

Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 537.525

Дослідження електронно-оптичних характеристик тріодної газорозрядної гармати з холодним катодом

С.Б. Тугай

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, корпус 12, Київ, 03056, Україна.

В статті приводяться результати дослідження положення межі анодної плазми, яка впливає на геометричні параметри електронного пучка в тріодній гарматі високовольтного тліючого розряду з холодним катодом, як в безперервному, так і в імпульсному режимі роботи.

Для проведення досліджень використувався експериментальний стенд, який дозволяв візуально контролювати розрядний проміжок тріодної електронної гармати, для чого анод і керуючий електрод виконувались прозорими. В експерименті використовувались прямокутні імпульси з регульованою частотою та тривалістю одиниці-десятьки мс.

Дослідження показали, що при збільшенні струму розряду відбувається зменшення залежності положення межі анодної плазми від енергетичних параметрів гармати, що дозволяє здійснювати керування роботою гармати в режимі максимального струму без суттєвої зміни геометричних параметрів пучка електронів. Бібл. 7, рис. 3.

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

Вступ

В сучасних електронно-променевих технологічних процесах плавки тугоплавких металів, нанесення покриттів складних хімічних сполук та зварювання все частіше у якості джерел електронних пучків застосовуються електронні гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР) з холодним катодом. Перевагами таких гармат є надійна робота в середовищі хімічно активних газів в умовах середнього вакууму, довговічність холодного катоду, простота конструкції та експлуатації [1].

Керування енергетичними параметрами гармат ВТР з холодним катодом традиційно

здійснюється зміною тиску в розрядному проміжку. Проте, внаслідок інерційності газодинамічних процесів, такий спосіб унеможлиблює реалізацію ефективного імпульсного режиму роботи, що обмежує можливості застосування джерел електронних пучків ВТР в електронно-променевої технології.

Імпульсний режим роботи електронної гармати дозволяє в окремих випадках реалізацію технологічних операцій з кращими показниками якості [4]. Вибором параметрів імпульсного режиму роботи електронної гармати заданої потужності можливо здійснювати прецизійне керування швидкістю введення енергії в зону обробки та отримувати таким чином різні ефекти термічного впливу від плавлення до випаровування, не перегріваючи периферійні області розплаву, зменшуючи структурні дефекти та зберігаючи стехіометрію сполук, що випаровуються [6].

При реалізації імпульсного режиму роботи гармат ВТР застосовують електричний метод керування. Для цього на додатковий електрод, розміщений в розрядному проміжку, подається потенціал в десятки-сотні Вольт, і запалюється допоміжний низьковольтний несамоістийний тліючий розряд, що горить в області анодної плазми основного розряду [2]. При цьому підвищується ступінь іонізації газу в розрядному проміжку в області зайнятою анодною плазмою. Наявність додаткових заряджених часток призводить до зміни зовнішніх параметрів плазми та викликає збільшення іонного потоку на катод та збільшення струму основного розряду внаслідок вторинної іонно-електронної емісії.

В роботі [7] наведена можливість ефективної роботи такої гармати в імпульсному режимі. Стала часу при такому способі керування залежить від інерційності процесів в анодній плазмі і становить менше однієї мілісекунди. Проте в опублікованих матеріалах, присвячених тріодним електродним гарматам ВТР, недостатньо приділена увага формуванню геометрії

електронного пучка в імпульсному режимі роботи [2, 3, 5, 7].

В даній статті приводяться результати дослідження положення межі анодної плазми, яка впливає на геометричні параметри електронного пучка в тріодній гарматі ВТР з холодним катодом, як в безперервному, так і в імпульсному режимі роботи.

Методика та техніка експерименту

Дослідження геометричних параметрів анодної плазми ВТР в тріодній електродній системі здійснювалось на стенді, який використовувався при дослідженні енергетичних характеристик газорозрядної гармати тріодного типу [7]. Вимірювання електричних величин здійснювалось за допомогою стандартних приладів з класом точності 1,5. Імпульсні електричні залежності вимірювались за допомогою електронних осцилографів С8-17 та SDS1000.

З метою візуального контролю розрядного проміжку в макеті тріодної електронної гармати анод і електрод допоміжного розряду виконувались прозорими (перфоровані стінки, сітка), що дозволило шляхом фотографування розрядного проміжку визначити положення та форму межі анодної плазми, а також форму електронного пучка в залежності від режимів основного та допоміжного розрядів. Аналіз електронно-оптичних характеристик електродної системи макету здійснювався з застосуванням методу комп'ютерної обробки фотографій розрядного проміжку [5].

Допоміжний розряд, який використовувався для керування струмом гармати ВТР є несамостійним. Тому при роботі такої гармати для запалювання допоміжного керуючого розряду був необхідний незначний струм основного розряду, що не перевищував десятків міліампер.

Для запалювання допоміжного розряду на керуючий електрод подавався від'ємний низьковольтний потенціал. При цьому відбувалась не значна очистка поверхні електроду іонами плазми. Тому, коефіцієнт вторинної іон-електронної емісії з поверхні додаткового електроду можна вважати незмінним при роботі електронної гармати в імпульсному режимі.

Величина мінімального початкового струму основного розряду регулювалась зміною тиску в розрядному проміжку дослідного макету і встановлювалась такою, при якій можливо було запалити допоміжний розряд потенціалом не більш ніж кілька десятків Вольт. Такий вибір робочої точки гармати дозволяв здійснювати

рівномірне керування електричним струмом основного розряду від мінімального до максимально допустимого для умов експерименту. Тиск в розрядному проміжку стабілізувався на заданому рівні системою автоматичного регулювання тиску, яка аналогічна тим, що застосовуються для керування струмом гармат ВТР діодного типу. При цьому датчиком тиску для системи автоматичного керування слугував електророзрядний вакуумметр ВЭПБ-1, датчик якого був встановлений безпосередньо на розрядній камері електронної гармати.

Результати експериментальних досліджень

Геометричні параметри електронного пучка, що формується в тріодній електродній системі ВТР, визначаються формою емісійної поверхні катода та його емісійними властивостями, розподіленням електричного поля в області катодного падіння потенціалу, розподіленням густини іонного струму на катоді та формою і положенням межі анодної плазми з боку катода.

При розробці технологічних електронно-променевих гармат ВТР плазму розглядають як прозорий електрод, положення якого відповідає відстані між емісійною поверхнею катода та межею плазми з боку катода (дкпп), а потенціал відповідає потенціалу плазми відносно аноду гармати. Електричне поле всередині об'єму, який займає плазма, вважається відсутнім [3]. В залежності від умов горіння розряду, межа анодної плазми може змінювати свою форму та положення відносно катода. При візуальному спостереженні розрядного проміжку або його фотографуванні спостерігається інтегральне зображення плазми, що відображає її усереднені геометричні параметри.

Положення межі плазми в імпульсному режимі роботи умовно можливо розглядати в двох квазістаціонарних режимах: у режимі малого струму, що відповідає паузі між імпульсами П-образної форми дкпп, та режимі максимального струму, тобто імпульсу дкпі. В моменти переходу від одного квазістаціонарного режиму до іншого межа анодної плазми переміщується у відповідності до перехідних процесів в розрядному проміжку. В експерименті використовувались імпульси з регульованою тривалістю та частотою в діапазоні одиниці-десятки мс, що відповідає вимогам технологічних операцій [4, 6]. При цьому тривалість фронтів імпульсів не перевищувала одиниць відсотків від тривалості імпульсів струму основного розряду, що дозволяло не враховувати вплив перехідних процесів. При такому режимі роботи в розрядному проміжку можливо одночасно спостерігати дві

плазмові межі. (рис. 1) Проте для розрахунку геометричних параметрів пучка важливими є насамперед геометричні параметри анодної плазми в режимі максимального струму.

Експериментальні дослідження показали, що при підвищенні тиску в розрядному проміжку межа анодної плазми переміщується до катоду (рис 2). При цьому залежність не лінійна, при більших значеннях тиску межа анодної плазми зміщується менше ніж при нижчих тисках, що характерно і для гармат діодного типу.

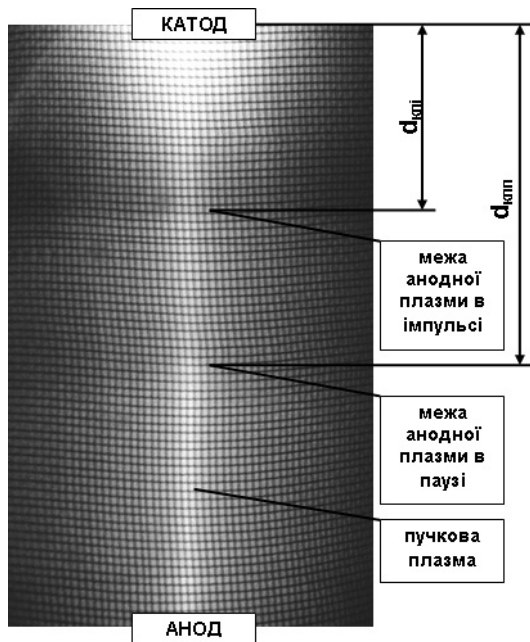


Рис. 1. Фотографія розрядного проміжку дослідного макету з двома видимими межами плазми розряду в імпульсі ($d_{кпi}$) та в паузі ($d_{кпп}$). Напряга основного розряду 12 кВ; Матеріал катоду – нерж. сталь; тривалість імпульсів $\tau = 1$ мс, частота $f = 100$ Гц

При підвищенні напруги допоміжного розряду межа анодної плазми зміщується у напрямку до катоду (рис. 2) та має нелінійний характер залежності. При досить великих значеннях напруги на керуючому електроді, порядку сотень Вольт, зміна положення межі плазми є не значною і вона тим менша, чим вищий струм допоміжного та основного розряду. Така поведінка пояснюється тим, що внаслідок горіння допоміжного розряду або підвищення тиску в розрядному проміжку викликає збільшення концентрації заряджених часток в плазмі основного розряду, що компенсується зростанням її об'єму та густини. При малих напругах і струмах горіння допоміжного розряду збільшення концентрації заряджених часток призводить переважно до збільшення об'єму

іонізованого газу. Подальше збільшення потужності допоміжного розряду викликає значне підвищення густини плазми, а зростання її об'єму сповільнюється.

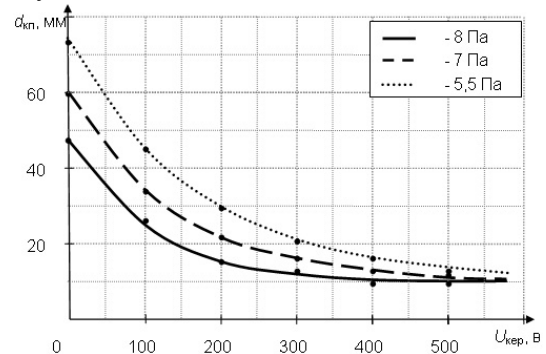


Рис. 2. Залежність положення межі анодної плазми від потенціалу на керуючому електроді при різному тиску в розрядному проміжку

Напряга основного розряду 12 кВ; Матеріал катоду – нерж. сталь, керуючого електроду – алюміній; тривалість імпульсів $\tau = 1$ мс, частота $f = 500$ Гц.

На рис. 3 приведена залежність положення межі анодної плазми від часових параметрів імпульсного режиму роботи тріодного джерела електронів ВТР. Збільшення шаруватості імпульсів наближає межу плазми до катоду в нелінійній залежності з наявністю проміжку насичення, в якому значення $d_{кп}$ змінюється не суттєво.

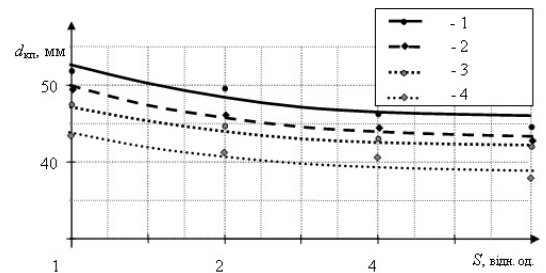


Рис. 3. Залежність положення межі анодної плазми від шаруватості керуючих імпульсів, потенціалу на керуючому електроді та напруги горіння основного розряду: 1 – $U_{осн} = 16$ кВ, $U_{кер} = 200$ В; 2 – $U_{осн} = 16$ кВ, $U_{кер} = 300$ В; 3 – $U_{осн} = 12$ кВ, $U_{кер} = 200$ В; 4 – $U_{осн} = 12$ кВ, $U_{кер} = 300$ В. Матеріал катоду – нерж. сталь, керуючого електроду – нерж. сталь; тривалість імпульсів $\tau = 1$ мс

Це пояснюється тим, що змінюються умови на катоді основного розряду. Коефіцієнт іонно-електронної емісії холодного катоду ВТР γ залежить від стану емісійної поверхні катоду і збільшується при наявності забруднень та залишкових газів в емісійному шарі, що становить 100 – 200 атомних шарів [3]. Під час роботи

гармати відбуваються процеси очищення та відновлення стану емісійної поверхні катода.

Швидкість очищення емісійної поверхні катоду залежить від типу забруднення та інтенсивності бомбардування її іонами та швидкими частками газу. При збільшенні шпаруватості імпульсів відновлення емісійної здатності поверхні катода основного розряду відбувається інтенсивніше, оскільки в паузі площа емісійної зони значно зменшується і бомбардується меншою кількістю прискорених часток. Тому в момент подачі імпульсу коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії катода є вищим порівняно до безперервного режиму роботи при таких самих потенціалах на катоді основного розряду та керуючому електроді. Наслідком є збільшення струму основного розряду, підвищення ступеню іонізації газу в розрядному проміжку і зміщення положення межі анодної плазми в бік катода.

Таким чином існує можливість вибору такого імпульсного режиму роботи тріодної гармати ВТР з холодним катодом, при якому геометричні параметри анодної плазми в режимі максимального струму будуть відносно стабільними в діапазоні достатньому для здійснення регулювання потужності гармати без суттєвої зміни геометричних параметрів пучка електронів.

Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

- положення межі анодної плазми відносно катода основного розряду в тріодній електродній системі, визначається тиском в розрядному проміжку, потенціалами на електродах, геометричними параметрами електродної системи та емісійними характеристиками матеріалів електродів;
- зміна часових параметрів імпульсного режиму роботи гармати призводить до зміни положення анодної плазми внаслідок зміни емісійної характеристики катода основного розряду.

- зменшення залежності положення межі анодної плазми від енергетичних параметрів гармати дозволяє здійснювати керування роботою гармати в режимі максимального струму без суттєвої зміни геометричних параметрів пучка електронів.

Литература

1. *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.
2. *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.
3. *Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
4. *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.
5. *Мельник И.В., Тугай С.Б.* Исследование электронно-оптических свойств электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения и формы границы анодной плазмы. // Электроника и связь, № 2 (61), 2011. – С. 9 – 13.
6. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. М. Машиностроение, 1978, 239 с.
7. *Тугай С.Б.* Дослідження енергетичних характеристик тріодної газорозрядної гармати з холодним катодом. // Електроника і зв'язь. - № 1 (66), 2012 – с. 9 – 12.

УДК 537.525

Исследование электронно-оптических характеристик триодной газоразрядной пушки с холодным катодом

С.Б. Тугай

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корпус 12, Киев, 03055, Украина.

В статье приводятся результаты исследования положения границы анодной плазмы, что влияет на геометрические параметры электронного луча в триодной пушке высоковольтного тлеющего разряда с холодным катодом, как в непрерывном, так и в импульсном режиме работы.

Для проведения исследований использовался экспериментальный стенд, позволяющий проведение визуального контроля разрядного промежутка триодной электронной пушки, для чего анод и управляющий электрод изготовлялись прозрачными. В эксперименте использовались прямоугольные импульсы с регулируемой частотой и длительностью единицы-десятки мс.

Исследования показали, что при увеличении тока разряда происходит уменьшение зависимости положения границы анодной плазмы от энергетических параметров пушки, что позволяет осуществлять управление работой пушки в режиме максимального тока без существенного изменения геометрических параметров пучка электронов. Библ. 7, рис. 3

Ключевые слова: *электронно-лучевые технологии, высоковольтный тлеющий разряд, триодные газоразрядные пушки с холодным катодом, импульсный режим работы.*

UDC 537.525

Investigation of electron-optics characteristics of triode gas discharge electron gun with cold cathode

S.B. Tuhai

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute,
37 Prospect Peremogy, building 12, Kiev, 03056, Ukraine.

Results of experimental investigation of plasma boundary position which affect on geometry parameters of electron beam in triode high voltage glow discharge electron guns both in pulse and regular operation modes, are considered.

Experimental installation which allows providing visual control of discharge gap of triode electron beam gun was used for investigations. For these purpose anode and driving electrode were made transparent. Rectangular impulses with different frequency and durability till tens of milliseconds were used in experiments.

Provided investigations shown that with increasing of discharge current decreasing of dependence of anode plasma boundary position from energetic parameters of gun is observed. Therefore for maximal current providing control of gun operation without critical changing electron beam geometry parameters is possible. References 7, figures 3

Keywords: *electron-beam technologies, high voltage glow discharge, triode gas discharge electron guns with cold cathode, pulse operation mode.*

References

1. *Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V.* (2003), [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, no 5, pp. 987-993.
2. *Denbnovetsky S.V., Melnik V.I., Melnik I.V., Tugay B.A.* (1998), [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], Eindhoven, The Netherlands, Proceedings, vol.2. pp. 637-640.
3. *Zavyalov M.A., Kreindel Y.E., Novikov A.A., Shanturin L.P.* (1989), [Plasmennie procesi v technologicheskikh electronnih pushkah]. M. Atomizdat, P. 256. (Rus).
4. *Ladohyn S.V., Levytskyy N.I., Chernyavskyy V.B., Lapshuk T.V., Shmyhydean V.G., Kravchuk L.A., Gladkov A.S.* (2007), [Electron-luchevaya plavka v lytejnomy proyzvodstve]. K.: "Stal", P. 605. (Rus)
5. *Melnik I.V., Tuhai S.B.* (2011), [Issledovanie electron-opticheskikh svoystv electroodnyh system vysokovoltного tleushego razriada s uchetom polozhenia I formy granici anodnoy plasmy]. Electronics and Communications, no 2 (61), pp. 9 - 13. (Rus).
6. *Rykalin N.N., Zuev I.V., Uglov A.A.* (1978), [Osnovy electron lychevoy obrabotki materialov. M. Mashinostroenie], P.239. (Rus).
7. *Tuhai S.B.* (2012), [Doslidzhennya energetichnih characteristic triodnoi gazorozryadnoi Garmaty s holodnym cathodom]. Electronics and Communications, no 1 (66), p p. 9 - 12. (Ukr).

Поступила в редакцию 27 января 2013 г.