

## СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО МЕХАНІЗМУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ПРОЦЕСІВ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті розглянуто інноваційний підхід до механізму елементарних процесів тліючого розряду, направлений на удосконалення функціонування пристроїв у системах радіотехніки та телекомунікацій. Розглянуто ряд протиріч у сучасній теорії катодної області тліючого розряду та неточність існуючих прийнятих допущень та обмежень. На основі створеної вербальної моделі побудовано сучасну математичну модель тліючого розряду. Дана модель описує реальну картину елементарних процесів створення основних зарядоносіїв елементів радіотехнічних пристроїв, із певними обмеженнями.

**Ключові слова:** радіотехнічна система, електричний розряд, функція розподілу електронів та іонів, місцеутворення зарядоносіїв, катодна область розряду, щільність струму

**Shefer O. V. Modern approach to the glimmer discharge elementary processes mechanism of radio-technical devices functional elements.** It was shown an innovative approach to the glimmer discharge elementary processes mechanism aimed to improve the functioning of the devices in radio engineering and telecommunication systems.

A row of contradictions in the modern theory of glow discharge cathode area, indicate the inaccuracy of the existing assumptions and limitations of the model in which elementary processes and their interrelations are not fully taken into account. It is established that the glow discharge has a spatial inhomogeneity, which is caused by the presence of a large number of discharge zones between the electrodes, ambipolar diffusion and other factors. It is proved that in each of these zones one of several elementary processes prevails. Therefore there is a need to consistently examine individual bit areas, and the most important elementary processes in them, and then move on to investigate the relationship between them. It will allow constructing an incorrect mathematical model of a glow discharge.

Based on verbal model the glimmer discharge mathematical model was built. This model describes the elementary processes real state of radio-technical devices basic charge carriers elements, with certain restrictions.

**Keywords:** radio system, electric discharge, function of electrons and ions distribution, charge carriers origin, cathode discharge area, current density

**Вступ** Термін експлуатації радіотехнічних пристроїв напряму залежить від режиму, в якому вони працюють та належної експлуатації. Тому актуальною є проблема розуміння та правильного вибору експлуатаційного режиму.

Сучасна теорія тліючого розряду, за умови викладок повної реальної фізичної картини елементарних процесів, зустрічає значні складнощі. Вони обумовлені суперечливими підходами дослідників до ряду питань даної теорії [1-7], відсутністю надійних експериментальних результатів по визначенню основного місцеутворення позитивних іонів, кількісних оцінок  $\delta$  - процесів та впливу плазми від'ємного випромінювання на розподіли  $E(x)$ ,  $\rho(x)$ ,  $V(x)$ .

Плазма з неврівноваженою іонізацією реалізується у великому розмаїтті плазмових пристроїв та установок радіотехніки. Явища, що виникають у неврівноваженій плазмі, мають загальний фізико-технічний інтерес.

Сучасний розвиток науково-технічного прогресу, ставить перед науковцям та дослідниками новітній комплекс задач по забезпеченню випереджаючого розвитку фундаментальних теоретичних та експериментальних досліджень у області плазми. До таких задач відносять пошук нових джерел енергії, потужних та екологічно чистих газорозрядних лазерів; за плазмовою технологією обробку та створенню нових матеріалів [1].

Метою дослідження є підвищення адекватності моделі тліючого розряду, котра описує реальну картину елементарних процесів створення основних зарядоносіїв елементів радіотехнічних пристроїв.

Для вирішення цієї задачі необхідні дослідження фізичних процесів, що призводять до створення плазмового середовища з новими властивостями, що задовольняють сучасним вимогам плазмової та радіотехніки. Це можливо в газовому розряді, де стан плазми та її властивості формуються великою кількістю складних явищ у залежності від прикладеної електричної енергії, тиску, роду газу, матеріалу електродів та геометрії розрядного

проміжку. Реалізація наведених задач потребує глибокого вивчення плазми, створення нових методів її отримання та засобів діагностики.

**Дослідження елементарних процесів прикатодної області** Єдиною зоною випромінювання в катодній області, є плазма від'ємного світіння зі слабкою напруженістю електричного поля. В плазмі проходять інтенсивні процеси іонізації та збудження нейтральних частинок газу під впливом первинних електронів. Зникнення зарядоносіїв відбувається в процесах рекомбінації, дифузії у сусідні зони та амбіполярної дифузії на стінках розрядної камери.

Результати досліджень [8] тліючого розряду дозволяють обґрунтовано зробити висновок про те що, механізм елементарних процесів катодної області повністю забезпечує самостійне існування всього тліючого розряду. Тому правомірним є припущення, за яким будова теорії тліючого розряду без позитивного стовпа, повинна бути більш простою задачею. Але це зовсім не так.

Через недостатність інформації про механізм руху зарядоносіїв у сильно неоднорідному електричному полі, відсутність глибоких експериментальних досліджень по визначенню точного місцеутворення електронів та іонів, а також складного характеру взаємодії зарядів із нейтральними частинами газу та обмежувачими поверхнями, побудова загальної території короткого тліючого розряду є складною проблемою. Навіть конкретне визначення залежності загальної щільності розрядного струму, як функції потенціалу в катодній області є складним питанням.

Ця складність обумовлена тим, що для отримання в явному вигляді необхідно мати розподіл напруженості електричного поля, просторового заряду, потенціалу та щільності електронного та іонного струмів у катодній області тліючого розряду. Експериментальний розподіл в основному, має прямолінійно спадаючий характер, а на кордоні з від'ємним випромінюванням має більш круто спадаючий вигляд (рис.1).

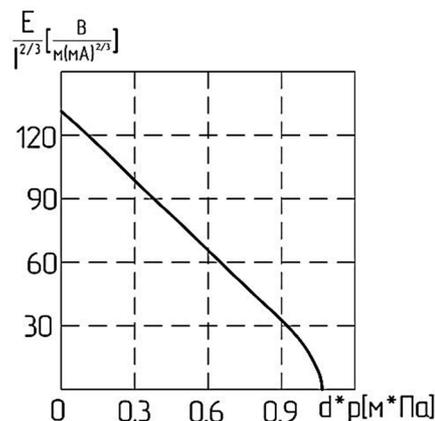


Рис.1. Розподіл напруженості електричного поля в просторі катодного падіння потенціалу

**Обґрунтування та побудова адекватної моделі тліючого розряду** На основі теоретичних досліджень із [1-3, 8], модель тліючого розряду є наступною:

1. У катодній області тліючого розряду основні елементарні процеси, котрі підтримують розряд, відбуваються в темному кружковому просторі, тобто в просторі падіння потенціалу.

2. Основним струмом на катоді є іонний струм, а на аноді – електронний.

3. Створення основних зарядів проходить у просторі падіння за рахунок ударної іонізації електронами.

4. У просторі падіння потенціалу локалізований великий об'ємний заряд позитивних іонів, оскільки електрони швидко рухаються до аноду, а іони, що мають більш повільні швидкості, залишаються.

5. Створення основних зарядів проходить в просторі падіння за рахунок ударної іонізації електронами.

6. У плазмі від'ємного випромінювання проходить збудження атомів та молекул газу електронами, рекомбінація повільних електронів та іонів, а також амбіполярна дифузія зарядоносців на стінки розрядної камери.

7. Зникнення електронів та іонів проходить у результаті виходу їх на електроди, в процесах рекомбінації та амбіполярної дифузії.

На основі цієї моделі можливо записати рівняння Пуассона та неперервність для стаціонарного режиму розряду:

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi[\rho_i(x) - \rho_e(x)],$$

$$\alpha n_e - \beta n_e^2 - D_\alpha \Delta n_e = 0,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт рекомбінації електронів та іонів;  $D_\alpha$  – коефіцієнт амбіполярної дифузії.

Для щільності струмів  $j_e(x)$  та  $j_i(x)$ , у відповідності із наведеною вербальною моделлю, можна записати:

$$j_e(x) = en_e k_e E; \quad j_i(x) = en_e k_i E,$$

$$j_0 = j_e(x) + j_i(x).$$

Розподіл напруженості електричного поля, згідно з [5, 6], приймається лінійним.

$$E(x) = E_k \left[ 1 - \frac{x}{d_k} \right],$$

$$V(x) = \int_0^{d_k} E(x) dx,$$

де  $d_k$  – товщина темного крукового простору.

Граничні умови на катоді коли  $x = 0$ , мають вигляд

$$j_{ek} = \gamma j_{ik}, \quad iE_k = \frac{2V_k}{d_k}.$$

За умови, що  $x = d_x$  на аноді  $j_0 = j_{ed}$  та  $E(x=d) = 0$ .

За лінійним розподілом  $E(x)$  автори [7] знайшли залежність  $\gamma_0 = f(V_k)$  у вигляді:

$$j_0 = \frac{K_i V_k^2}{\pi d_k^3} (1 + \gamma),$$

що визначає вольт-амперну характеристику для простору падіння потенціалу.

Однак цей вираз вольт-амперної характеристики, котрий отримано за вказаною теорією з експериментом, має досить наближений збіг. В роботі [7] це спостерігається лише для нормального та слабоаномального тліючого розряду. Висновки, отримані в теоріях із лінійним розподілом  $E(x)$ , не можуть бути точними та жорсткими, тим більше загальними для всієї катодної області, оскільки умова  $x = d_k$  приймається за базову на аноді (рис. 2).

В результаті ці теорії усувають із розгляду від'ємне випромінювання, без якого тліючий розряд не працює. Крім того, експериментальні дослідження [9] за вимірами електричного поля в темному круковому просторі, показали що  $E(x)$  не є лінійною та в кінці цього простору на межі від'ємного випромінювання має місце круте падіння  $E$  до нульового значення, після чого напруженість електричного поля змінює напрям.

Вважаємо, що ближче до реальної теорії катодної області знаходяться ті небагаточисельні теорії, котрі враховують вплив та роль від'ємного випромінювання на розряд в цілому.

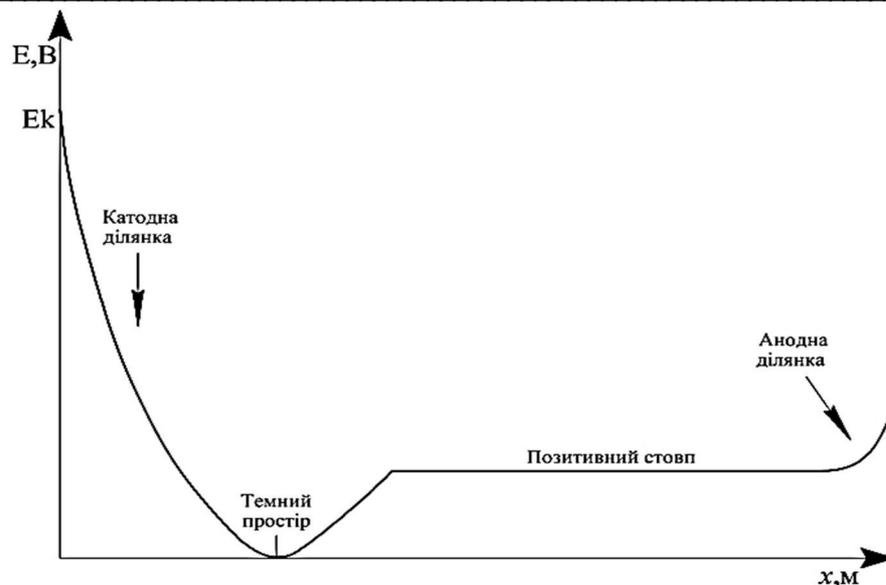


Рис. 1. Напруженість електричного поля в газовому розряді

Але в більшості теоретичних робіт цього не робиться. Наприклад, ряд авторів у своїх дослідженнях [10] повністю ігнорують потік позитивних іонів із від'ємного випромінювання, інші [11], хоч і визнають це, але вважають цей потік дуже малим та нехтують його внеском в процеси на катоді. Як ті, так і інші вважають, що всі позитивні іони, утворені процесами, створюються процесами тільки в темному круковому просторі.

У протилежність цьому автори [12] показують, що роль цих іонів значна та складає більше 25% всіх іонів, що створюють вторинну електронну емісію на катоді.

Розраховуючи зростання загальної щільності струму в аномальному режимі розряду в аргоні з залізним катодом, у [10] стверджується, що величина та зростання обумовлені процесами на катоді (що утворюють струм  $I_{ca}$ ) та процесами в об'ємі газу (що утворюють струм  $I_{cr}$ ), де є сильне електричне поле крукового темного простору. На протилежність цьому твердженню, частина досліджень [3, 12] показує, що сумарне значення струмів  $I_{ca}$  та  $I_{cr}$ , обумовлених процесами на катоді та у круковому просторі в таких розрядах, як у гелії та неоні менше, ніж загальне експериментальне значення  $I_{total}$ , тобто:

Очевидно, що тут не вистачає тієї частини щільності струму  $I_{cr}$ , що обумовлена потоком позитивних іонів із плазми від'ємного випромінювання. Тому розподіл струмів у катодній області неможливо розглядати без урахування зарядоносіїв, що створені у від'ємному випромінюванні.

Розподіл напруженості електричного поля в нормальному та аномальному розряді також необхідно представляти через позитивний просторовий заряд іонів, що утворюються, як в темному круковому просторі, так і у від'ємному випромінюванні. Внаслідок цього, розподіл потенціалу в катодній області буде реальним тільки у випадку врахування процесів, що відбуваються у від'ємному випромінюванні.

Розглянутий ряд протиріч у сучасній теорії катодної області тліючого розряду свідчить про неточність прийнятих допущень та обмежень її моделі, в котрій елементарні процеси та їх взаємний зв'язок враховується не в повній мірі. Як наслідок, представляється неточним увесь механізм процесів тліючого розряду. Такий стан теорії обумовлений не стільки суб'єктивізмом підходів авторів досліджень, скільки різноманітним та досить складним зв'язком елементарних процесів розряду, де складно визначити роль та ступінь впливу кожного процесу в залежності від режиму розряду, тиску, роду газу та матеріалів електродів.

Окрім того, в теперішній час немає достатньо надійних експериментальних результатів про функцію розподілу електронів та іонів за енергіями та в кожній точці міжелектродного проміжку. Отримані результати та їх інтерпретація часто досить суперечливі та не можуть дати реальної картини.

Недостатньо експериментально вивчені процеси, що характеризують взаємодію первинних електронів із плазмою від'ємного випромінювання в залежності від режиму розряду, комбінації роду газу та матеріалу катоду.

Дослідження проблем катодної області в короткому тліючому розряді з плоскопаралельними електродами є далеко незавершеним. Тліючий розряд має просторову неоднорідність, котра обумовлена наявністю достатньо великого числа розрядних зон між електродами, амбіполярної дифузії та інше. В кожній із цих зон переважає один із кількох елементарних процесів. У зв'язку з цим виникає необхідність послідовно вивчати окремі розрядні зони та найбільш важливі елементарні процеси в них, а потім перейти до встановлення взаємодії зв'язку між ними. Для досягнення цієї мети потрібно шукати більш прості форми тліючого розряду, в котрому зарядносії мали б не дуже складну форму руху. Для отримання більш простого реального механізму елементарних процесів у розряді, що створюється, необхідно уникати збурюючих впливів, як, наприклад, нестабільність розряду, обмежуючі стінки розрядної трубки т.п.

**Висновки** У рамках статті був проведений аналіз елементарних процесів тліючого розряду. У результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

Вторинна електронна емісія на катоді при низькому та середньому катодному падінні, де  $\varepsilon_i \leq 600$  eV, виникає за рахунок потенціальної енергії іона, що бомбардує катод.

Плазма від'ємного випромінювання має дуже малий об'єм, а плазма порожнистого катоду має невелику відкриту поверхню. Усунення цього недоліку є значною та досить ускладненою науковою проблемою, але вельми важливою для прикладного значення.

Для отримання більш реальної фізичної картини елементарних процесів та уточнення теорії тліючого розряду необхідні подальші дослідження наступних питань:

- дослідження основного місцеутворення позитивних іонів, котрі утворюють вторинну електронну емісію на катоді;
- визначення  $\delta$  - процесів та інших процесів, що відбуваються на катодному та анодному кордонах плазми від'ємного випромінювання;
- дослідження взаємодій первинних електронів з плазмою від'ємного випромінювання в залежності від режиму розряду та комбінації роду газу та матеріалу катода.

### Список використаної літератури

1. Smirnov B. M. Theory of Gas Discharge / B. M. Smirnov // Plasma Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland. – 2015. – P 423.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Москва : Интеллект, 2009. – 736 с.
3. Hantzsche E. Theory of the cathode case / E. Hantzsche, L. Wiczorek // Contributions from Plasma physics. – 1965. – Vol. 5, No. 4. – PP. 255-258.
4. Ward A.L. Calculations of cathode-fall characteristics / A. L. Ward // Journal of Applied Physics. – 1962. – Vol. 33., No. 9. – PP. 2789-2794.
5. Бронин С. Я. О нормальной плотности тока в несамостоятельном тлеющем разряде / С. Я. Бронин, В. М. Колобов, В. Н. Сушкин, В. И. Шабашов, Ю. В. Ярцев // Теплофизика высоких температур. – 1980. – Т. 18, № 1. – С. 46-54.
6. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 543 с.
7. Lucas J. Glow discharge / J. Lucas // British Journal of Applied Physics. – 1963. – V. 14. – PP. 714-718.

8. Шефер О. В. Аналіз закономірностей зміни властивостей електричного розряду, як запорука покращення якості функціонування радіонавігаційних систем / О.В. Шефер // Системи управління навігації та зв'язку. – 2017. – №1(41). – С. 31-35.
9. Warren R. Interpretation of field measurements in the cathode region of glow discharges / R. Warren // Physical Review. – 1955. – Vol. 98, No. 6. – PP. 1650-1658.
10. Francis V. J. Electrical Discharges / V. J. Francis, H. G. Jenkins // Rep. Phys. Soc. Progr. Phys. – 1980. – No. 7. – PP. 226-230.
11. A. Von Engel. Electric plasmas: their nature and uses / A. Von Engel. – London, Taylor and Francis, Ltd., 1983. – 254 p.
12. Emeleus K. G. The negative and of cold cathode glow discharge / K. G. Emeleus // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1981. – Vol. 14, No.12. – PP. 2179-2187.

#### References

1. Smirnov B. M. Theory of Gas Discharge // Plasma Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland. – 2015. – P 423.
2. Rayzer Yu. P. Gas discharge physics. – Moskva : Intellekt, 2009. – 736 p.
3. Hantzsch E., Wicczorek L. Contributions from Plasmaphysics // Contributions from Plasmaphysics – 1965. – Vol. 5, No. 4. – PP. 255-258.
4. Ward A. L. Calculations of cathode-fall characteristics // Journal of Applied Physics. – 1962. – Vol. 33., No. 9. – PP. 2789-2794.
5. Bronin S. Ya., Kolobov V. M., Sushkin V. N., Shabashov V. I., Yartsev Yu. V. The normal current density in the non-self glow discharge // Teplofizika vyisokih temperatur. – 1980. – Vol. 18, No. 1. – PP. 46-54.
6. Granovskiy V. L. Electric current in gas. Steady current. – Moskva : Nauka, 1971. – 543 p.
7. Lucas J. Glow discharges // British Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 14. – PP. 714-718.
8. Shefer O. V. Analysis of electric discharge properties variation mechanisms as an improving key of radio navigational systems quality // Systems of control, navigation and communication. – 2017. – No. 1(41). – PP. 31-35.
9. Warren R. Interpretation of field measurements in the cathode region of glow discharges // Physical Review. – 1955. – Vol. 98, No. 6. – PP. 1650-1658.
10. Francis V. J., and H. G. Jenkins: Electrical Discharges // Rep. Phys. Soc. Progr. Phys. – 1980. – No. 7. – PP. 226-230.
11. A. Von Engel. Electric plasmas: their nature and uses. – London, Taylor and Francis, Ltd., 1983. – 254 p.
12. Emeleus K. G. The negative and of cold cathode glow discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1981. – Vol. 14, No. 12. – PP. 2179-2187.

#### *Автор статті*

**Шефер Олександр Віталійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та електропривода, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.  
Тел.: +380 (50) 183 83 03. E-mail: avs075@ukr.net

#### *Author of the article*

**Shefer Oleksandr Vitaliiiovych** – candidate of sciences (technic), associate professor of the automation and electrodrive, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel.: +380 (50) 183 83 03. E-mail: avs075@ukr.net

Дата надходження  
в редакцію: 21.01.2017 р.

Рецензент:  
доктор технічних наук, професор С. В. Козелков  
Державний університет телекомунікацій, Київ