

Розробка потужної газорозрядної електронної гармати для імпульсного нанесення багатокомпонентних та хімічно-складних покриттів

Разработка мощной газоразрядной электронной пушки для импульсного нанесения многокомпонентных и химически-сложных покрытий

Elaboration of powerful gas-discharge electron gun for impulse deposition of multi-component and chemically-complex coatings

- 1. Номер державної реєстрації теми: 0116U003793,**
- 2. Науковий керівник: д.т.н., проф. Мельник І.В., Мельник И.В., Melnyk I.V.**

3. Суть розробки, основні результати

(укр.)

Теоретично та експериментально досліджені умови формування імпульсного електронного пучка в потужній тріодній електронній гарматі високовольтного тліючого розряду з використанням низьковольтного допоміжного розряду. Шляхом моделювання визначені основні геометричні та енергетичні параметри пучка з урахуванням термодинамічних параметрів анодної плазми. Також теоретично досліджені особливості транспортування та сканування електронного пучка.

Розроблено нову потужну газорозрядну гармату тріодного типу та системи керування її параметрами в імпульсному режимі роботи з використанням допоміжного низьковольтного розряду. В результаті теоретичного аналізу та моделювання фізичних процесів в високовольтному газовому розряді з холодним катодом показана можливість отримання імпульсного електронного пучка загальною потужністю десятки кВт при питомій потужності $10^5 - 10^6$ Вт/см². Розроблені фізико-математичні моделі та проведено комплексне моделювання самоузгодженої електронно-іонної оптики тріодної електродної системи високовольтного розряду та системи електромагнітного транспортування імпульсного електронного пучка через еквіпотенціальний канал із розрядного проміжку з низьким вакуумом в технологічний об'єм з високим вакуумом. Визначено можливість формування імпульсного електронного пучка з поперечним розміром в кілька міліметрів та проведення його із розрядного проміжку в технологічний об'єм при перепаді тиску на 2–3 порядки. За результатами проведених досліджень розроблена конструкція газорозрядної електронної гармати тріодного типу потужністю 30 кВт. Розроблено також систему автоматичного керування струмом розряду газорозрядної гармати та систему амплітудно-частотної модуляції електронного пучка. Час регулювання струму розряду зміною тиску в розрядному проміжку не перевищує одиниць секунд, частота модуляції пучка забезпечується в діапазоні десятків-сотень Гц.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень створений експериментальний зразок газорозрядної електронно-променевої гармати та розроблена конструкторська документація. Також розроблені експериментальні зразки пристроїв системи керування параметрами гармати.

(рос.)

Теоретически и экспериментально исследованы условия формирования импульсного электронного пучка в мощной триодной электронной пушке высоковольтного тлеющего разряда с использованием низковольтного вспомогательного разряда. Путём моделирования определены основные геометрические и энергетические параметры пучка с учетом термодинамических параметров анодной плазмы. Также теоретически исследованы особенности транспортирования и сканирования электронного пучка.

Разработана новая мощная газоразрядная пушка триодного типа и система управления её параметрами в импульсном режиме работы с использованием низковольтного вспомогательного разряда. В результате теоретического анализа и моделирования физических процессов в высоковольтном газовом разряде с холодным катодом показана возможность получения

импульсного электронного пучка с общей мощностью десятки кВт при удельной мощности $10^5 - 10^6$ Вт/см². Разработаны физико-математические модели и проведено комплексное моделирование самосогласованной электронно-ионной оптики триодной электродной системы высоковольтного тлеющего разряда и системы электромагнитной транспортировки импульсного электронного пучка через эквипотенциальный канал из разрядного промежутка с низким вакуумом в технологическую камеру с высоким вакуумом. Показана возможность формирования импульсного электронного пучка с поперечным размером несколько миллиметров и проведения его из разрядного промежутка в технологический объём при перепаде давлений на 2 – 3 порядка. По результатам проведенных исследований разработана конструкция газоразрядной электронной пушки триодного типа мощностью 30 кВт. Разработана также система автоматического управления током разряда газоразрядной пушки и система амплитудно-частотной модуляции электронного пучка. Время регулирования тока разряда путём изменения давления газа в разрядном промежутке не превышает единиц секунд, частота модуляции пучка обеспечивается в диапазоне десятков-сотен Гц. По результатам теоретических и экспериментальных исследований создан экспериментальный образец электронной пушки и разработана проектная документация. Также разработаны экспериментальные образцы устройств системы управления параметрами пушки.

(англ.)

Conditions of forming of impulse electron beam in power triode high-voltage glow discharge electron gun with using low-voltage additional discharge are investigated theoretically and experimentally. By using simulation technique basic geometrical and energetic beam parameters with taking into account thermodynamic parameters of anode plasma are defined. Particularities of transporting and scanning of formed electron beam are also theoretically investigated.

New powerful gas-discharge electron gun, as well as control system for controlling its' parameters in the pulse operation regime with using low-voltage additional discharges have been elaborated. As a result of theoretical analyze and simulation of physical processes in the high-voltage glow discharge with the cold cathode possibility of obtaining impulse electron beam with total power range of tens kW and power density $10^5 - 10^6$ W/cm² is confirmed.

Corresponded physical-mathematical models are elaborated and complex simulation of self-maintained electron-ion optics of triode electrodes' system of high-voltage glow discharge and the system of electromagnetic guiding of pulse electron beam from the soft to the high vacuum have been provided. The possibility of forming impulse electron beam with cross-section dimensions few mm and it's guiding from the soft to the high vacuum for pressure difference in 2 – 3 order is shown. By the results of provided investigations the construction of triode electron gun for total power 30 kW has been elaborated. Time of regulation of discharge current by changing gas pressure in the discharge gap is not grater, than few second, frequency of beam modulation is provided in the range of tens or hundreds Hz. By the results of theoretical and experimental investigations operative model of electron gun is created and design documentation has been elaborated. Operative models of devices for control system of gun's parameters also have been elaborated.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

1. Патент України на винахід. Пристрій для отримання покриттів із хімічних сполук. Автори: Денбновецький С.В., Мельник І.В., Мельник В.Г., Тугай С.Б. № 112116 від 25.07.2016. Клас H01J 37/06 (2006.01).

2. Ліцензійний договір про надання права на використання об'єкта права інтелектуальної власності № № Л/17-9 від 27.11.2017 р. Автори: Денбновецький С.В., Мельник В.Г. Мельник І.В, Тугай Б.А. Тугай С.Б.

5. Порівняння зі світовими аналогами

Отримані результати відповідають світовому рівню, а використання імпульсних електронних гармат високовольтного тліючого розряду для нанесення теплозахисних покриттів у реактивному газовому середовищі не має аналогів у світовій практиці.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування розроблених пристроїв дозволяє значно знизити собівартість та підвищити якість виробів за рахунок:

- підвищення стехіометрії теплозахисних покриттів на 25 – 30 % та, відповідно, їх якості;
- зменшення вартості імпульсного електронно-променевого обладнання на 20 – 25 %.

7. Потенціальні користувачі

Технології імпульсного нанесення покриттів з використанням електронних гармат високовольтного тліючого розряду можуть застосовуватися на підприємствах та в організаціях різних галузях промисловості, де є необхідним нанесення високоякісних теплозахисних покриттів, зокрема: у машинобудуванні та приладобудуванні.

8. Стан готовності розробки

Розроблені експериментальні зразки гармати тріодного типу та системи керування її параметрами.

9. Існуючі результати впровадження

Основні результати роботи впроваджені у лекціях та лабораторних роботах з курсів «Технологія виробництва електронної техніки», «Електронні системи», «Технологічні основи електроніки», «Плазмова та імпульсна електроніка». Розроблені пристрої будуть впроваджені при розробці електронно-променевого обладнання для нанесення теплозахисних покриттів в Інституті електрозварювання ім. Б.Є. Патона НАНУ, підприємстві НВО «Елтехмаш» та інших.

10. Назва організації, телефон, e-mail

НДІ електроніки та мікросистемної, факультет електроніки, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Тел: 454-90-75. e-mail: imelnik@phbme.kpi.ua

11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

За тематикою роботи опублікований один навчальний посібник:

1. Денбновецький С.В., Мельник І.В., Писаренко Л.Д. Кодування сигналів в електронних системах. Частина 1. Параметри сигналів і каналів зв'язку та методи їхнього оцінювання: навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 6.0508 «Електронні пристрої та системи». – К.: Кафедра, 2016. – 524 с. – ISBN 978-617-7301-12-6.

Підготовлена до публікації та здана до Методичної ради Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» друга частина посібника.

За тематикою роботи опубліковано 19 статей (зокрема 12 статей в журналах, які входять до наукометричних баз даних):

1. Мельник И.В. Оценка энергетической эффективности импульсных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с учетом электродных процессов и параметров анодной плазмы. // И.В. Мельник / Электронное моделирование. – Т. 38. – № 1. – 2016. – С. 3 – 17.

2. Мельник И.В. Использование параллельных вычислений для моделирования технологических газоразрядных источников электронов. // И.В. Мельник, А.О. Лунтовский / Электронное моделирование. – Т. 38. – № 3. – 2016. – С. 5 – 21.

3. Мельник І.В. Моделювання та апроксимація залежності струму електронної гармати високовольтного тліючого розряду від напруги на обмотці електромагнітного натікача як елемента газодинамічної системи керування // І.В. Мельник, Б.А. Тугай, С.Б. Тугай / Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – №3 – С. 7 – 18. – DOI 10.20535/SRIT.2308-8993.2016.3.01.

4. Мельник І.В. Аналіз особливостей моделювання електронних схем у програмному комплексі Simulink на прикладі транзисторного підсилювача. – Системні дослідження та інформаційні технології. – 2016. – №1 – С. 40 – 50. – DOI 10.20535/SRIT.2308-8993.2016.1.05.

5. Мельник И.В. Моделирование энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с учетом температуры электронов и их подвижности в анодной плазме. // И.В. Мельник / Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – Т. 60. – № 7. – 2017. – С. 413 – 424.

6. Kovalchuk D., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B. Prospects of application of gas discharge electron beam guns in additive manufacturing. // Электротехника и электроника. – № 5-6. – 2016. – С. 36 – 42.

7. Volpian O.D., Drozd I.M., Kuzmichev A.I., Perevertaylo V.V., Tsybulsky L.Yu., Obod Yu.A. Calculation of the distribution of film thickness on a rotating disk substrate in a sputtering system with long plate targets / O.D. Volpian, I.M. Drozd, A.I. Kuzmichev and Yu.A. Obod / Journal of Physics: Conference Series, 2017., Vol. 872, P. 012028 (1-4).

8. Kuzmichev A.I., Perevertaylo V.V., Tsybulsky L.Yu. and Volpian O.D. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment. // A.I. Kuzmichev, V.V. Perevertaylo, L.Yu. Tsybulsky and O.D. Volpian / Journal of Physics: Conference Series, 2016, Vol. 729, P. 012005 (1-5).

9. Kuzmichev A.I., Ivashchenko V.I., Perevertailo V.V., Skrynskyi P.L. Magnetron Sputtering System for Deposition of Multinanolayered Coatings With Reactive Gas Activation in Microwave Discharge // A.I. Kuzmichev, V.I. Ivashchenko, V.V. Perevertailo, P.L. Skrynskyi / IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, Vol. 44, No 12, pp. 3028-3031.

10. Drozd I.M., Kuzmichev A.I. High-voltage gas-discharge current limiter-interrupter using high-density glow discharge / I.M. Drozd, A.I. Kuzmichev / Вопросы атомной науки и техники, ISSN 1562-6016. ВАНТ. 2016. №6(106) Problems of atomic science and technology. 2016, № 6. Series: Plasma Physics (22), p. 215-218.

11. Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., Майкут С.А., Дрозд И.М. Индукционно-термический метод получения микро- и наночастиц / А.И. Кузьмичёв, Л.Ю. Цибульский, С.А. Майкут, И.М. Дрозд / Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, 2017, т. 15, № 1, сс. 141–162.

12. Вольпян О.Д., Кузьмичев А.И. Рассеяние быстрых атомов от металлической мишени в ионных технологиях оптических покрытий / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев / Физика и химия обработки материалов, 2016. № 1, 40-46.

13. Melnyk I. Methodic of Simulation of Guiding of Short-Focus Electron Beam in The Equipotential Transporting Channel of High Voltage Glow Discharge Electron Guns // I. Melnyk / Вісник кийського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. № 1 (23), 2015. – С. 57-62.

14. Melnyk I. Cernyatynskiy I., Piasetska N. Iteratively methodic of simulation of triode high voltage glow discharge electrodes systems with taking into account the temperature and mobility of slow electrons in anode plasma. // I. Melnyk, I. Cernyatynskiy, N. Piasetska / Вісник кийського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. № 1 (24), 2016. – С. 30 – 34.

15. Мельник И.В. Оценка времени увеличения тока высоковольтного тлеющего разряда в триодных источниках электронов с учетом влияния температуры электронов и их подвижности в анодной плазме. // И.В. Мельник / Вестник херсонского национального технического университета. – Вып. 3 (58). – Херсон, 2016. – С. 556 – 560.

16. Мельник И.В. Моделирование зависимости тока электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда от геометрических параметров электромагнитного натекаателя. // И.В. Мельник, Б.А. Тугай, С.Б. Тугай / Вестник херсонского национального технического университета. – Вып. 3 (58). – Херсон, 2016. – С. 561 – 566.

17. Мельник И.В. Долгосрочные зависимости и фрактальный анализ. // И.В. Мельник, В.В. Гайдамака. / Вестник херсонского национального технического университета. – Вып. 3 (62). – Том 1. – Херсон, 2017. – С. 143 – 150.

18. Drozd I., Kuzmichev A., Pinkavsky A. High-voltage full-controlled gas discharge cold-cathode tetrode // I. Drozd, A. Kuzmichev, A. Pinkavsky / Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка Радіофізика та електроніка, 2016, № 1 (24), с. 26-29.

19. Майкут С.А., Дрозд И.М., Кузьмичёв А.И., Цыбульский Л.Ю. Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора / С.А. Майкут, И.М. Дрозд, А.И. Кузьмичёв, Л.Ю. Цыбульский // Электроника и связь, 2017. Т. 22. № 4(88). С. 11-17.

12. Фото розробки: Газорозрядна електронна гармата потужністю до 30 кВт для імпульсного нанесення багатоконпонентних та хімічно-складних покриттів із системою керування її параметрами

