

О. В. АНДРІЄНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

E-mail: skorp-olya@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ В КОАКСІАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОДІВ З ТОНКИМ КАТОДОМ

Побудовано дрейфово-дифузійну модель тліючого розряду в коаксіальній системі з діелектричними кінцями електродів при напрузі 800 В, температурі аргону 300 К, $pd \approx 2$ Па·м (p — тиск робочого газу, d — відстань між електродами). При моделюванні плазми враховувалися процеси іонізації, пружних зіткнень, перезарядження іонів та вторинної емісії катода. Розраховано розподіл потенціалу, концентрацію заряджених частинок та електронний струм вздовж катода. Досліджено вплив опору баластного резистора і блокувальної ємності на параметри розряду.

Ключові слова: тліючий розряд, дифузійні моделі, моделювання плазми, коаксіальна система, електрод, тонкий катод.

Різноманітні газові розряди лежать в основі функціонування багатьох електронних і фотонних приладів та іонно-плазмових технологій. Серед них найбільш поширеним є тліючий розряд, що часто згадується в науково-технічній літературі [1–8], а розповсюдженою моделлю розряду — модель з паралельними дисковими електродами [4–6]. Проте деякі конфігурації електродних систем, наприклад коаксіальні системи в довгих трубках малого діаметра, залишаються недостатньо вивченими через їхню специфіку. Поряд з тим, що багато трубчастих виробів потребують іонно-плазмового оброблення внутрішньої поверхні [3, 7, 8], дослідження таких систем ускладнене, особливо коли йдеться про внутрішню структуру розряду, розподіл електричного поля, концентрації заряджених частинок тощо.

Процеси, що відбуваються в плазмі, є досить складними та різноманітними, що робить експериментальні дослідження достатньо високовартісними. Тому для вивчення плазми активно застосовується чисельне моделювання, яке використовує всю множину аналітичних методів теоретичної фізики, зокрема вирішення так званих крайових задач.

Метою цієї роботи є створення та дослідження моделі тліючого розряду в довгій коаксіальній системі електродів малого діаметра при $pd \approx 2$ Па·м (p — тиск робочого газу, d — відстань між електродами), що відповідає правій частині мінімуму кривої Пашена для запалювання розряду. Це дозволяє досягти мінімальних витрат енергії на підтримання розряду, а також мінімізує зіткнення іонів з молекулами газу й втрати енергії під час цих зіткнень, забезпечуючи тим самим ефективний кінетичний вплив іонів на поверхню катода, що використовується в багатьох іонних технологіях.

Модель розрядної системи

Моделювання проводилося для коаксіальної циліндричної системи з зовнішнім анодом. Досліджувана розрядна система, модель якої зображено на **рис. 1**, мала такі розміри: радіус катода $r_c = 15$ мкм; радіус анода $r_a = 5$ мм; осьова довжина вздовж електродної системи $L = 90$ мм.

Розглядалася аргонова плазма за величини тиску $p = 400$ Па та температури $T = 300$ К. Напруга між катодом та анодом — постійна, величиною $U = 800$ В. Опір баластного резистора R_b змінювався в межах 20–8000 кОм.

Для моделювання тліючого розряду був застосований гідродинамічний підхід у дрейфово-дифузійному наближенні з розв'язанням рівнянь Больцмана, оскільки він є простішим у порівнянні з методами, що базуються на фізичній кінетиці з формуванням і розв'язанням рівнянь Больцмана для цієї моделі. Як

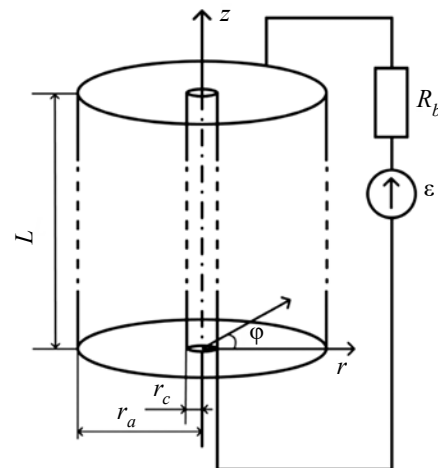


Рис. 1. Модель розрядної системи

показано в дослідженнях [1, 2, 9], цей підхід забезпечує фізично коректні результати в межах заданого діапазону p_d .

Густину електронів Γ_e обчислювали шляхом розв'язування дрейф-дифузійного рівняння для густини електронів та їхньої середньої енергії, нехтуючи при цьому конвекцією електронів внаслідок руху рідини:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e; \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -n_e \mu_e \mathbf{E} - \mathbf{D}_e \nabla n_e, \quad (2)$$

де ∇ — оператор Гамільтона;
 n_e, μ_e — концентрація та рухливість електронів;
 \mathbf{E} — напруженість електричного поля;
 \mathbf{D}_e — коефіцієнт дифузії електронів;
 R_e — швидкість генерації електронів внаслідок непружних зіткнень.

Коефіцієнт дифузії електронів обчислюється через електронну рухливість з використанням співвідношення

$$\mathbf{D}_e = \mu_e T_e, \quad (3)$$

де T_e — температура електронів.

Для постійнострумових розрядів процеси, що відбуваються в області прикатодного падіння напруги, точніше описуються при використанні коефіцієнтів Таунсенда, а не коефіцієнтів швидкості [2]. Припустимо, що існує M реакцій, які сприяють зростанню або розпаду електронної густини, та P непружних електронно-нейтральних зіткнень (загалом $P \gg M$). Тоді швидкість генерації електронів R_e та втрати енергії R_ε задаються співвідношеннями

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j \alpha_j N_n |\Gamma_e|; \quad (4)$$

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_j \alpha_j N_n |\Gamma_e| \Delta \varepsilon_j, \quad (5)$$

де x_j — мольна частка частинок, що беруть участь у j -й реакції;
 α_j — коефіцієнт Таунсенда для j -ї реакції;
 N_n — загальна щільність нейтральних частинок;
 $\Delta \varepsilon_j$ — втрати енергії при протіканні j -ї реакції.

Стосовно неелектронних частинок, то для знаходження їх масової частки розв'язується рівняння

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(\omega_k) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k, \quad (6)$$

де \mathbf{j}_k — вектор дифузійного потоку;
 R_k — вираз швидкості для k -ї частинки;
 \mathbf{u} — усереднений за масою вектор швидкості рідини;
 ρ — просторова щільність заряду;
 ω_k — масова частка k -ї частинки.

Вектор дифузійного потоку визначається як

$$\mathbf{j}_k = \rho \omega_k \mathbf{V}_k, \quad (7)$$

де \mathbf{V}_k — багатокомпонентна швидкість дифузії для k -ї частинки.

Електростатичне поле обчислюється як

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho, \quad (8)$$

де ε_0 — діелектрична проникність вакууму;
 ε_r — відносна діелектрична проникність;
 V — електричний потенціал.

Просторова щільність ρ обчислюється за формулою

$$\rho = q \left(\sum_{k=1}^N Z_k n_k - n_e \right), \quad (9)$$

де q — одиничний заряд;
 Z_k — заряд;
 n_k — концентрація електронів;
 N — кількість частинок.

На відміну від НЧ-розрядів механізм підтримки такого розряду — випромінювання вторинних електронів з катода. При попаданні іона електрон із певною ймовірністю випромінюється з поверхні катода. Потім ці електрони прискорюються сильним електричним полем поблизу катода, де вони набувають достатньо енергії для ініціювання іонізації.

Втратами електронів на торцях електродної системи можна знехтувати через те, що її довжина значно більша за діаметр. Електрони емітуються катодом внаслідок іонно-електронної емісії ($\gamma = 0,1$), що призводить до граничної умови для потоку електронів

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = \gamma (\Gamma_p \cdot \mathbf{n}), \quad (10)$$

а потік енергії електронів розраховується як

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_\varepsilon = \varepsilon_p \gamma (\Gamma_p \cdot \mathbf{n}), \quad (11)$$

де \mathbf{n} — вектор зовнішньої нормалі;
 Γ_ε — густина енергії електронів;
 Γ_p — вектор потоку іонів;
 ε_p — середня енергія вторинних електронів.

Реакції під час зіткнень частинок

Реакція	Тип реакції
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$	Пружне зіткнення електронів з атомами
$e + \text{Ar} \leftrightarrow e + \text{Ar}^*$	Генерація та гасіння метастабільного атома під дією удару електронів
$e + \text{Ar} \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	Іонізація атомів ударом електронів
$e + \text{Ar}^* \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	Іонізація метастабільних атомів ударом електронів
$\text{Ar}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar}$	Пружне зіткнення іонів
$\text{Ar}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}^+$	Резонансне перезарядження іонів
$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow e + \text{Ar} + \text{Ar}^+$	Іонізація Пенінга
$\text{Ar}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}$	Гасіння метастабільних атомів

Вибір аргону як робочого газу зумовлений можливістю використовувати мінімальну кількість реакцій, що можуть бути зведені до 3 компонентів та 7 формул, наведених в таблиці (Ar — атом аргону, Ar* — метастабільний збуджений стан атома аргону, Ar+ — іон, e — електрон).

Аналіз результатів моделювання

В процесі моделювання режим існування розряду встановлювався за допомогою баластного резистора, величина опору R_b якого впливає на струм розряду та інші характеристики. Напряга розряду знаходилась в межах 118–250 В.

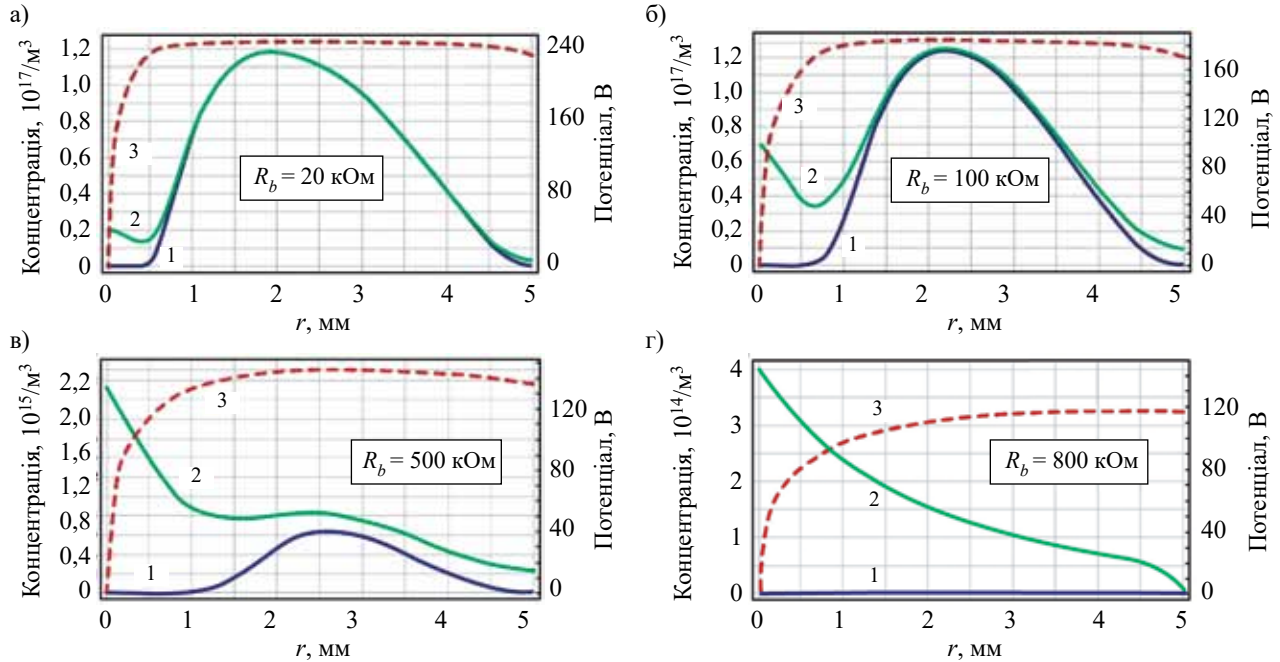


Рис. 2. Розподіл концентрації електронів (1) та іонів (2), а також потенціалу (3) в міжелектродному проміжку за різного опору баластного резистора R_b

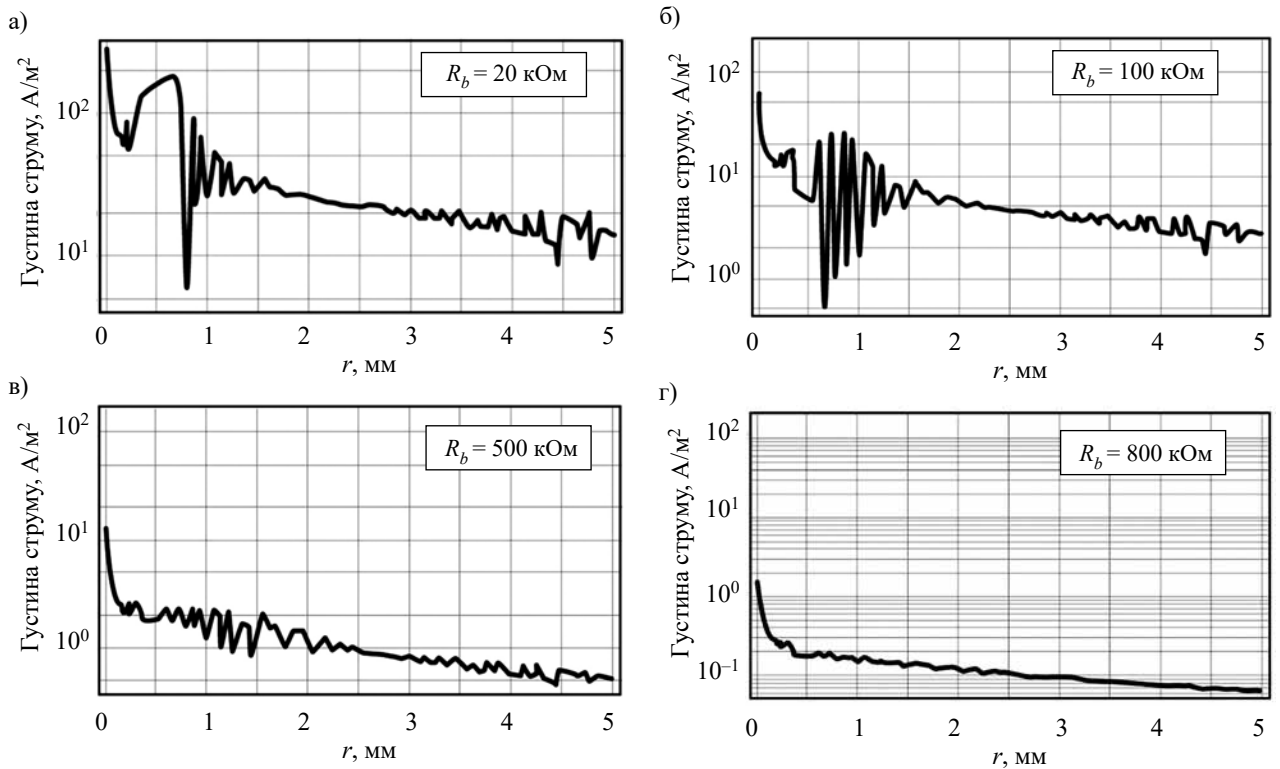


Рис. 3. Густина струму в міжелектродному проміжку за різного опору баластного резистора R_b

Розглянемо результати моделювання.

На **рис. 2** показано розподіл потенціалу в міжелектродному проміжку (радіально між катодом і анодом), при цьому на рис. 2, *a, б* — у випадку існування плазми, на рис. 2, *в, г* — за її відсутності. У всіх випадках у формуванні кривої розподілу потенціалу в міжелектродному проміжку значну роль відіграє позитивний просторовий заряд іонів. Відомо, що розподіл потенціалу в коаксіальній системі (вакуумному конденсаторі) характеризується сильною неоднорідністю, тобто напруженість електричного поля поруч з внутрішнім електродом малого діаметра суттєво перевищує напруженість поля біля зовнішнього електрода на відміну від постійної величини напруженості для плоскопаралельних електродів. Тобто у вакуумній коаксіальній та плоскій системах потенціали розподіляються по-різному.

В результаті моделювання було отримано дані, які вказують на те, що розряд при значеннях параметра pd , характерних для правої частини області мінімуму кривих Пашена, де починається зростання напруги виникнення розряду, має всі ознаки типового тліючого розряду. Характер розподілу потенціалу вказує на факт формування в міжелектродному проміжку біля катодного шару просторового заряду іонів, де генеруються іони.

Розподіл потенціалу має три частини: катодне падіння зі стрімким нарощуванням потенціалу, падіння в області негативного світіння зі слабким нарощуванням та анодне падіння зі слабким спаданням.

Таким чином створюються дві приелектродні області з переважанням концентрації іонів. Зі збільшенням густини струму збільшується область негативного світіння та концентрація заряджених частинок в цій області.

Розподіл заряджених частинок навколо катода та радіальний розподіл потенціалу показує, що в плазмовій моді плазма зосереджується в області максимуму концентрацій заряджених частинок, де відбувається їх основна генерація та дифузія з подальшою деіонізацією на електродах. Важливо зазначити, що падіння потенціалу в прианодній області не заважає дифузійному руху іонів.

На **рис. 3** показано розподіл густини електронного струму в міжелектродному проміжку (радіально у проміжку від катода до анода). З наведених результатів видно, що домінуючим параметром, який найсильніше впливає на параметри розряду, є густина струму. Вона визначається при постійній напрузі джерела живлення номінальним значенням опору баластного резистора R_b , що обмежує струм.

На **рис. 4** показано розподіл концентрації іонів, електронів та потенціалу на поверхні катода. Концентрація є нерівномірною вздовж поверхні, тобто змодельований у всіх варіантах розряд можна віднести до нормального, оскільки емісія електронів відбувається не по всій площі катода.

Наявність істотного впливу схеми підключення джерела живлення та баластного резистора на протікання тліючого розряду й, відповідно, на результа-

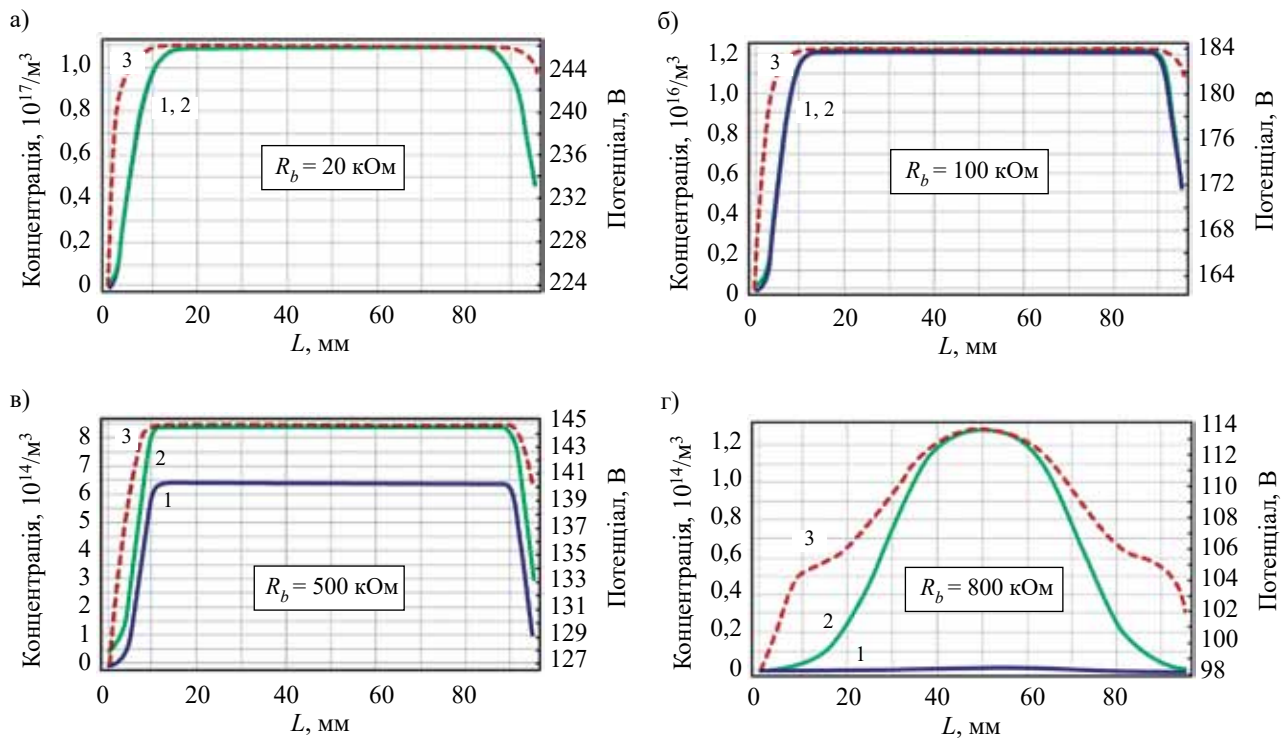


Рис. 4. Розподіл концентрації електронів (1) та іонів (2), а також потенціалу (3) вздовж поверхні катода за різного опору баластного резистора R_b

ти моделювання вказує на те, що номінальне значення R_b визначає не тільки власне густину струму, але й постійну часу системи тліючого розряду:

$$\tau = R_b C, \quad (12)$$

де C — сукупна ємність, яка містить паразитну ємність монтажу зовнішнього блокувального конденсатора. У роботі [10] його ємність вказана 1 пФ, у [11] — не визначено. У нашому ж випадку його ємність набагато менша за дифузійну ємність плазми, що визначається сукупною кількістю зарядів в тілі розряду. Зазвичай самі електроди також виконують роль блокувального конденсатора, але у моделі, що розглядається, один з електродів має мізерну площу, тому й блокувальні властивості дуже малі.

Слід зазначити, що хоча в експериментальному дослідженні [11] конденсатор не згадується, все одно зрозуміло, що роль такого конденсатора можуть відігравати паразитні ємності монтажу експерименту.

Питання присутності сукупної ємності конденсатора є принциповим. В дослідженні [5] зазначається, що в процесі розв'язання диференціальних рівнянь обраної моделі брався до уваги режим розряду. З іншого боку, існують моделі [13, 14], що враховують по суті те ж саме, але з погляду виникнення коливань як частини процесу протікання розряду. Таким чином, стабільність системи розряду розглядається з точки зору частотних та фазових співвідношень. І вплив номінального значення опору баластного резистора R_b та блокувальної ємності може мати вирішальне значення для стабільності розряду, що, власне, й підтверджується роботами [12, 13] і результатами на наведених вище рисунках. При найменшому з розглянутих значень опору резистора $R_b = 20$ кОм спостерігається найбільша густина струму та найбільша нестабільність розрахунку, що проявляється в істотних коливаннях середнього значення щільності струму при значенні баластного опору 20 кОм, отже найбільшою є й ймовірність виникнення ефектів, зазначених в роботах [12, 13], а саме автоколивального режиму в тліючому розряді. Але доведення такого зв'язку потребує проведення окремого вивчення.

Висновки

Проведене дослідження показало, що розроблена дрейфово-дифузійна модель тліючого розряду у коаксіальній системі з тонким катодом дозволяє ефективно моделювати розподіл потенціалу, концентрацію заряджених частинок та щільність струму. Основним параметром у дослідженні було значення опору баластного резистора, що нормує струм джерела живлення та одночасно є внутрішнім опором системи розряду. Певну нестабільність в структурі розряду виявлено при значенні опору резистора в діапазоні від 20 до 100 кОм, що характерно, наприклад, для коливальних процесів генерації/рекомбінації іонів з неусталеним періодом.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації плазмових технологій обробки внутрішніх поверхонь металевих деталей малого діаметра. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення впливу коливальних процесів і уточнення ролі блокувальної ємності у розрядній системі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Surzhikov S. T. *Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena: A Mathematical Introduction*, Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2020, 549 p.
2. Fridman A., Kennedy L. A. *Plasma Physics and Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2021, 724 p. <https://doi.org/10.1201/9781315120812>
3. Lisovskiy V. A., Yakovkin S. D. Experimental study of a low-pressure glow discharge in air in large diameter discharge tubes *Plasma Physics Reports*. 2000, vol. 26, no. 12, pp. 1066–1075. <https://doi.org/10.1134/1.1331142>
4. Hou L., Wang Y., Wang J. et al. Theoretical study on characteristics of glow discharged neon gas and its interaction with terahertz waves, *Front. Phys.*, 2021, vol. 9, 751335. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.751335>
5. Almeida P. G. C., Benilov M. S., Faria M. J. Study of stability of dc glow discharges with the use of comsol multiphysics software. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 41, 415203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/41/415203>
6. Bouchikhi A., Hamid A. 2D DC subnormal glow discharge in argon. *Plasma Science and Technology*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/12/1/13>
7. Phadke P., Sturm J. M., van der Kruijs R. W. E., Bijkerk F. Sputtering and nitridation of transition metal surface under low energy, steady state nitrogen ion bombardment. *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 505, 144529. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144529>
8. Kuzmichev A., Perevertaylo V., Tsybulsky L., Volpian O. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal target during ion bombardment. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016, vol. 729, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/729/1/012005>
9. Rafatov I., Islamov G., Eylenceoglu E. et al. Analysis of different modeling approaches for simulation of glow discharge in helium at atmospheric pressure. *Phys. Plasmas*, 2023, vol. 30, iss. 9, art. 093504. <https://doi.org/10.1063/5.0161535>
10. Rafatov I., Bogdanov E. A., Kudryavtsev A. A. On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*, 2012, vol. 19, iss. 3, 033502. <https://doi.org/10.1063/1.3688875>
11. Wen X.-Q., Yin L.-Y., Wang D.-Z. A direct current glow discharge plasma source for inner surface modification of metallic tube. *Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, vol. 263, iss. 2, pp. 535–537. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.07.020>
12. Šijačić D. D., Ebert U., Rafatov I. Period doubling cascade in glow discharges: Local versus global differential conductivity. *Physical Review E*, 2004, no. 70, 056220. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.056220>
13. Bogaerts A., Wilken L., Hoffmann V. et al. Comparison of modeling calculations with experimental results for rf glow discharge optical emission spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, vol. 57, iss. 1, pp. 109–119. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00357-3](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00357-3)

Дата надходження рукопису
до редакції 18.10 2024 р.

STUDY OF GLOW DISCHARGE PARAMETERS IN A COAXIAL ELECTRODE SYSTEM WITH A THIN CATHODE

Various gas discharges are the basis of many electronic, photonic devices and ion-plasma technologies. Among them, the glow discharge is the most common and is often mentioned in the scientific and technical literature. In this study, we model a glow discharge in a cylindrical coaxial system with dielectric electrode ends in the hydrodynamic drift-diffusion approximation. The model parameters are: anode diameter 10 mm, cathode diameter 30 μm , voltage 800 V, temperature of the working argon gas 300 K, $pd \approx 2 \text{ Pa}\cdot\text{m}$ (p — working gas pressure, d — distance between electrodes), which corresponds to the right side of the minimum area of the Paschen curve for discharge ignition. The reactions of ionization of atoms by electron impact, generation and quenching of metastable atoms, elastic collision of electrons with atoms and elastic collision of ions, resonant recharge of ions, Penning ionization, and secondary ion-electron emission of the cathode are taken into account. The potential distribution and concentration of charged particles in the interelectrode space are calculated within the framework of a self-consistent problem, and the electron current density, concentration of charged particles, and potential along the cathode are presented. The effect of the ballast resistor R_b of the blocking capacity on the parameters and discharge mode is determined. The obtained results can be used in plasma technologies to modify the internal surfaces of metal, hollow, long parts with a small cross-sectional size.

Keywords: glow discharge, diffusion models, plasma modeling, coaxial system, electrode, thin cathode.

REFERENCES

1. Surzhikov S. T. *Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena: A Mathematical Introduction*, Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2020, 549 p.
2. Fridman A., Kennedy L.A. *Plasma Physics and Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2021, 724 p. <https://doi.org/10.1201/9781315120812>
3. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D. Experimental study of a low-pressure glow discharge in air in large diameter discharge tubes *Plasma Physics Reports*. 2000, vol. 26, no. 12, pp. 1066–1075. <https://doi.org/10.1134/1.1331142>
4. Hou L., Wang Y., Wang J. et al. Theoretical study on characteristics of glow discharged neon gas and its interaction with terahertz waves, *Front. Phys.*, 2021, vol. 9, 751335. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.751335>
5. Almeida P. G. C., Benilov M. S., Faria M.J. Study of stability of dc glow discharges with the use of comsol multiphysics software. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 41, 415203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/41/415203>
6. Bouchikhi A., Hamid A. 2D DC subnormal glow discharge in argon. *Plasma Science and Technology*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/12/1/13>
7. Phadke P., Sturm J.M., van der Kruijs R.W.E., Bijkerk F. Sputtering and nitridation of transition metal surface under low energy, steady state nitrogen ion bombardment. *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 505, 144529. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144529>
8. Kuzmichev A., Perevertaylo V., Tsybulsky L., Volpian O. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal target during ion bombardment. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016, vol. 729, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/729/1/012005>
9. Rafatov I., Islamov G., Eylenceoglu E. et al. Analysis of different modeling approaches for simulation of glow discharge in helium at atmospheric pressure. *Phys. Plasmas*, 2023, vol. 30, iss. 9, art. 093504. <https://doi.org/10.1063/5.0161535>
10. Rafatov I., Bogdanov E. A., Kudryavtsev A. A. On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*, 2012, vol. 19, iss. 3, 033502. <https://doi.org/10.1063/1.3688875>
11. Wen X.-Q., Yin L.-Y., Wang D.-Z. A direct current glow discharge plasma source for inner surface modification of metallic tube. *Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, vol. 263, iss. 2, pp. 535–537. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.07.020>
12. Šijačić D. D., Ebert U., Rafatov I. Period doubling cascade in glow discharges: Local versus global differential conductivity. *Physical Review E*, 2004, no. 70, 056220. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.056220>
13. Bogaerts A., Wilken L., Hoffmann V. et al. Comparison of modeling calculations with experimental results for rf glow discharge optical emission spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, vol. 57, iss. 1, pp. 109–119. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00357-3](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00357-3)

Опис статті для цитування:

Андриєнко О. В. Дослідження параметрів тліючого розряду у коаксіальній системі електродів з тонким катодом. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 3–4, с. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.3-4.24>

Cite the article as:

Andriienko O. V. Study of glow discharge parameters in a coaxial electrode system with a thin cathode. Technology and design in electronic equipment, 2024, no. 3–4, pp. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.3-4.24>