

УДК 537:525

## **Моделювання тріодних електродних систем високовольтного тліючого розряду з урахуванням термодинамічних параметрів анодної плазми**

*Чернятинський І.О., П'ясецька Н.І., д.т.н., проф. Мельник І.В.*

Сьогодні широке впровадження в електронній промисловості знаходять газорозрядні електронні гармати, які відрізняються відносною простотою конструкції як самої гармати, так і вакуумного обладнання, необхідного для її відкачування, простотою керування струмом електронного пучка, а також високою стабільністю роботи у низькому вакуумі в середовищі різних газів, зокрема активних. Головними галузями застосування таких гармат є високопродуктивне зварювання та паяння тонкостінних виробів, нанесення складних керамічних плівок у середовищі активних газів, вакуумний переспав тугоплавких металів [1]. Зазвичай для керування струмом розряду у таких гарматах використовується газодинамічне керування шляхом зміни тиску газу у розрядному проміжку, однак цей метод є дуже інерційним [2]. Стала часу для процесу газодинамічного керування залежить від режимів горіння розряду та зазвичай складає близько кількох секунд, що є непридатним для сучасних електронно-променевої технологій [3, 4]. Тому сьогодні широке впровадження у промисловості

знаходять тріодні електронні гармати високовольтного тліючого розряду, де керування струмом розряду здійснюється подаванням керувальної напруги порядку десятків-сотень вольт на керувальний електрод [5]. Зазвичай низковольтний розряд запалюється у порожнині аноду високовольтного розряду через подавання позитивного потенціалу на кільцевий керувальний електрод. Схема підключення тріодної електронної гармати високовольтного тліючого розряду та її спрощена конструкція із визначенням головних конструктивних розмірів наведені на Рис. 1.

Нещодавно були запропоновані математичні моделі тріодних електродних гармат високовольтного тліючого розряду, які базуються на аналітичному розв'язуванні рівняння балансу заряджених часток у об'ємі анодної плазми [5, 6].

Фізико-топологічна модель, яка була запропонована та розглянута у роботах [5, 6], базується на визначенні об'єму анодної плазми та її положення відносно катоду  $d_{\text{кп}}$ . Це пов'язано з тим, що в електродних системах високовольтного тліючого розряду

(ВТР) анодна плазма зазвичай розглядається як джерело іонів та як рухомий прозорий електрод, потенціал якого визначаються тиском газу та потенціалом на керувальному електроді [5, 6]. Тому суттєвим недоліком моделі, яка була запропонована у роботах [5, 6], є те, що термодинамічні параметри анодної плазми в ній не розраховувались згідно із степінню іонізації газу та рухомістю заряджених часток у плазмі, а були взяті із довідникової літератури [7, 8]. Це дещо обмежує можливості використання розроблених засобів моделювання та знижує його точність. Тому метою даної роботи є розробка більш універсальної моделі тріодного розрядного проміжку ВТР, у якій термодинамічні параметри анодної плазми розраховуються через напруги горіння основного та допоміжного розрядів та тиск у розрядній камері гармати  $p_{a0}$ .

запалювання допоміжного розряду; 4 – низьковольтний ізолятор; 5 – високовольтний ізолятор; 6 – анодна плазма; 7 – межа анодної плазми; 8 – електронний пучок

**Алгоритм розрахунку термодинамічних параметрів анодної плазми та положення плазмової межі відносно катода.** Ітераційний алгоритм розрахунку положення плазмової межі у плоскоелектродній квазіодномірній системі ВТР, схема якої наведена на Рис. 1, має наступний вигляд.

1. На основі співвідношень, наведених у роботах [5, 6], з використанням довідникових даних із робіт [7, 8], обчислюється проміжне значення  $d_{кп}$ .
2. На основі співвідношень, наведених у роботах [5, 6], струм розряду та степінь іонізації газу.
3. Для визначеної степені іонізації газу, прискорювальної напруги  $U_{пр}$  та напруги горіння допоміжного розряду  $U_{д}$  визначається температура електронного газу в анодній плазмі та рухомість повільних електронів у ній. Для проведення цих обчислень використовуються співвідношення [9]:

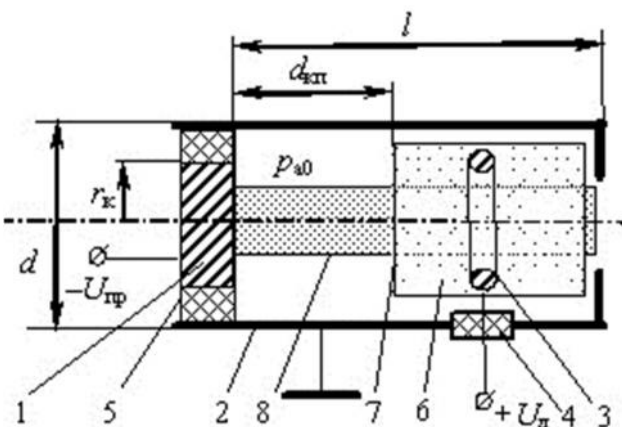


Рис. 1 Конструктивна схема тріодного розрядного проміжку та схема підключення джерела електронів  
 1 – катод; 2 – анод ВТР, який є катодом допоміжного розряду; 3 – кільцевий електрод для

$$T_e = \frac{eU_{д}}{2k} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\pi e^2 m_i}{6m_e} \left( \frac{U_{пр} d_{кп}}{p_{a0} Q_{ea}} \right)^2} \right), \quad (1)$$

$$\mu_{e0} = \frac{ap_{a0}d_{\text{кп}}}{U_{\text{пр}}} + b,$$

де  $U_{\text{пр}}$  – прискорювальна напруга,  $U_{\text{д}}$  – напруга горіння допоміжного розряду,  $p_{a0}$  – приведений тиск у розрядній камері,  $T_e$  – температура електронів у плазмі,  $\mu_{e0}$  – їхня рухомість,  $k$  – стала Больцмана,  $m_e$  – маса електрона,  $m_i$  – маса іонів газу,  $d_{\text{кп}}$  – відстань від плазми до катода,  $Q_{ea}$  – поперечний перетин зіткнення електронів із атомами залишкового газу,  $a, b$  – напівемпіричні сталі.

4. Перерахунок значення відстані від поверхні катода до межі анодної плазми за співвідношенням:

$$d'_{\text{кп}} = \frac{p_{a0}Q_{ea}}{U_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{6m_e}{\pi e^2 m_i} \left( \left( \frac{2kT_e}{eU_{\text{д}}} - 1 \right)^2 - 1 \right)} \quad (2)$$

5. За новими значеннями  $T_e$  та  $\mu_{e0}$ , згідно із системою рівнянь, отриманою у роботах [5, 6], розраховуються оновлені значення  $d''_{\text{кп}}$ .

6. За знайденими значеннями  $d'_{\text{кп}}$  та  $d''_{\text{кп}}$  методом золотого перетину знаходимо нові значення  $d_{\text{кп}}^{r1}$  і  $d_{\text{кп}}^{r2}$  із пропорції:

$$\frac{d'_{\text{кп}} - d''_{\text{кп}}}{d_{\text{кп}}^{r1} - d_{\text{кп}}^{r2}} = \frac{d'_{\text{кп}} - d''_{\text{кп}}}{d_{\text{кп}}^{r2} - d_{\text{кп}}^{r1}} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}. \quad (3)$$

7. Визначені значення  $d_{\text{кп}}^n$ ,  $d_{\text{кп}}^{r1}$  та  $d_{\text{кп}}^{r2}$  підставляються в перше рівняння системи (1) для розрахунку середніх значень температури електронного

газу  $T_e(d_{\text{кп}}^n)$ ,  $T_e(d_{\text{кп}}^{r1})$  та  $T_e(d_{\text{кп}}^{r2})$ .

8. Обчислюється різниця температур  $T_e(d_{\text{кп}}^n) - T_e(d_{\text{кп}}^{r2})$  та  $T_e(d_{\text{кп}}^{r1}) - T_e(d_{\text{кп}}^{r2})$ .

9. У разі, якщо

$$T_e(d_{\text{кп}}^n) - T_e(d_{\text{кп}}^{r2}) > T_e(d_{\text{кп}}^{r1}) - T_e(d_{\text{кп}}^{r2}) \quad (4)$$

вважаємо, що,  $d_{\text{кп}}^n = d_{\text{кп}}^{r1}$ , інакше –  $d_{\text{кп}}^n = d_{\text{кп}}^{r2}$ .

10. Завершення розрахунків за умови  $|d_{\text{кп}}^{r1} - d_{\text{кп}}^{r2}| < \varepsilon$ . У цьому випадку вважається, що

$$d_{\text{кп}} = \frac{d_{\text{кп}}^{r1} + d_{\text{кп}}^{r2}}{2}, \quad (5)$$

у противному випадку – перехід до пункту 3.

11. Згідно із співвідношеннями, наведеними у роботі [6], для визначеного значення  $d_{\text{кп}}$  розраховуються енергетичні характеристики розряду.

**Аналіз отриманих результатів моделювання та оцінка обчислювальної ефективності запропонованого алгоритму.** Розрахунки з використанням співвідношень (1 – 4) проводились для наступних зовнішніх та внутрішніх параметрів електродної системи: робочий газ – азот, матеріал катода – алюміній, матеріал анода – мідь,  $l = 7$  см,  $r_{\text{к}} = 5$  см,  $Q_{ea} = 5,3 \cdot 10^{-19}$  м<sup>-2</sup>,  $a = 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ ,  $b = 25,4 \frac{\text{М}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ . Отримані залежності енергетичної ефективності

тріодної електронної гармати ВТР від прискорювальної напруги та напруги горіння допоміжного розряду наведені на Рис. 2. Зрозуміло, що к.к.д. електронної гармати збільшується із зростанням прискорювальної напруги та напруги допоміжного розряду.

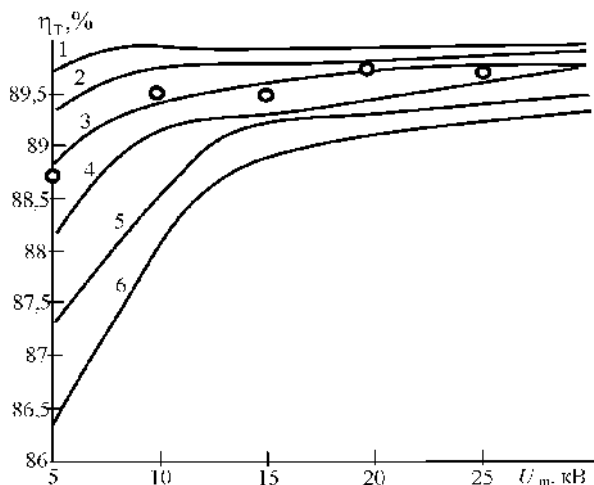


Рис. 2. Розрахункові залежності енергетичної ефективності тріодних джерел електронів від прискорювальної напруги та напруги горіння допоміжного розряду.

$p_{a0} = 0,5$  Па; 1 –  $U_d = 80$  В, 2 –  $U_d = 70$  В,

3 –  $U_d = 60$  В, 4 –  $U_d = 50$  В, 5 –  $U_d = 40$  В, 6 –  $U_d = 30$  В.

Точками відмічені відповідні експериментальні дані

Розбіжність між отриманими результатами моделювання, які наведені на Рис. 2, та результатами, які були отримані у роботі [6], складає не більше 10 – 15%. Найбільша розбіжність спостерігається для низьких та високих значень напруги горіння допоміжного розряду, а для середніх значень отримані розрахункові результати майже

співпадають із попередніми. Це можна пояснити тим, що під час проведення розрахунків за методикою, запропонованою у роботі [6], значення температури електронного газу та рухомості електронів в анодній плазмі визначались відповідно до усереднених значень керувальної напруги та тиску газу у розрядному проміжку.

Тому слід відзначити, що залежності, які наведені на Рис. 2, більше відповідають експериментальним даним для тріодних систем ВТР, які були досліджені. Наприклад, можна бачити, що для залежності 3 розбіжність теоретичних та експериментальних даних не перевищує 10%, а для результатів, отриманих у роботі [6], вона складала більше 25%. Також похибки моделювання безпосередньо пов'язані із способом визначення напівемпіричних коефіцієнтів запропонованої моделі.

Проте недолік запропонованої у роботі методики полягає у тому, що використання ітераційних співвідношень (3 – 5) потребує значно більшого часу комп'ютерних розрахунків для визначення положення межі анодної плазми, ніж спрощені аналітичні розрахунки за формулами, наведеними у роботі [6]. Наприклад, під час проведення тестових розрахунків під час обчислення 30 значень енергетичної ефективності час розрахунків за запропонованим алгоритмом складав  $5,2 \cdot 10^7$  процесорних циклів, а за методикою, яка була використана у роботі [6] –  $4,3 \cdot 10^5$  процесорних

циклів. Проте, з урахуванням того, що на персональному комп'ютері із процесором Intel Core i7, тактова частота 3 ГГц, об'єм оперативної пам'яті 2 Гб, час розрахунку задачі за запропонованим алгоритмом становив менше однієї хвилини, цей недолік на сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки можна вважати несуттєвим.

### Висновки

Ітераційний алгоритм розрахунку енергетичної ефективності тріодних джерел електронів ВТР, який запропонований у роботі, базується на проведенні оцінки температури та рухомості повільних електронів в анодній плазмі з використанням формул (1 – 5). Ці співвідношення базуються на обчисленні об'єму плазми на основі комплексного аналізу фізичних процесів, які протікають в області анодної плазми та в області катодного падіння потенціалу. Взагалі формули (1 – 5) є наслідком умови рівноваги плазмової межі як результату дії сили електричного поля з боку області катодного падіння потенціалу та сили кинетичного тиску з боку області анодної плазми. Тестові випробування запропонованого алгоритму показали, що алгоритм є досить універсальним і його збіжність гарантовано забезпечується у широкому діапазоні параметрів горіння ВТР, які зазвичай притаманні газорозрядним електронним гарматам у стабільному режимі їхньої роботи.

Іншою перевагою запропонованого алгоритму є те, що він не потребує використання

літературних даних про параметри анодної плазми ВТР та їхньої апроксимації. Запропонована модель є точною та адекватною. Для досліджених режимів розряду розбіжність між теоретичними та експериментальними даними складала біля 10 – 15%. Для спрощеної аналітичної моделі, яка була запропонована раніше та побудована на апроксимації довідникових та експериментальних даних про температуру повільних електронів у плазмі та їхню рухомість, розбіжність розрахункових та експериментальних даних для деяких стабільних режимів горіння ВТР, зокрема для малих та великих струмів, перевищувала 25%.

Отримані результати можуть зацікавити інженерів, які займаються розробкою електронно-променевого технологічного обладнання як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Можливості оцінки уточненого значення енергетичної ефективності тріодних джерел електронів ВТР дають можливість розробляти на їхній основі ефективне електронно-променево обладнання нового покоління.

### Література

1. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках.* // Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. – М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
2. *Денбновецький С.В., Костюченко К.О., Мельник В.І., Мельник І.В.,*

- Тугай Б.А.                      Моделювання процесу автоматичного керування струмом газорозрядного електропроменевого нагрівача. – Електроніка та зв'язок, том 9, № 22, 2004. – С. 15-17.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
4. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. - 528 с.
5. Мельник И.В.,                      Тугай С.Б. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – Т. 55. – № 11. – 2012. – С. 50-59.
6. Денбновецкий                      С.В., Мельник І.В.,                      Мельник В.Г.,
- Тугай С.Б. Моделювання вольт-амперних характеристик тріодних технологічних джерел електронів високовольтного тліючого розряду з урахуванням процесів взаємодії заряджених часток в анодній плазмі // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – №5 (85) – 2012. – С. 12 – 18.
7. Грановский В.Л. Электрический ток в газах. Том 1. Общие вопросы электродинамики газов. – М.–Л.: Гос. изд. технико-теоретич. литературы, 1952. – 432 с.
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
9. Синкевич О.А., Стаханов И.П. Физика плазмы. Стационарные процессы в частично ионизированном газе. Учебное пособие для вузов. – М.: «Высшая школа», 1991. – 191 с.