

**Дослідження розрядів низького тиску для розробки обладнання та технології імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження наноструктурованих покриттів.**

**Исследование разрядов низкого давления для разработки оборудования и технологии импульсного электронно-лучевого испарения и ионно-плазменного осаждения наноструктурных покрытий.**

**Investigation of low-pressure discharges for elaboration of equipment and technology for pulse electron-beam evaporation and ion-plasma deposition of nanostructured coatings.**

1. **Номер державної реєстрації** – 0110U002292

2. **Науковий керівник** – д.т.н., проф. Денбновецький С.В., Денбновецький С.В., Denbnovetskiy Stanislav V.

3. **Суть розробки, основні результати**

**(укр.)**

Отримання різних покриттів електронно-променевим випаровуванням у вакуумі є одним із найбільш поширених методів. Проте використання стаціонарного нагрівання при випаровуванні утруднює отримання покриттів із багатокомпонентних матеріалів, а також хімічних сполук, випаровування яких при високих температурах супроводжується термічною дисоціацією. Перспективними для осадження покриттів із таких матеріалів є імпульсне електронно-променево випаровування пучком, що генерується в високовольтному тліючому розряді з холодним катодом, та активація парогазового потоку в іонізуючому розряді низького тиску в зоні випаровування. Використання для імпульсного випаровування газорозрядного джерела електронів з холодним катодом забезпечує можливість осадження покриттів в широкому діапазоні тиску та складу газового середовища. Поєднання імпульсного випаровування з використанням відповідного газового середовища забезпечує можливість отримання покриттів з заданими структурою та фазовим складом.

В роботі вивчено особливості генерації та формування імпульсних електронних пучків в високовольтному тліючому розряді з холодним катодом. Встановлено, що при використанні тріодних електродних систем з розвиненою емісійною поверхнею катоду можливе отримання імпульсних електронних пучків, потужністю десятки кВт з питомою потужністю  $10^5$ -  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, що дозволяє використовувати їх для випаровування різних матеріалів, включаючи тугоплавкі.

Визначено особливості малоінерційного керування енергетичними параметрами електронного пучка за допомогою низьковольтних допоміжних розрядів. Встановлено, що імпульсна модуляція електронного пучка можлива в діапазоні, який відповідає вимогам електронно-променевої технології осадження покриттів (частота модуляції 0 – 200 Гц, тривалість імпульсів 1 – 50 мс).

На основі отриманих результатів досліджень розроблено експериментальні пристрої та досліджено з їх використанням технологічний процес термоіонного осадження покриттів із хімічних сполук. За результатами проведених досліджень розроблені рекомендації по технології імпульсного термоіонного осадження покриттів із сполук.

**(рос.)**

Получение различных покрытий электронно-лучевым испарением в вакууме является одним из наиболее распространенных методов. Однако использование стационарного нагрева при испарении затрудняет получение покрытий из многокомпонентных материалов, а также химических соединений, склонных к термической диссоциации. Перспективным для осаждения покрытий из таких материалов является импульсное испарение пучком, генерируемым в высоковольтном тлеющем разряде с холодным катодом, с активацией парогазового потока в зоне испарения с помощью разряда низкого давления. Использование для импульсного испарения газоразрядного источника электронов с холодным катодом обеспечивает возможность осаждения покрытий в широком диапазоне давления и состава

газовой среды. Совмещение импульсного испарения с использованием соответствующей газовой среды обеспечивает возможность получения покрытий с заданными структурой и фазовым составом.

В работе изучена особенность генерации и формирования импульсных электронных пучков в высоковольтном тлеющем разряде с холодным катодом. Установлено, что при использовании триодных электродных систем с развитой эмиссионной поверхностью катода возможно получение импульсных электронных пучков мощностью десятки кВт с удельной мощностью  $10^5 - 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, что позволяет использовать их для импульсного испарения различных материалов, включая тугоплавкие.

Определены особенности малоинерционного управления энергетическими параметрами электронного пучка с помощью низковольтных вспомогательных разрядов. Установлено, что импульсная модуляция электронного пучка возможна в диапазоне, соответствующем требованиям электронно-лучевой технологии осаждения покрытий (частота модуляции 10 – 200 Гц, длительность импульсов 1 – 50 мс).

На основе полученных результатов исследований разработаны экспериментальные устройства и исследован с их использованием технологический процесс термоионного осаждения покрытий из химических соединений. С учетом проведенных исследований разработаны рекомендации по технологии импульсного термоионного осаждения покрытий из соединений.

(англ.)

Obtaining of different coatings by electron-beam evaporation in vacuum is one of the most widely using methods. However, obtaining of coatings from multicomponent materials, as well as from chemical compounds, which are inclined to thermal dissociation, is really difficult with using of continuous heating during evaporation. For deposition of such coatings applying of pulsing evaporation by electron beam, generated in high voltage glow discharge with cold cathode, with activation of steam and gas fluxes in the evaporation zone by low-pressure discharge, is very perspective. Using of gas discharge cold cathode electron sources for pulsing evaporation provided the possibility of coating deposition under wide range of operation pressure and gas media composition. Superposition of pulse evaporation with using of suitable gas media led to the possibility of obtaining coatings with required structure and phase composition.

A singularity of generation and forming of pulse electron beams in high voltage glow discharge with cold cathode is analyzed in this work. Defined, that with using triode electrodes systems with large cathode's emission surface obtaining of electron beams with power tens of kW and power density range of  $10^5 - 10^6$  W/cm<sup>2</sup> is possible. These parameters allow using such kind of pulse beams for evaporation of different materials, including refractory ones.

The main singularities of fast control of electron beam electrical parameters by using low-voltage additional discharges are defined. It is determinate, that impulse modulation of electron beam is possible in the range, which correspondent to requirements of electron beam technology for coatings deposition, namely: modulation frequency – 10 – 200 Hz; impulse duration – 1 – 50 ms.

On the base of obtained results experimental devices are elaborated and technological process of thermal-ion deposition of coatings from chemical compounds is investigated with its applying. Some recommendations about technology of impulse thermal-ion deposition of compounds' coatings are formulated on the base of provided investigations.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкт права інтелектуальної власності**

- Заявка на винахід № а 201110338. Газорозрядна електронна гармата / Мельник В.Г., Мельник І.В., Тугай Б.А., Тугай С.Б. Подана 23 серпня 2011 р.
- Заявка (корисна модель) № U201111712. Газорозрядна електронна гармата / Мельник В.Г., Мельник І.В., Тугай Б.А., Тугай С.Б. Подана 4 жовтня 2011 р.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами**

Результати розробки відповідають світовому рівню. Розроблений комплекс технологічних пристроїв (газорозрядна електронна гармата тріодного типу з системою керування параметрами електронного пучка в імпульсному режимі) та технологія імпульсного термоіонного

осадження покриттів в середовищі різних газів, включаючи реактивні, не мають аналогів у світовій практиці отримання покриттів.

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок**

Розроблений газорозрядний електронно-променевий комплекс відрізняється новими технологічними можливостями, які при використанні його в технологіях нанесення покриттів забезпечують:

- підвищення швидкості нанесення покриттів без наявності крапельної фракції (порівняно з стаціонарним випаровуванням на 1 - 2 порядки);
- можливість нанесення багатокомпонентних покриттів із збереженням складу конденсату;
- можливість осадження покриттів із хімічних сполук в середовищі відповідних газів із збереженням їх стехіометрії;
- можливість осадження покриттів у низькому вакуумі, що при високій швидкості випаровування еквівалентно осадженню у високому вакуумі.

Наведені технологічні можливості розробленого газорозрядного комплексу забезпечують отримання покриттів, осадження яких відомими пристроями значно утруднене або взагалі неможливе.

## **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації)**

Розроблені газорозрядні електронно-променеві пристрої можуть використовуватись в організаціях та підприємствах, що розробляють та використовують електронно-променеве обладнання та технології нанесення покриттів, плавки та інших процесів.

## **8. Стан готовності розробки**

Розроблені та виготовлені макети комплексу (газорозрядна електронна гармата потужністю 5 кВт та блоки керування енергетичними, просторовими та часовими параметрами електронного пучка). Можлива розробка дослідно-промислових зразків пристроїв, адаптованих до існуючого промислового обладнання.

## **9. Існуючі результати впровадження**

Результати роботи будуть використані в розробці нового електронно-променевого обладнання НВП "Елтехмаш" та в фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАНУ. В отриманих результатах розробки зацікавлені також організації та підприємства, що використовують електронно-променеве обладнання та технології (Міжнародна асоціація "Титан", Інститут проблем матеріалознавства та інші).

**10. Назва організації, телефон, e-mail:** НТУУ "КПІ" НДІ прикладної електроніки, тел. (044) 454-9503, e-mail: [imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

## **11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання роботи**

1. Проектування та дослідження комп'ютерних мереж: навчальний посібник / А.О. Лунтовський, І.В. Мельник. – К. : Університет «Україна», 2010. – 361 с.
2. Основи проектування безпроводових комп'ютерних мереж: навчальний посібник / Лунтовський А.О., Мельник І.В. – К.: Освіта України, 2011. – 362 с.
3. Денбновецький С.В., Лещин О.В. Електронні системи: навчальний посібник. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 288 с.
4. Luntovsky Andriy, Gütter Dietbert, Melnyk Igor. Planung und Optimierung von Rechnernetzen. Vieweg+Teubner, 2011. – 419 S. ISBN 987-3-8348-1458-6.
5. Anatoly Kuzmichev and Leonid Tsybulsky. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. In book: Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. Chapter 13. P. 269-302. Book edited by: Stanisław Grundas, ISBN: 978-953-307-522-8, Publisher: InTech, Publishing date: February 2011. 752 pages.
6. Мельник И.В. Методика моделирования транспортировки короткофокусных электронных пучков в эквипотенциальном канале с учетом разброса тепловых скоростей электронов. / Электроника и связь, № 2 (55), 2010. – С. 38 – 44.

7. Мельник И.В., Кузьмин А.А. Моделирование источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с использованием клиент-серверных технологий. / Электроника и связь, № 3 (56), 2010. – С. 57 – 62.
  8. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Моделирование транспортировки короткофокусных электронных пучков из низкого в высокий вакуум с учетом разброса тепловых скоростей электронов. – Прикладная физика, №3, 2010. – С. 84 – 90.
  9. Мельник В. И., Мельник И.В. Моделирование температурных режимов работы катода источников электронов высоковольтного тлеющего разряда на основе решения уравнения теплового баланса // Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 3 (39). – Херсон, 2010. – С. 311 – 315.
  10. Мельник И.В., Кузьмин А.А. Использование серверного приложения MatLab для решения задач математического моделирования газоразрядных электронных пушек // Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 3 (39). – Херсон, 2010. – С. 316 – 321.
  11. Мельник И.В., Шинкаренко Н.В. Реализация вычислительных алгоритмов среднего уровня сложности в системе MatLab с использованием матричных макроопераций // Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 3 (39). – Херсон, 2010. – С. 322 – 327.
  12. Мельник И.В., Тугай С.Б. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. // Электронное моделирование. – Т. 32. – №3. – 2010. – С. 31 – 43.
  13. Мельник И.В., Тугай С.Б. Исследование электронно-оптических свойств триодных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения и формы границы анодной плазмы. // Электроника и связь, № 2 (61), 2011. – С. 9 – 13.
  14. Лунтовський А.О., Мельник І.В. Автоматизоване проектування безпроводових комп'ютерних мереж в системі CANDY Framework. // Электроника и связь, № 1 (60), 2011. – С. 174 – 180.
  15. Мельник И.В., Шинкаренко Н.В. Анализ алгоритмических особенностей вычисляемых матриц при решении задач программирования средствами матричных макроопераций. // Электронное моделирование. – Т. 33. – №2. – 2011. – С. 81-92.
  16. Денбновецький С.В., Мельник В.Г., Мельник І.В., Тугай Б.А. Газорозрядний електронно-променевиий випарник для осадження наноструктурованих покриттів // Электроника и связь, № 3 (62), 2011. – С. 64 – 67.
  17. Мельник И.В., Тугай С.Б. Моделирование распределения температуры на поверхности холодного катода в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда // Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 3 (42). – Херсон, 2011. – С. 296 – 301.
  18. Смірнов І.В., Мельник І.В., Андрейцев А.Ю. Моделювання температурно-тимчасового режиму іонно-плазмового плакування порошків. // Вестник Херсонского государственного технического университета. Вып. 3 (42). – Херсон, 2011. – С. 393 – 398.
  19. Кузьмичёв А.И., Вольпян О.Д. Наноразмерные электронно-фотонные устройства на основе поверхностных плазмонных поляритонов // Электроника и связь. – № 1(60). – 2011. – С. 5-11.
  20. Кузьмичёв А.И., Вольпян О.Д. Наноразмерные электронно-фотонные устройства на основе локализованных плазмонов // Электроника и связь. – № 4(63). – 2011. – С. 26-30.
- 12. Макет газорозрядної електронної гармати з блоком керування параметрами електронного пучка**

