

УДК 537.525:621.32.032

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ КАТОДА С ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ И УСТОЙЧИВОСТЬ СЛАБОТОЧНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

© 2020 г. В. И. Кристья^a, *, Мьо Ти Ха^a

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

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

Поступила в редакцию 21.06.2019 г.

После доработки 15.07.2019 г.

Принята к публикации 20.07.2019 г.

Сформулирована модель слабotoчного (таунсендовского) газового разряда при наличии на поверхности катода тонкой диэлектрической пленки. В модели, наряду с ионно-электронной эмиссией с катода, принимается во внимание полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в пленку под действием сильного электрического поля, возникающего в диэлектрике при протекании разрядного тока. Рассчитывается также движение электронов в пленке и их выход в разрядный объем. Вычислены параметры разряда как функции плотности тока и показано, что, в отличие от случая разряда с металлическим катодом, эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода возрастает при ее увеличении. В результате вольт-амперная характеристика такого разряда является падающей, и это может являться причиной экспериментально наблюдавшейся его неустойчивости.

Ключевые слова: слабotoчный газовый разряд, диэлектрическая пленка на поверхности катода, ионно-электронная эмиссия, полевая электронная эмиссия, эмиссионная эффективность пленки, эффективный коэффициент электронной эмиссии катода, вольт-амперная характеристика разряда.

DOI: 10.31857/S1028096020030103

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время используются различные типы газоразрядных приборов, такие как осветительные лампы, плазменные дисплеи и газовые лазеры. Их важной характеристикой является напряжение зажигания разряда, равное минимальной разности потенциалов между электродами, при которой происходит пробой рабочего газа в межэлектродном промежутке и возникает слабotoчный разряд, который может перейти сначала в тлеющий разряд, а после разогрева электродов – в дуговой разряд [1, 2]. Величина напряжения зажигания и поддержания разряда в значительной степени определяется процессом эмиссии электронов из катода, который характеризуется эффективным коэффициентом ионно-электронной эмиссии, равным среднему числу эмитируемых электронов в расчете на один ион, падающий на катод из разряда.

Особенность слабotoчного разряда с металлическим катодом состоит в том, что напряжение его поддержания U_d практически не зависит от

плотности разрядного тока j в широком интервале ее изменения, что обуславливает устойчивость такого разряда [1, 3]. И лишь при достаточно больших значениях j , когда объемный заряд ионной компоненты тока существенно влияет на распределение электрического поля в нем, что приводит к увеличению эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода γ_{eff} , значение U_d убывает с увеличением j , т.е. его вольт-амперная характеристика становится падающей [1–5]. В результате этого слабotoчный разряд становится неустойчивым и переходит в тлеющий разряд [1, 2]. Вольт-амперная же характеристика тлеющего разряда с металлическим катодом обычно является растущей вследствие необходимости обеспечения более интенсивной ионизации рабочего газа в разрядном промежутке при увеличении j .

Один из способов увеличения γ_{eff} , а следовательно, уменьшения U_d , состоит в формировании на катоде тонкой диэлектрической пленки. При протекании тока в межэлектродном промежутке

на ее поверхности накапливается положительный заряд. Он может создавать в диэлектрике электрическое поле, достаточное для возникновения полевой эмиссии электронов из металлической подложки электрода в пленку [6, 7]. Такие электроны ускоряются полем в направлении внешней поверхности пленки и, достигая ее, нейтрализуют поверхностный заряд, предотвращая его дальнейшее накопление. Некоторая их доля δ_f , называемая эмиссионной эффективностью пленки, может преодолевать потенциальный барьер на границе и выходить в разрядный объем, увеличивая γ_{eff} и снижая тем самым напряжение поддержания разряда. Однако влияние полевой электронной эмиссии из катода с диэлектрической пленкой на характеристики слаботоочного разряда и, в частности, на их зависимость от плотности разрядного тока, до настоящего времени изучено недостаточно.

В данной работе сформулирована модель слаботоочного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки и исследовано ее влияние на эмиссионные свойства катода и вольт-амперную характеристику такого разряда.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пусть слаботоочный разряд происходит в промежутке длины d между плоскими параллельными катодом и анодом. При бомбардировке металлического катода ионами, поступающими из разряда, плотность тока которых равна j_i , с него происходит эмиссия электронов с плотностью тока $\gamma_{\text{eff}} j_i$, где $\gamma_{\text{eff}} = f_{es} \gamma_i$, γ_i – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода, $f_{es} = 1/(1 + v/4w_e)$ – доля эмитированных с катода электронов, не возвращающихся на его поверхность вследствие рассеяния на атомах рабочего газа, v – средняя скорость эмитируемых катодом электронов, w_e – дрейфовая скорость электронов в газе у катода.

Если на катоде находится диэлектрическая пленка толщиной H_f , на ее поверхности накапливается положительный заряд, создающий в пленке электрическое поле с напряженностью E_f . При достижении значения E_f порядка 10^8 В/м начинается полевая эмиссия электронов из металлической подложки катода в зону проводимости пленки, макроскопическая плотность тока которой определяется формулой Фаулера–Нордгейма [8–10]:

$$j_f = (a s_f E_f^2 / t^2(y_0) \Phi_b) \exp(-b v(y_0) \Phi_b^{3/2} / E_f), \quad (1)$$

где $a = 1.54 \times 10^{-6}$ А · эВ/В², $b = 6.83 \times 10^9$ В/эВ^{3/2} · м,

$$c = 3.79 \times 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{м}^{1/2} / \text{В}^{1/2}, \quad y_0 = c(E/\varepsilon_f)^{1/2} / \Phi_b,$$

$$v^2(y_0) = 1 - y_0^2 + (1/3)y_0^2 \ln y_0, \quad t^2(y_0) = 1 + (1/9)y_0^2(1 - \ln y_0), \quad \Phi_b = \Phi_m - \chi_d - \text{высота потенциального барьера на границе подложки и пленки,}$$

$$\Phi_m - \text{работа выхода подложки, } \chi_d - \text{электронное сродство материала пленки, } \varepsilon_f - \text{высокочастотная диэлектрическая проницаемость материала пленки, } s_f - \text{доля поверхности границы металл-диэлектрик вблизи вершин ее рельефа, с которой (вследствие усиления на них напряженности электрического поля) осуществляется полевая электронная эмиссия.}$$

Напряженность электрического поля E_f в пленке вблизи вершин рельефа на ее границе с подложкой в установившемся режиме разряда может быть найдена из условия равенства плотности разрядного тока и макроскопической плотности тока полевой электронной эмиссии в пленку:

$$j = j_f. \quad (2)$$

Эмиссионная эффективность пленки определяется выражением [7, 11]:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_0^n}{n! \lambda_e^n} \left(1 + \frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right), \quad (3)$$

а эффективный коэффициент ионно-электронной эмиссии катода при этом равен [7, 12]:

$$\gamma_{\text{eff}} = (\gamma_{ie} + \delta_{fe}) / (1 - \delta_{fe}), \quad (4)$$

где $\delta_{fe} = f_{es} \delta_f$, $\gamma_{ie} = f_{es} \gamma_i$, $H_0 = H_f - H_t$, $\varepsilon_d = \hbar e E_f / 2(2m(\Phi_m - \chi_d))^{1/2} t(y_0)$, $\varepsilon_{en} = e H_f E_f - \Phi_m - n \Delta\varepsilon$, H_t – ширина потенциального барьера на границе металл–диэлектрик, e и m – заряд и масса электрона, $\hbar = h/2\pi$, h – постоянная Планка, λ_e и $\Delta\varepsilon$ – средняя длина пробега электрона в пленке между его столкновениями с фононами и теряемая при таком столкновении энергия.

Условие существования слаботоочного разряда в межэлектродном промежутке имеет вид [1, 2]:

$$\alpha(E_d) d = \ln(1 + \gamma_{\text{eff}}), \quad (5)$$

где $E_d = U_d/d$ – напряженность электрического поля в разрядном промежутке, $\alpha(E_d)$ – ионизационный коэффициент рабочего газа, который равен среднему числу ионизаций его атомов электроном на единице длины разряда и задается выражением [1]:

$$\alpha(E_d) = A p \exp(-B \sqrt{p/E_d}), \quad (6)$$

в котором A и B – постоянные, зависящие от рода газа, p – его давление.

Плотность же разрядного тока j может быть найдена из уравнения разрядной цепи [12]:

$$U_d + E_f H_f + RSj = U_0, \quad (7)$$

где U_0 – приложенное внешнее напряжение, R – балластное сопротивление, S – площадь поверхности катода, занятая разрядом.

Уравнения (1)–(7) образуют систему, позволяющую рассчитать характеристики слаботочного разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, в том числе напряжение его поддержания U_d , как функции плотности разрядного тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вычисления проводили для разряда в аргоне с алюминиевым катодом без диэлектрической пленки и при наличии на его поверхности пленки оксида алюминия толщиной $H_f = 9$ нм, поскольку, как показано в [13], в разряде не происходит пробой таких пленок, обусловленный образованием в них электронных лавин. Использовали следующие значения параметров [11, 14, 15]: $d = 5$ мм, $p = 400$ Па, $\gamma_i = 0.03$, $\phi_m = 4.0$ эВ, $\chi_d = 2.0$ эВ, $\epsilon_f = 3$, $s_f = 10^{-3}$, $\lambda_e = 0.3$ нм, $\Delta\epsilon = 0.125$ эВ. Величину RS выбирали, равной 2.5×10^6 Ом·м², что обеспечивало выполнение условия слаботочности разряда $j \ll j_0$ (где $j_0 = \epsilon_0 \mu_i U_d^2 / 2d^3$, μ_i – подвижность ионов в рабочем газе [1]) при $j < 10^{-3}$ А/м².

Найденные зависимости основных параметров разряда от плотности разрядного тока j приведены на рис. 1–5. Из них следует, в частности, независимость характеристик разряда с металлическим катодом от величины j в интервале 10^{-5} – 10^{-4} А/м², что согласуется с экспериментальными данными работ [1, 3]. В случае же наличия на катоде диэлектрической пленки, при увеличении плотности разрядного тока (согласно условию (2)) должна увеличиваться плотность эмиссионного тока из подложки катода в пленку. Это обеспечивается возрастанием напряженности электрического поля в ней из-за роста плотности поверхностного заряда на пленке. В результате увеличиваются энергии эмитированных электронов в пленке у ее внешней границы, что согласно (3) и (4) приводит к увеличению ее эмиссионной эффективности δ_f и эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода $\gamma_{\text{эф}}$ (рис. 2, 3). Поэтому напряжение поддержания разряда U_d при наличии пленки имеет заметно меньшую величину, причем значения δ_f и

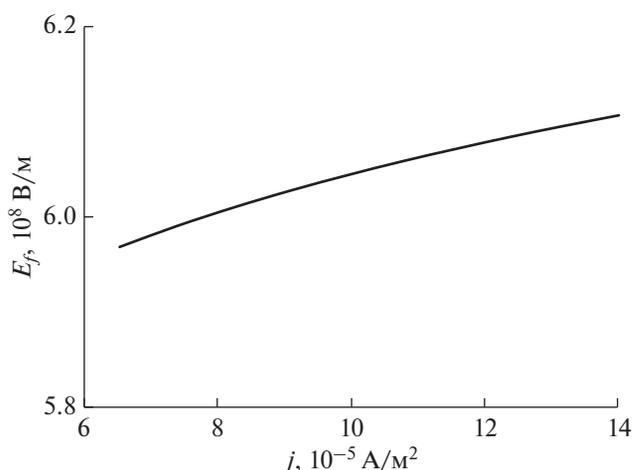


Рис. 1. Зависимость напряженности электрического поля в диэлектрической пленке от плотности разрядного тока.

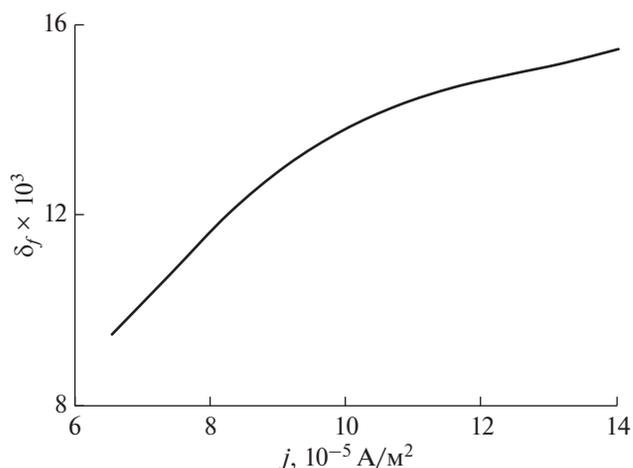


Рис. 2. Зависимость эмиссионной эффективности пленки от плотности разрядного тока.

$\gamma_{\text{эф}}$ увеличиваются с ростом величины j . Это обусловливает снижение интенсивности ионизации газа в разрядном промежутке, необходимой для поддержания нужной плотности разрядного тока j , и напряженности E_d электрического поля в нем. Уменьшение E_d приводит, как следует из рис. 4, лишь к незначительному снижению доли $f_{\text{ес}}$ эмитированных с катода электронов, не возвращающихся на его поверхность, и не оказывает существенного влияния на $\gamma_{\text{эф}}$. В результате, как видно из рис. 5, разрядное напряжение U_d убывает при возрастании j , и вольт-амперная характеристика разряда становится падающей при достаточно малых плотностях разрядного тока. Следовательно, дифференциальное сопротивление такого разряда имеет отрицательную величину,

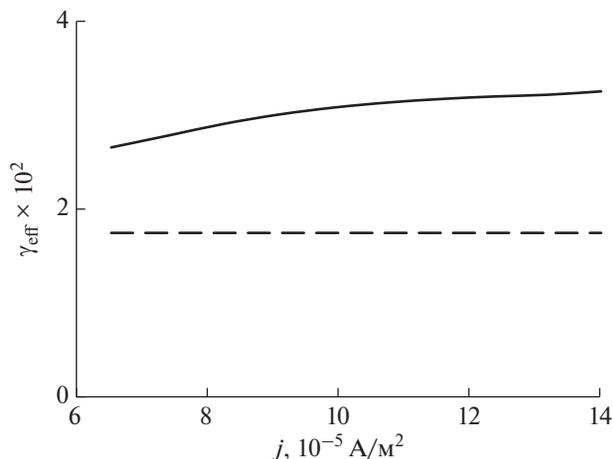


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии катода без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия) от плотности разрядного тока.

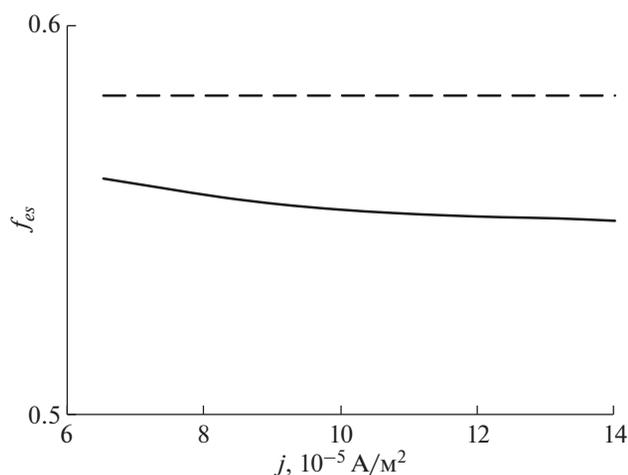


Рис. 4. Зависимость коэффициента f_{es} для катода без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия) от плотности разрядного тока.

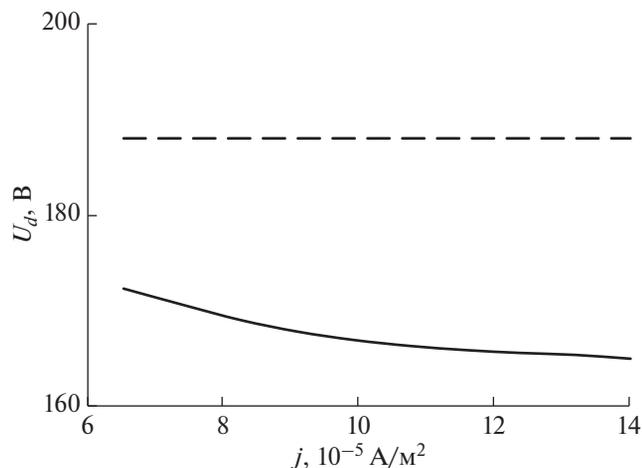


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика слабого разряда с катодом без диэлектрической пленки (штриховая линия) и с пленкой (сплошная линия).

что, как показано в работах [3–5], является необходимым условием его неустойчивости, т.е. возникновения в нем колебательных процессов, наблюдавшихся в [16] при наличии на электродах диэлектрических пленок оксида алюминия толщиной порядка 10 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформулирована модель слабого газового разряда для случая катода с тонкой диэлектрической пленкой, которая учитывает (наряду с ионно-электронной эмиссией с поверхности катода) также и полевую эмиссию электронов из металлической подложки катода в пленку под действием сильного электрического поля, возникающего в ней в разряде. Рассчитаны зависимости параметров разряда от плотности разрядного тока и показано, что напряжение его поддержания в случае металлического катода не зависит от плотности разрядного тока. Если же на катоде имеется тонкая диэлектрическая пленка, то при возрастании плотности разрядного тока (вследствие увеличения его эффективного коэффициента ионно-электронной эмиссии) происходит уменьшение напряжения поддержания разряда. В результате вольт-амперная характеристика разряда становится падающей, что может быть причиной экспериментально наблюдавшейся неустойчивости такого разряда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания “Организация проведения научных исследований” Минобрнауки РФ в МГТУ им. Н.Э. Баумана (проект 3.8408.2017/6.7) при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 18-42-400001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: ИД “Интеллект”, 2009. 736 с.
2. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. С.-Пб.: Лань, 2010. 512 с.
3. Petrović Z. Lj., Phelps A.V. // Phys. Rev. E. 1993. V. 47. № 4. P. 2806. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.47.2806>
4. Phelps A.V., Petrović Z. Lj., Jelenković B.M. // Phys. Rev. E. 1993. V. 47. № 4. P. 2825. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.47.2825>
5. Mokrov M.S., Raizer Yu.P. // Plasma Sources Sci. Technol. 2008. V. 17. № 3. P. 035031. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/3/035031>
6. Stamenković S.N., Marković V.Lj., Gocić S.R., Jovanović A.P. // Vacuum. 2013. V. 89. P. 62. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.09.010>
7. Кристя В. И., Мьо Ти Ха, Фишер М. Р. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2019.

- № 4. С. 79.
<https://doi.org/10.1134/S0207352819040103>
8. *Modinos A.* Field, Thermionic, and Secondary Electron Emission Spectroscopy. N.Y.: Plenum Press, 1984. 376 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1448-7>
9. *Forbes R.G.* // J. Vac. Sci. Tech. B. 1999. V. 17. № 2. P. 534.
<https://doi.org/10.1116/1.590589>
10. *Forbes R.G.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. № 11. P. 113122.
<https://doi.org/10.1063/1.2354582>
11. *Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O.* // Vacuum. 2018. V. 149. P. 114.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.12.028>
12. *Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I.* // Vacuum. 2016. V. 129. P. 188.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.01.008>
13. *Зыкова Е.В., Кучеренко Е.Т., Айвазов В.Я.* // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 7. С. 1464.
14. *Suzuki M., Sagawa M., Kusunoki T. et al.* // IEEE Trans.: ED. 2012. V. 59. № 8. P. 2256.
<https://doi.org/10.1109/TED.2012.2197625>
15. *Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Носов А.А. и др.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1994. № 6. С. 93.
16. *Гуторов К. М., Визгалов И. В., Маркина Е. А., Курнаев В. А.* // Известия РАН. Сер. Физ. 2010. Т. 74. № 2. С. 208.

Modeling of Impact of the Field Electron Emission from the Cathode with an Insulating Film on the Voltage-Current Characteristic and Stability of the Low-Current Gas Discharge

V. I. Kristya^{1, *}, Myo Thi Ha¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000 Russia*

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

A model of the low-current gas discharge at the presence of a thin insulating film on the cathode is formulated. It takes into account, along with the ion-electron emission from the cathode, also the field emission of electrons from the cathode metal substrate into the film under the influence of a strong electric field generated in the insulator in the discharge. Motion of electrons in the film and their going out into the discharge volume is also calculated. The discharge parameters are found as functions of the discharge current density and it is shown that, unlike in the case of discharge with the metal cathode, the cathode effective secondary electron emission yield grows at its increase. As a result, the voltage-current characteristic of such discharge is falling, and this can be a cause of the experimentally observed its instability.

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