

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 537.525

С.Б. Турай

Дослідження енергетичних характеристик тріодної газорозрядної гармати з холодним катодом

Проведено експериментальне дослідження енергетичних характеристик тріодної електронної гармати з холодним катодом, порожнистим анодом та циліндричним керуючим електродом. Приведені розподіл теплового навантаження в електродній системі гармати в різних режимах роботи та основні її енергетичні параметри. Показано, що в тріодній електродній системі з алюмінієвим катодом можливе генерування електронних пучків потужністю десятки кВт.

Experimental investigation of energy characteristics of triode electron gun with cold cathode, hole anode and cylindrical control electrode has been provided. Heat loading distribution in electrode structure of model in different operation modes and main energetic parameters are presented. Possibility of powerful electron beams generation in range up to tens of kW in triode electrode structure with cold aluminium cathode is proved.

Ключові слова: електронно-променевої технології, високовольтний тліючий розряд, тріодні газорозрядні гармати з холодним катодом, імпульсний режим роботи, енергетичний баланс.

Вступ

Електронні гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР) з холодним катодом знаходять широке застосування в електронно-променевих технологічних процесах, що виконуються при тиску вище 10^{-2} Па, особливо з використанням реактивних газів. Такі гармати надійно працюють в широкому діапазоні тиску, не критичні до складу газового середовища, відрізняються надійністю та довговічністю холодного катоду, відносно прості конструктивно та в експлуатації. Найбільш широке застосування газорозрядні гармати отримують для плавки хімічно активних та тугоплавких металів, нанесення покриттів із хімічних сполук шляхом їх випаровування, зварювання матеріалів в середньому та низькому вакуумі [2, 3, 4].

Керування потужністю електронного пучка в гарматах ВТР в безперервному режимі роботи

здійснюється зміною робочого тиску в розрядному проміжку за допомогою контрольованого напуску газу в гармату при безперервному її відкачуванні. Стала часу при такому регулюванні струму розряду становить не менше сотень мілісекунд, тому для малоінерційного керування струмом розряду використовують допоміжні розряди, що запалюються в розрядному проміжку подачею на електрод, розташований в розрядному проміжку, потенціалу десятки-сотні Вольт. Стала часу при такому керуванні струмом розряду залежить від інерційності процесів в анодній плазмі розряду і становить менше однієї мілісекунди, що дозволяє здійснювати малоінерційне керування потужністю електронного пучка, наприклад його модуляцію шляхом подачі на електрод відповідних імпульсів напруги [5].

В опублікованих матеріалах, присвячених тріодним електронним гарматам високовольтного тліючого розряду, наводяться в основному результати дослідження керування їх енергетичними параметрами, і недостатньо вивчені особливості генерації електронних пучків в тріодних електродних системах та їх енергетичні характеристики [1, 5].

В статті приводяться результати експериментального дослідження енергетичних характеристик тріодної електродної системи з холодним катодом, порожнистим анодом та циліндричним керуючим електродом, розподілу енергії на електродах системи та визначення к.к.д. газорозрядної гармати при різних режимах її роботи.

Методика та техніка експерименту

Дослідження енергетичних характеристик газорозрядної гармати тріодного типу проводилося на експериментальному стенді (рис. 1). У вакуумній камері установки розміщувався макет тріодного джерела електронів, який мав розбірну конструкцію, що забезпечувала необхідну заміну вузлів і деталей в процесі досліджень. Живлення макета здійснювалося від високовольтного блоку з регульованою напругою до 25 кВ. До складу стенду входили також блоки та пристрої для живлення допоміжного розряду в безперервному та імпульсному режимі, контролю вакууму в камері, вимірювання параметрів розряду і електронного

пучка та інших операцій. Потужність, що виділялась на електродах макета, та потужність електронного пучка вимірювались калориметричним методом з точністю близько 8 %. Вимірювання електричних величин здійснювалося за допомогою стандартних приладів з класом точності 1,5. Імпульсні електричні величини вимірювались за допомогою електронних осцилографів С8-17 та SDS1000. При цьому при вимірюванні потужності в імпульсному режимі бралось усереднене значення за період, яке обчислювалось шляхом інтегрування осцилограм імпульсів струму по часу, тобто

$$\bar{W} = \frac{\int U(t)I(t)dt}{T},$$

де $I(t)$ – значення струму, зчитані з осцилограми; $U(t)$ – прискорююча напруга; $\bar{W}$ – усереднене значення потужності; T – період імпульсу.

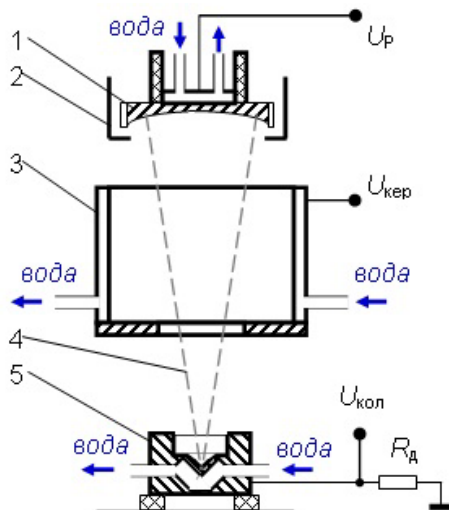


Рис. 1. Схема дослідного макету тріодної гармати ВТР (1 – холодний катод; 2 – анод; 3 – керуючий електрод; 4 – електронний пучок; 5 – колектор)

В ВТР визначальним емісійним процесом є генерація електронів з поверхні холодного катоду під дією часток, що бомбардують катод. Вона характеризується узагальненим коефіцієнтом γ (число електронів, що вибиваються з катоду в розрахунку на одну частку, що падає), який визначається наступним чином [1]:

$$\gamma \approx \frac{j_{ек}}{j_{ік}} \approx \gamma_i \left(1 + \frac{\gamma_a j_{ак}}{\gamma_i j_{ік}} \right), \quad (1)$$

де γ_i – коефіцієнт електронної емісії під дією іонів; γ_a – коефіцієнт електронної емісії під дією швидких нейтральних атомів, що утворюються при перезарядженні іонів в області катодного падіння потенціалу; $j_{ек}$, $j_{ік}$, $j_{ак}$ – густина потоків електронів, іонів та швидких нейтраль-

них атомів відповідно. При цьому коефіцієнт γ залежить не тільки від властивостей катоду, але і від процесів у розрядному проміжку.

Катод ВТР в процесі роботи піддається бомбардуванню іонами та нейтральними атомами, при якому відбувається його нагрівання, десорбція газу, дефектоутворення на емісійній поверхні, розпилення атомів, імплантація іонів. При цьому холодні катоди ВТР повинні забезпечувати стабільну в часі густину струму емісії зі збереженням заданої форми поверхні емітера, тобто мати достатньо високий коефіцієнт іонно-електронної емісії і малий коефіцієнт катодного розпилення. Вони повинні забезпечувати стійку роботу в сильних електричних полях, швидко стабілізувати свої параметри після включення, бути достатньо технологічними. Широке використання в електронних гарматах ВТР отримують катоди з алюмінію і його сплавів. Наявність на поверхні алюмінію плівки Al_2O_3 забезпечує відносно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії, а відносно висока теплопровідність алюмінію дозволяє відводити необхідну енергію при охолодженні катоду [2].

В умовах технологічних вакуумних систем аналіз процесів на катоді ускладнюється через невизначеність складу іонів і атомів, їх широкий енергетичний спектр та наявність на поверхні різних хімічних реакцій. При цьому визначення окремих потоків часток та їх емісійних коефіцієнтів значно утруднене, тому в даній роботі експериментально визначались інтегральні енергетичні характеристики холодного катоду ВТР. Проводилось калориметричне вимірювання потужності, яка виділяється на електродах ВТР, а потім розраховувалась середня емісійна здатність холодного катоду для конкретних умов розряду.

Результати експериментальних досліджень

В тріодній електродній системі ВТР для запалювання допоміжного розряду необхідний невеликий струм основного розряду (10-20 мА). Густина нейтральних часток в анодній плазмі такого розряду становить $n_e \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$; $kT_e \approx 1 \text{ eV}$; $E \approx 10^{-2} \text{ В/см}$ [1]. Запалювання в порожнині аноду допоміжного розряду при таких параметрах анодної плазми забезпечує інтенсивну іонізацію газу і, відповідно, збільшення густини іонного струму на катод. При цьому максимальна величина струму основного розряду обмежена густиною нейтральних часток в плазмі при заданому початковому

струмі розряду, який підтримується в розрядно-му проміжку відповідним тиском газу.

Енергетичні параметри електронного пучка, що генерується тріодною електродною системою, залежать від коефіцієнта іонно-електронної емісії катоду та параметрів іонного потоку, який генерується анодною плазмою та формується в області катодного падіння потенціалу.

Експериментальні дослідження показали, що коефіцієнт іонно-електронної емісії катоду при збільшенні напруги горіння розряду підвищується (рис. 2), а при збільшенні струму розряду знижується, що призводить до зниження к.к.д. і збільшення витрат енергії на електродах розрядного проміжку (рис. 3).

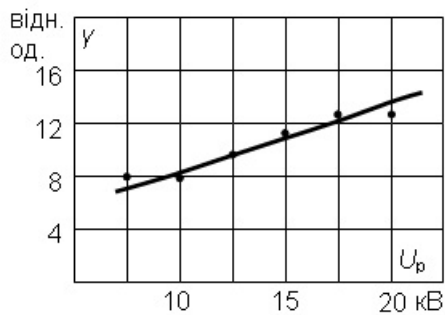


Рис. 2. Залежність коефіцієнта іонно-електронної емісії від прискорюючої напруги для алюмінієвого катоду. (Газ – повітря, $P = 2,3 \text{ Па}$, $U_{\text{кер}} = 200 \text{ В}$)

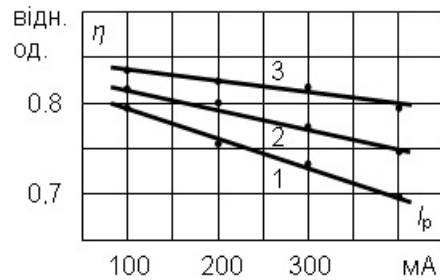


Рис. 3. Залежність к.к.д. тріодного джерела електронів ВТР від енергетичних параметрів розряду. (Прискорююча напруга: 1 – 15 кВ; 2 – 20 кВ; 3 – 25 кВ)

Глибина емісійного шару холодного катоду становить 100-200 атомних шарів, що обумовлює велику чутливість її до змін температури, тиску та роду залишкових газів, густини струму іонів, так як емісія під дією іонів може відбуватись і із шару адсорбованих газів. Як правило при забрудненні плівками газу або іншими атомами відбувається значне (в 2-5 раз) збільшення коефіцієнта емісії. Більш ефективним є покриття поверхні електропозитивними і легшими, ніж атоми основного матеріалу, елементами. Залежність коефіцієнта емісії для

покритої газовими шарами поверхні катоду має характер швидкого зростання при збільшенні енергії іонів приблизно до 20 кВ [1].

У зв'язку з цим на початку роботи розряду коефіцієнт іонно-електронної емісії буде мати більш високе значення. По мірі руйнування покриття і переходу до відносно очищеного катоду коефіцієнт емісії знижується. З урахуванням наведеного вище, при роботі розряду в імпульсному режимі очищення катоду від покриття в залежності від шпаруватості керуючих імпульсів буде частковим. Це можливо віднести і до покриття Al_2O_3 алюмінієвого катоду. Тому коефіцієнт емісії в імпульсному режимі, особливо при невеликій шпаруватості імпульсів, буде дещо більшим, ніж в стаціонарному режимі роботи, що підвищує к.к.д. тріодної електронної гармати з холодним катодом і зменшує долю енергії, яка виділяється на її елементах.

Так як допустима потужність розсіювання на електродах залежить від ефективності тепловідводу, що може обмежувати граничні параметри розряду, то в імпульсному режимі роботи гармати, де температурне навантаження на електроди є значно нижчим (рис. 4), можлива генерація тріодною електродною системою з алюмінієвим катодом, ефективність тепловідведення якого становить до $0,2 \text{ кВт/см}^2$, електронних пучків потужністю десятки кВт.

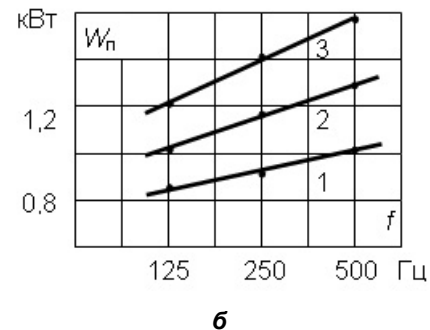
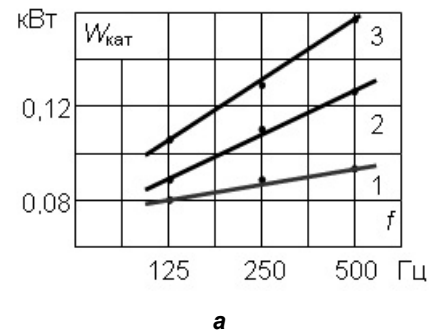


Рис. 4. Залежність потужності, що виділяється на катоді (а), та потужності електронного пучка від амплітуди та частоти керуючих імпульсів (б): 1 – 100 В; 2 – 200 В; 3 – 300 В. $\tau_i = 1 \text{ мс}$; $U_p = 16 \text{ кВ}$

Висновки

В результаті проведених досліджень показано, що:

- на енергетичні характеристики газорозрядної гармати визначальний вплив мають емісійні властивості холодного катоду;
- при використанні алюмінієвого катоду к.к.д. тріодного джерела електронів в залежності від режимів розряду досягає 80 – 85 %;
- при імпульсному режимі роботи тріодної гармати доля теплової енергії, що виділяється на катоді не перевищує 10% від загальної, що створює можливість генерації електронних пучків потужністю десятки кВт.

Література

1. *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
2. *Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б., Лапшук Т.В., Шмигидин В.Г., Кравчук Л.А., Гладков А.С.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. – К.: „Сталь”, 2007. – 605 с.
3. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. М. Машиностроение, 1978, 239 с.
4. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V.* High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations. // IEEE Transactions on plasma science. – Vol. 31, #5, October, 2003. – P. 987-993.
5. *Denbnovetsky S.V., Melnik V.I., Melnik I.V., Tugay B.A.* Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode. - XVIII-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, August 17-21, 1998, Eindhoven, The Netherlands, Proceedings, vol.2. - P. 637-640.