

Введение

В газоразрядных приборах, таких как газовые лазеры, после их включения происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и возникает тлеющий разряд с катодным падением напряжения U_c порядка 10^2 вольт [1]. Величина U_c существенно зависит от эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , равного среднему числу электронов, которые эмитируются с его поверхности в расчете на один падающий на нее из разряда ион. Уменьшение U_c приводит к снижению энергоемкости прибора и к увеличению его долговечности вследствие уменьшения напряженности электрического поля в катодном слое разряда, а следовательно, энергий бомбардирующих катод частиц.

Один из способов увеличения γ_{eff} и уменьшения U_c состоит в формировании на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки. 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 δ_f таких электронов, величина которой называется эмиссионной эффективностью пленки [2], имеет энергии, достаточные для преодоления потенциального барьера на внешней поверхности пленки, и выходит из нее, увеличивая γ_{eff} и снижая U_c [3]. При нагреве катода в разряде полевая электронная эмиссия из подложки катода в диэлектрическую пленку должна переходить в термополевую эмиссию. Расчет эмиссионных свойств катодов с тонкими поверхностными диэлектрическими пленками производился ранее в работах [4, 5] лишь при их температуре порядка комнатной, когда вклад термополевого механизма электронной эмиссии достаточно мал.

В данной работе представлена модель катодного слоя тлеющего разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленкой, учитывающая термополевой механизм электронной эмиссии, и исследовано ее влияние на вольт-амперную характеристику разряда при температурах, существенно превосходящих комнатную.

Модель

Пусть на плоском металлическом катоде газоразрядного прибора, нагретом в разряде до температуры T , находится тонкая диэлектрическая пленка толщиной H_f . При его бомбардировке ионами, плотность тока которых равна j_i , с него происходит эмиссия электронов с плотностью тока γj_i [1], где γ_i – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода. Это приводит к накоплению на внешней поверхности пленки положительного заряда, создающего в пленке электрическое поле с напряженностью E_f . Когда она достигает величины порядка 10^8 – 10^9 В·м⁻¹, начинается туннелирование в диэлектрик электронов, т.е. возникает термополевая электронная эмиссия из металла в пленку. Плотность тока термополевой эмиссии в зону проводимости диэлектрика, эмиссионная эффективность пленки и плотность тока электронов из пленки в разряд определяются соотношениями [6, 7]:

$$j_f(H_f) = \frac{4\pi e m k_b T}{h^3} [I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l)], \quad (1)$$

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n} \frac{B_n(E_f, T)}{A(E_f, T)}\right), \quad (2)$$

$$j_e = j_e(H_f) = \delta_f j_f(H_f), \quad (3)$$

где

$$I_1(\varepsilon_l) = \int_0^{\varepsilon_l} \ln\left(1 + \exp\left(-\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_F}{k_b T}\right)\right) (1 + Q(\varepsilon_z, E_f))^{-1} d\varepsilon_z, \quad H_0 = H_f - H_l,$$

$$I_2(\varepsilon_l) = \int_{\varepsilon_l}^{\infty} \ln\left(1 + \exp\left(-\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_F}{k_b T}\right)\right) d\varepsilon_z, \quad Q(\varepsilon_z, E_f) = \exp\left[\frac{8\sqrt{2}\pi}{3h} \left(\frac{k^3 e^5 (m^*)^2}{E_f}\right)^{1/4} \frac{v(y)}{y^{3/2}}\right],$$

$$A(E_f, T) = I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l), \quad \varepsilon_l = \varepsilon_F + \varphi_m - \chi_d - \sqrt{ke^3 E_f / 2}, \quad k = 1/4\pi\epsilon_0\epsilon_f,$$

$$B_n(E_f, T) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{0n} < 0, \\ I_1(\varepsilon_{0n}), & 0 < \varepsilon_{0n} < \varepsilon_l, \\ I_1(\varepsilon_l) + I_2(\varepsilon_l) - I_2(\varepsilon_{0n}), & \varepsilon_{0n} > \varepsilon_l, \end{cases}$$

$$\varepsilon_{0n} = \varepsilon_F + \varphi_m - (eE_f H_f - n\Delta\varepsilon), \quad y = \sqrt{ke^3 E_f} / (\varepsilon_F + \varphi_m - \chi_d - \varepsilon_z),$$

ε_z – продольная компонента энергии электронов, ε_F и φ_m – энергия Ферми и работа выхода материала подложки, H_l – длина туннелирования электрона, χ_d и ϵ_f – электронное сродство и высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки.

В результате, возрастает эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода, который определяется выражением [3]:

$$\gamma_{\text{eff}} = (\gamma_i + \delta_f) / (1 - \delta_f). \quad (4)$$

Напряженность же электрического поля E_f в пленке в установившемся режиме разряда может быть найдена из условия равенства плотности разрядного тока $j = (1 + \gamma_{\text{eff}})j_i$ и плотности тока электронной эмиссии из металлической подложки катода в пленку, т.е. $j = j_f(H_f)$.

Соотношения (1)–(4) совместно с уравнениями катодного слоя тлеющего разряда [5] определяют его характеристики при наличии на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки.

Результаты

Вычисления проводились для разряда в аргоне при $p = 133$ Па, $\gamma_i = 0.025$ с алюминиевым катодом без диэлектрической пленки и с пленкой оксида алюминия толщиной 6 нм при $\epsilon_f = 3$, $\varphi_m = 4.5$ эВ, $\chi_d = 2$ эВ [2, 4, 5].

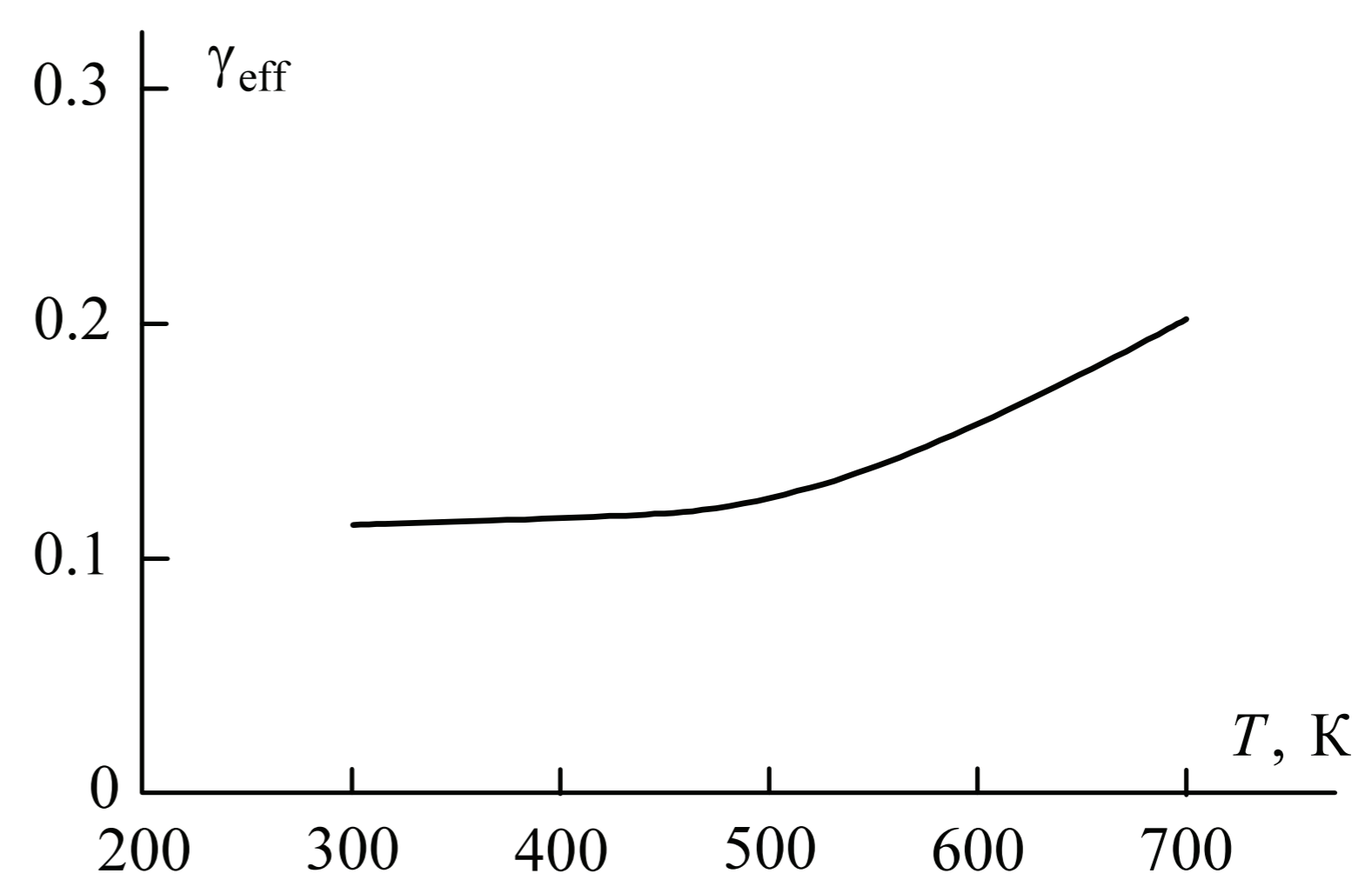


Рис. 1

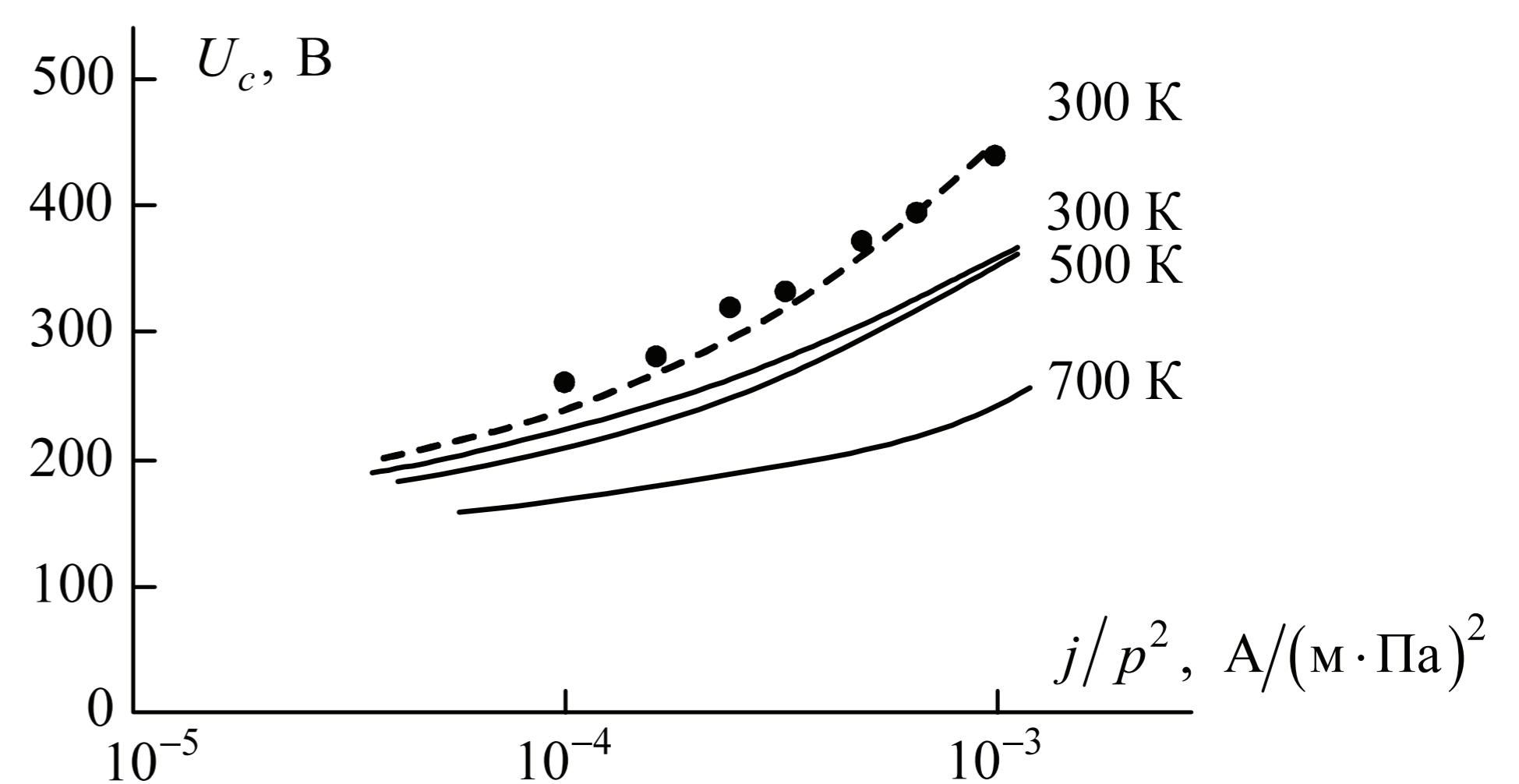


Рис. 2

Рассчитанная при $j/p^2 = 5 \cdot 10^{-4}$ А/(м·Па)² зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии γ_{eff} катода с пленкой от его температуры T приведена на рис. 1. Из него следует, что в случае $T > 500$ К при увеличении температуры катода, из-за существенного возрастания энергий эмиттируемых в диэлектрик электронов и обусловленного этим увеличения эмиссионной эффективности пленки δ_f , происходит, как следует из (4), увеличение от эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , что должно приводить к уменьшению U_c .

На рис. 2, где изображены полученные вольт-амперные характеристики разряда $U_c(j)$, видно, что в случае разряда с катодом без диэлектрической пленки имеет место согласие результатов расчета (штриховая линия) с экспериментальными данными из работы [8] (точки), подтверждающее удовлетворительную точность использованной модели катодного слоя тлеющего разряда. Наличие же на катоде тонкой диэлектрической пленки приводит к уменьшению U_c при той же температуре и плотности разрядного тока вследствие большего значения γ_{eff} , т.е. вольт-амперная характеристика такого разряда располагается ниже, чем в случае катода без пленки. С увеличением температуры катода величина снижения U_c возрастает из-за увеличения вклада усиленной температурой электронной эмиссии в эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода. Это обуславливает уменьшение энергий бомбардирующих катод ионов и атомов рабочего газа, снижение интенсивности его распыления в разряде и увеличение долговечности прибора.

Литература

[1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2009. 736 с.
[2] Suzuki M. et al. // IEEE Trans.: ED. 2012. V. 59. № 8. P. 2256.
[3] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188.
[4] Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.

[5] Кристья В.И., Мьо Ту Ха, Фишер М.Р. // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 846.
[6] Benilov M.S., Benilova L.G. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. № 6. 063307.
[7] Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Bondariev V. // High Temp. Material Proc. 2022. V. 26. № 1. P. 17.
[8] Rózsa K., Gallagher A. // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. № 1. P. 913.