и излучательная способность материала катода,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Соотношения (2)–(5) вместе с уравнениями ми катодного слоя разряда [1] определяют эмиссионные свойства катода и характеристики катодного слоя тлеющего разряда при наличии на части поверхности катода тонкой диэлектрической пленки переменной толщины и позволяют оценить влияние термополевой и термической электронной эмиссии на нагрев катода в разряде.

**Результаты**

Вычисления проводили для разряда в аргоне при  $p = 2660$  Па,  $T_0 = 300$  К с цилиндрическим вольфрамовым катодом диаметром 2.8 мм и длиной 3.5 мм с диэлектрической пленкой оксида алюминия на всей рабочей поверхности катода, имеющей 4 разных значения толщины  $H_{fk}$ , равных 3, 4, 5 и 6 нм, на различных ее участках, а также при отсутствии диэлектрической пленки на части поверхности катода, т.е. при значениях ее толщины  $H_{fk}$ , равных 0, 4, 5 и 6 нм, где  $k = 1, 2, 3, 4$ . При этом суммарные доли поверхности катода с каждым значением толщины пленки считали одинаковыми, т.е.  $\omega_k = 0.25$ . Проведены также расчеты для разряда с катодом без диэлектрической пленки (при  $H_f = 0$  и  $\omega = 1$ ).



На рисунке приведены зависимости  $E_f$ ,  $\delta_f$ ,  $T$  и  $U_c$  от времени  $t$  горения разряда, рассчитанные при отсутствии диэлектрической пленки на части поверхности катода (сплошные линии), при наличии диэлектрической пленки на всей поверхности катода (штриховые линии), и при отсутствии диэлектрической пленки на всей поверхности катода (пунктирные линии). Из него следует, что после зажигания тлеющего разряда, кроме ионно-электронной эмиссии со всей рабочей поверхности катода, на участках его поверхности с диэлектрической пленкой происходит также полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку, обусловленная возникновением в ней сильного электрического поля. Часть этих электронов, равная эмиссионной эффективности участков пленки, может выходить из них и вносить вклад в эффективный коэффициент электронной эмиссии катода. С участков же катода без пленки полевая электронная эмиссия не происходит, так как напряженность электрического поля у катода в разряде на несколько порядков меньше, чем в диэлектрической пленке. С течением времени, в результате нагрева катода потоком тепла из разряда, его температура увеличивается, и полевая эмиссия электронов из подложки катода в пленку переходит в термополевую [4]. В результате, напряженность электрического поля в пленке, необходимая для обеспечения нужной для поддержания разряда плотности электронного тока из подложки катода в пленку, начинает уменьшаться, что приводит к быстрому снижению эмиссионной эффективности пленки, к уменьшению эффективного коэффициента электронной эмиссии катода и плотности разрядного тока. Поэтому нагрев катода замедляется, и в случае, когда диэлектрическая пленка имеется на всей поверхности катода, разряд не переходит в дуговой в течение большого промежутка времени. Если же на части поверхности катода диэлектрическая пленка отсутствует, то после нагрева катода до достаточно высокой температуры с нее начинается термическая эмиссия электронов, которые увеличивают эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода и плотности разрядного тока. Это обуславливает достаточно быстрый переход разряда в дуговой режим, что согласуется с результатами работ [5, 6]. При отсутствии же пленки на всей поверхности катода, вследствие меньшей величины его эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии и более низкой плотности разрядного тока катод нагревается медленнее, чем в случае наличия на части его поверхности диэлектрической пленки, и переход разряда в дугу происходит позже.

**Литература**

[1] Раїзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2009. 736 с.  
[2] Hadrath S., Beck M., Garner R.C., Lieder G., Ehlbeck J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. № 1. P. 163.  
[3] Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.

[4] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Bondariev V. // High Temperature Material Proc. 2022. V. 26. № 1. P. 17.  
[5] Guile A.E., Hitchcock A.H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975. V. 8. № 6. P. 663.  
[6] Puchkarev V.A., Mesyats G.A. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 9. P. 5633.