

МУЛЬТИФІЗИЧНІ МОДЕЛІ: ТЕМПЕРАТУРНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ТА ВИПАРОВУВАННЯ ЕМІТЕРА

Удосконалена тривимірний модель формування та випаровування емітера в умовах катодно-дугового осадження тугоплавких металів та їхніх з'єднань. Проведено чисельне моделювання та розрахунки методом скінченних елементів розподілу температури по висоті емітера при різних густинах струму; температури від часу розігріву емітера; часу до досягнення температури випаровування емітера залежно від густини струму. Встановлено нелінійний характер температурного розподілу по висоті емітера для тугоплавких металів та деяких їхніх з'єднань. Встановлено залежність часу розігрівання емітера від температури. Оцінено ерозію емітера в процесі розігрівання.

Ключові слова: емітер, катодно-дугове осадження, тугоплавкий метал, метод скінченних елементів, розподіл температури.

Модифікація поверхні є одним з найперспективніших напрямків покращення комплексу фізико-механічних властивостей виробів, підвищення їхніх експлуатаційних характеристик. Нанесена тонка плівка захищає вироби від агресивного середовища, покращує механічні властивості поверхні без зміни розмірів самого виробу. Також такі плівки можуть суттєво вплинути на фізичні властивості поверхні і широко застосовуються в високотехнологічних галузях промисловості, літако- та ракетобудуванні, атомній енергетиці, фізиці високих енергій, тощо. Основними проблемами, які виникають при нанесенні тонкої плівки, є чистота, обмежений клас можливих матеріалів для застосування, густина шару плівки, відтворюваність процесу модифікації поверхні під час нанесення плівки та її рівномірність. Всім цим вимогам відповідає метод катодно-дугового осадження у вакуумі та розрідженому середовищі. Не зважаючи на суттєву вартість та складні технологічні умови одержання плівок, цей метод набув широкого поширення і став провідним у високотехнологічному виробництві [1].

Розробка методу та обладнання для його застосування належить до досягнень ННЦ Харківський фізико-технічний інститут у другій половині минулого сторіччя [2–5]. Велика увага вивченню механізму утворення вакуумної дуги та створення математичного опису процесу катодно-дугового осадження приділена у циклі робіт [6–11]. Процес утворення та руйнування вакуумної дуги достатньо складний та швидкоплинний, а утворення нових катодних плям та їхнє зникнення, яке умовно можна описати як «рух» катодних плям по поверхні, має хаотичний характер. Катодний розряд є нестійким, що ускладнює рівномірний розподіл матеріалу, що випаровується, та впливає на якість плівок. Таку нерівномірність розподілу матеріалу катоду у дузі на-

магаються компенсувати впливом магнітного поля чи відокремлюють крапельну фракцію за рахунок складного конструкції плазмових фільтрів та сепараторів. Роботи у цьому напрямку досі активно проводять у ННЦ ХФТІ, Національній лабораторії ім. Лоуренса у Берклі, США та інших лабораторіях світу [12–23]. Не зважаючи на це, досі існують проблеми підбору технологічних параметрів при осадженні різних матеріалів катодно-дуговим методом, які вимагають додаткових витрат дорогих матеріалів високої чистоти та ресурсів для відпрацювання технології осадження, наприклад, осадження ніобію та його з'єднань на поверхню високочастотних резонаторів для прискорювачів, щоб утворити надпровідний шар [24–29]. Тому використання моделювання з метою створення ефективної трьохвимірної моделі утворення, розігрівання та випаровування матеріалу з катоду в умовах катодно-дугового осадження матеріалу на підкладку є актуальною проблемою.

Модель

Використана в роботі модель була аналогічною тій, що опублікована у роботах [30, 31], де враховувалась залежність теплоємності та коефіцієнту теплопровідності від температури. В робочому інтервалі досліджень ці залежності були наближені до лінійних для обраних матеріалів досліджень. Приклади таких розрахункових лінійних залежностей для TiN приведені на рис. 1 та рис. 2 на підставі експериментальних даних [32] і побудовані методом апроксимації.

Ці температурні залежності коефіцієнта теплопровідності та теплоємності для багатьох металів укладаються у відповідні рівняння:

$$\lambda(T) = \lambda_0(1 - \beta T) \quad \text{та} \quad C(T) = C_0(1 + \alpha T), \quad (1)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності, а C_0 – коефіцієнт теплоємності при $T = 0$ К; α та β – коефіцієнти кореляції.

*В роботі брав участь В. Д. Алімов

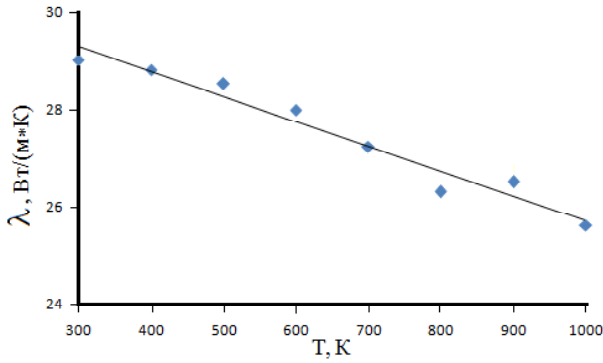


Рис. 1. Температурна залежність теплопровідності для TiN

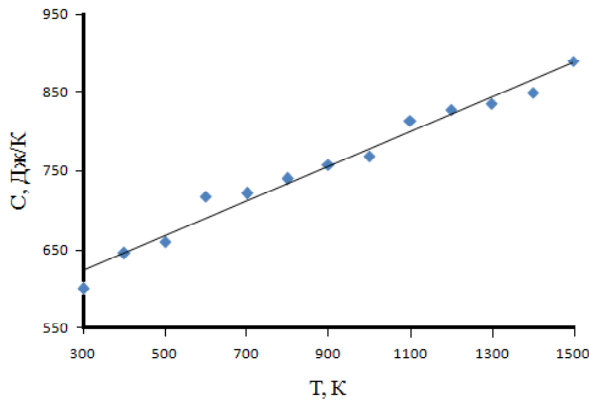


Рис. 2. Температурна залежність теплоємності для TiN

Із врахуванням рівнянь (1), розподіл температур у емітері описується нелінійним рівнянням теплопровідності:

$$\rho C_0(1 + \alpha T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_0(\nabla(1 - \beta T)\nabla T) - j_e \frac{C_e}{e} \nabla T + j_e \chi, \quad (2)$$

де j_e – густина емісійного струму, ρ – густина матеріалу емітера, $C_e = \pi k^2 T / 2\varepsilon_F$ – електронна теплоємність, k – стала Больцмана, e – заряд електрону, ε_F – енергія Фермі, $\chi = \chi_0 T$ – питомий опір, що змінюється за лінійним законом, $j_e \frac{C_e}{e} \nabla T + j_e \chi$ – об’ємна густина потужності тепловиділення зумовлена ефектами Томсона і Джоуля.

Розв’язок рівняння здійснювався з урахуванням граничних умов:

$$\text{біля основи вістря} \quad T_{|0,0} = T_0, \quad (3)$$

$$\text{на границі емісії} \quad \lambda \nabla T|_{z,e} = -\frac{j_e}{e} \cdot \Delta \varepsilon, \quad (4)$$

$$\text{та початкової умови} \quad T_{|t,0} = T_0. \quad (5)$$

Гранична умова (4) враховує те, що середня енергія, яка переноситься електронами провідності з глибини катоду до границі емісії, відрізняється від середньої енергії емітованого електрона (ефект Ноттінгама).

Густина струму емісії j_e та середня енергія $\Delta \varepsilon$, яка виділяється з при поверхневого шару у розрахунку на один емітований електрон також залежать від температури T_e емітувальної поверхні із врахуванням двох випадків:

$$\text{коли} \quad j_e = j_0 \frac{\pi T_e}{2T_i} \sin^{-1} \left(\frac{\pi T_e}{2T_i} \right), \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{kT_e}{\varepsilon_F} \right)^2 \varepsilon_F + 2kT_i \frac{\pi T_e}{T} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi T_e}{2T_i} \right), \quad (7)$$

$$\text{і коли } 1,2T_i < T_e < 2,2T_i \quad j_e = j_0 \cdot 1,16 \exp \left(0,31 \frac{T_e^3}{T_i^3} \right), \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{kT_e}{\varepsilon_F} \right)^2 \varepsilon_F + 2kT_i \left(1 - 0,93 \frac{T_e^3}{T_i^3} \right), \quad (9)$$

де j_0 – початкова густина, $T_i = 5,67 \cdot 10^{-5} \frac{E}{\sqrt{\phi}}$ – темпе-

ратура інверсії, E – напруженість електричного поля в околі вершини емітера, ϕ – робота виходу електронів для обраного матеріалу.

Відмінність від попередніх моделей, описаних в [30, 31] полягає у тому, що розглядається трьохвимірна модель, яка враховує випаровування емітера, швидкість якого залежить від температури та описується виразом:

$$v_{\text{vun}} = v_{z\phi} \exp \left(\frac{w_{\text{vun}} m_a}{kT} \right). \quad (10)$$

де v_{vun} – швидкість випаровування, $v_{z\phi}$ – поперечна швидкість звуку, w_{vun} – питома теплота випаровування, m_a – маса атома речовини, T – поточна температура.

Результати розрахунків та їхнє обговорення

При формуванні дуги в методі вакуумно-дугового осадження матеріалів на підкладку важливу роль відіграє первинний етап: розігрів нерівностей (мікрівістрів) поверхні катоду. Форму таких нерівностей можна звести у загальному випадку до конусоподібної з усіченням. Саме з таких усічених конусоподібних об’єктів, які називаються емітерами під дією великого струму формується вакуумна дуга з матеріалу катоду. Наявність вакууму забезпечує високу чистоту отриманих покриттів. На процес формування дуги суттєво впливає не тільки геометрія емітера, але й технологічні параметри процесу (наприклад, густина струму), а також теплофізичні властивості матеріалу, який осаджується. Особливості запропонованої трьохвимірної моделі полягають у врахуванні геометрії емітера (усічений конус) (рис. 3).

В рамках апробації моделі було розраховано розподіл температури в конусоподібному емітері для різних матеріалів (Ti, TiN, Zr, Mo, W) з урахуванням їхніх влас-

тивостей (дивись таблицю 1) [32, 33]. Розрахунки проводилися методом скінченних елементів із застосування сучасного мультифізичного програмного пакету.

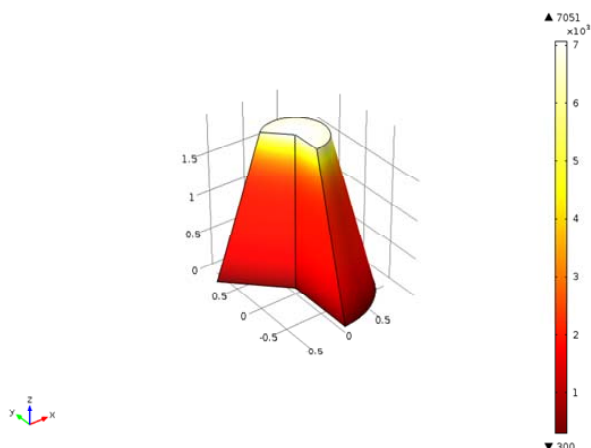


Рис. 3. Розподіл температури в конусоподібному емітері з Ti

Розподіл температури вздовж конусоподібного емітера з титану (рис. 3) вказує на його суттєве розігрівання в області вістря до температур, які суттєво перевищують температуру випаровування. Таке розігрівання можливе за умов дуже високої густини струму та малого часу розігріву, за який матеріал не встигає випаруватись [6, 34] і вказує на адекватність обраної моделі. Для інших матеріалів, наведених у таблиці 1, температурний розподіл у емітері був подібний до розподілу для титану.

Дослідження просторово-температурного розподілу у емітерах з TiN, Ti, Zr, Mo та W показує, що він має нелінійний характер. Типовий розподіл для Ti, TiN, Zr наведено на рис. 4 на прикладі емітера з цирконію.

Що стосується Mo та W, то напрям викривлення у цьому розподілі дещо інший (рис. 5), що пов'язано з відмінностями у теплофізичних характеристиках цих матеріалів.

Результати моделювання показують, що найбільше розігрівання досягається для Zr ($T = 8454$ K), далі йде Mo ($T = 8235$ K), W ($T = 7473$ K), Ti ($T = 7051$ K) і найменше розігрівання досягається для TiN ($T = 6220$ K). Оцінка розрахованих значень у порівнянні зі значеннями, доступними у літературі, показує відхилення для TiN у 5 %, а для W – 4,5–7 % [34, 35].

Таблиця 1 – Таблиця параметрів

Матеріал	T_i , K	T_e , K	λ_0 , Вт/м·К	C_0 , Дж/кг·К	ϵ_F , eB	ρ , кг/м ³	$\alpha \cdot 10^{-4}$, 1/K	$\beta \cdot 10^{-4}$, 1/K	$\chi_0 \cdot 10^{-7}$, Ом·м
TiN	1817	2090	29	600	5,13	5400	4,6	2,02	4
Ti	1500	1725	22	525	8,5	4500	4,5	1,9	4,2
Zr	1670	1920	22,7	278	7,1	6500	5,905	2,45	4,41
Mo	1580	1817	138	250	14,7	10220	2,7	2,75	5,03
W	1863	2109	173	132	14,6	19250	2	6,25	4,89

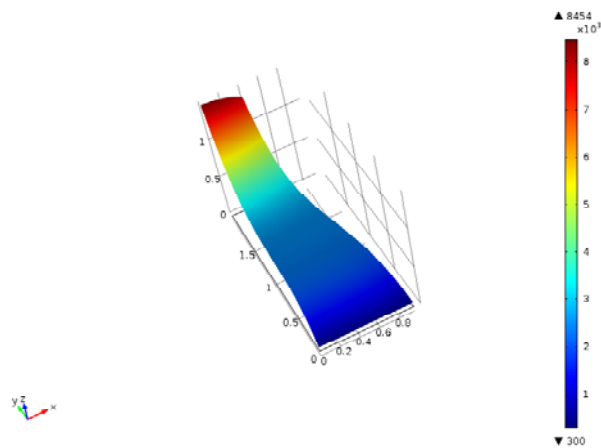


Рис. 4. Просторово-температурний розподіл у об'ємі емітера з цирконію

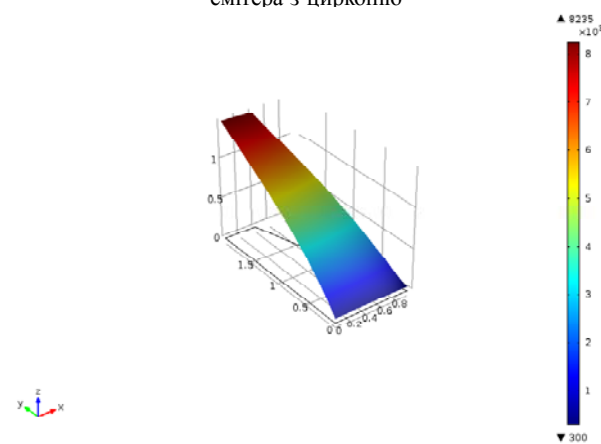


Рис. 5. Просторово-температурний розподіл у об'ємі емітера з молібдену

Розподіл температури по висоті емітера для Ti, TiN, Zr матеріалів наведено на рис. 6, а для вольфраму та молібдену на рис. 7. В обох випадках спостерігається відхилення цього розподілу від лінійної залежності, а для першої групи матеріалів це відхилення має схильність до насичення на висоті емітера близької до 2 мкм.

При густині струму $1,2 \cdot 10^{12}$ А/м² було оцінено температурну залежність часу розігрівання емітера для дослідженого матеріалу (рис. 8). Розрахунки показали, що час досягнення температури випаровування для титану та цирконію був близьким один до одного і склав 2,3 та 2,4 нс відповідно. Для нітриду титану досяг-

нення температури випаровування здійснювалося лише через 8.1 нс. Не зважаючи на це, мало місце подальше розігрівання катоду внаслідок швидкоплинності процесу і відбувалося перегрівання емітера. Внаслідок такого перегрівання і відбувалися вибухові процеси з утворенням крапельної фракції і контроль за розмірами осаджених частинок матеріалу втрачався. Вивчення динамічних процесів перегрівання катоду з різних матеріалів може дозволити мінімізувати вибухові процеси при осадженні тугоплавких матеріалів на поверхню за допомогою катодно-дугового методу. Що стосується молібдену та вольфраму, то досягнення області випаровування та перегрівання емітера мало місце значно пізніше, а саме на 22 та 42 наносекундах відповідно, тому ця залежність приведена на рис. 9 більш детально.

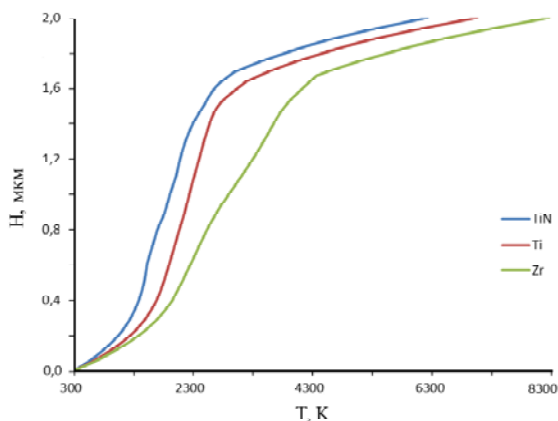


Рис. 6. Температурний розподіл по висоті емітера з Ti, TiN та Zr

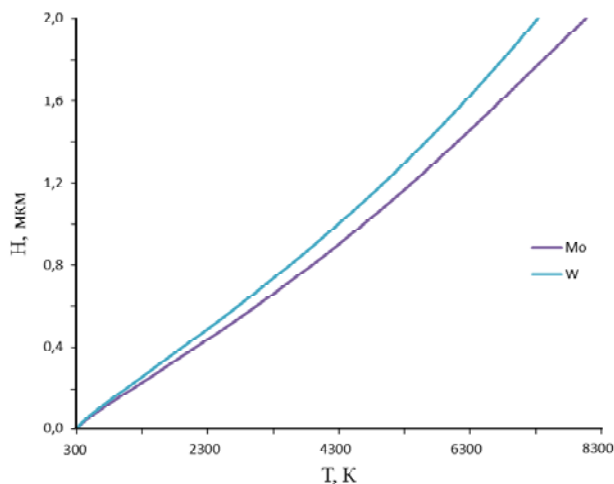


Рис. 7. Температурний розподіл по висоті емітера з Mo та W

Як результат цих розрахунків була побудована залежність часу розігрівання емітера до досягнення температури випаровування для різних матеріалів (рис. 10). Результати розрахунків показують, що зі збільшенням густини струму час розігрівання емітера до досягнення температури випаровування скорочується за нелінійним законом. Але часові умови розігрівання емі-

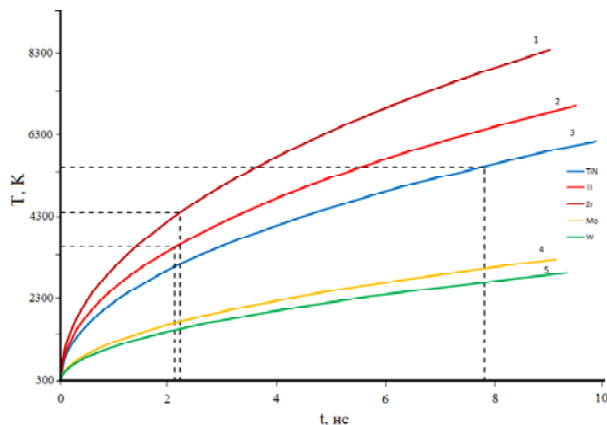


Рис. 8. Залежність температури від часу розігріву емітера при густині струму $1,2 \cdot 10^{12}$ А/м² для різних матеріалів: 1) Zr, 2) Ti, 3) TiN, 4) Mo, 5) W

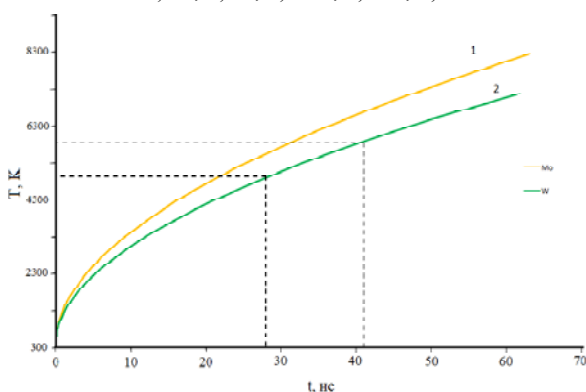


Рис. 9. Залежність температури від часу розігрівання емітера з: 1) молібдену та 2) вольфраму

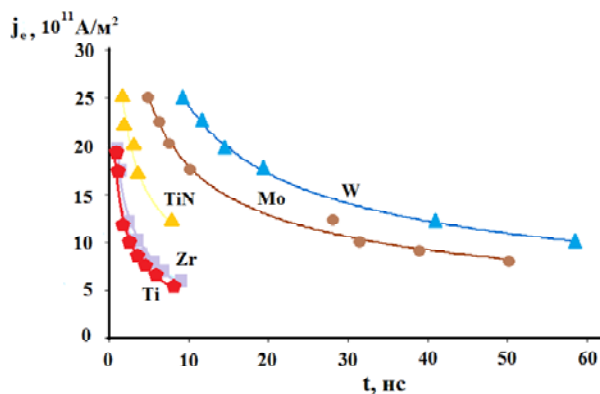


Рис. 10. Кореляція часу розігрівання емітера для різних матеріалів із густиною струму

теру суттєво відрізняються, за виключенням титану та цирконію, для яких ця залежність практично співпадає.

В зв'язку з тим, що процес розігрівання емітера до температури випаровування досить швидкоплинний, випаровування за цей час не встигає реалізуватися і має місце суттєве перегрівання емітера, тому викликає інтерес оцінка можливого часу, потрібного для випаровування конусоподібного емітера після його розігрівання. Таке оцінювання у рамках покращеної моделі було здійснено і проілюстровано на рис. 11 та рис. 12.

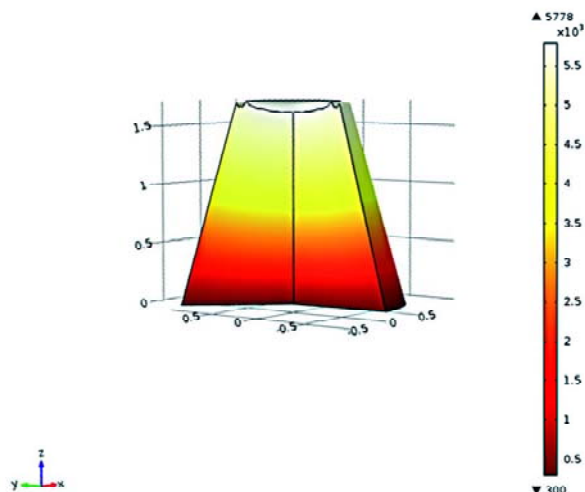


Рис. 11. Ерозія з поверхні емітера з вольфраму при випаровування протягом 90 мкс

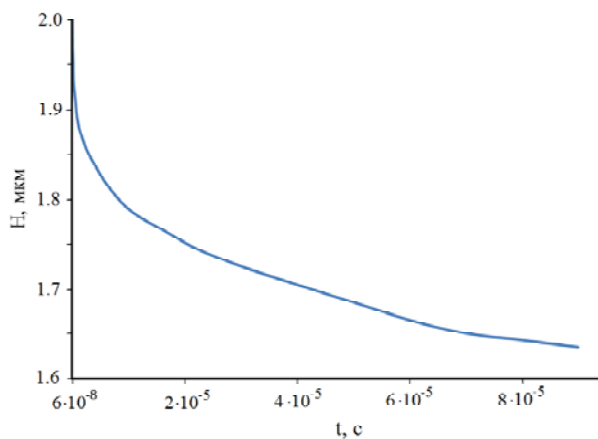


Рис. 12. Зміна висоти емітера з вольфраму з часом випаровування

Висновки

1. Таким чином запропонована удосконалена математична модель розігрівання емітера в процесі катодно-дугового осадження тугоплавких матеріалів, яка враховує залежність теплофізичних параметрів від температури та уписує трьохвимірну усічену конусоподібну форму емітера.

2. Встановлено нелінійний характер температурного розподілу по висоті емітера для різних матеріалів: характер цього розподілу суттєво відрізняється для Ti, TiN та Zr по відношенню до W та Mo внаслідок відмінностей теплофізичних характеристик матеріалів.

3. Встановлено залежність часу розігрівання емітера від температури та умов розігрівання. Розраховано необхідний час розігрівання емітера при густині струму $1,2 \cdot 10^{12} \text{ А/м}^2$, який складав для: Ti – 2,3 нс, TiN – 8,1 нс, Zr – 2,4 нс, Mo – 22 нс, W – 42 нс, та співпадав з експериментальними результатами в межах 5–7 %.

4. Встановлено залежність густини струму і часу розігрівання емітера для різних матеріалів, яка має нелінійний характер. Такий розрахунок дозволяє підібрати технологічні параметри для кожного матеріалу катоду.

5. Оцінено ерозію емітера у процесі випаровування, що дозволяє оцінити якість одержаної плівки.

Список літератури

1. Вакуумная дуга. Источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование / И. И. Аксёнов, А. А. Андреев, В. А. Белоус и др. – К. : Наукова думка, 2012. – 726 с.
2. Пат. US3793179 США, Apparatus for Metal Evaporation Coating / L.P. Sablev, N.P. Atamansky, V.N. Gorbunov, J.I. Dolotovat al; Appl. No 05/163,757, Holman and Stern, 07/19/1971.
3. Пат. US3783231 США, Apparatus for Vacuum-Evaporation of metals under the Action of an Electric Arc / L.P. Sablev, J.I. Dolotov, L.I. Getman, V.N. Gorbunov, at al; Appl. No 05/237,083, Holman and Stern, 03/22/1972.
4. Шулаев В. М. Сверхтвердые наноструктурные покрытия в ННЦ ХФТИ / В. М. Шулаев, А. А. Андреев // ФПП, 2008. – Т. 6. – № 1–2. – С. 4–19.
5. Вакуумно-дуговое оборудование и технологии покрытий в ХФТИ / И. И. Аксёнов, В. А. Белоус, В. Е. Стрельницкий, Д. С. Аксёнов // ВАНТ, 2016. – № 4 (104). – С. 58–71.
6. Литвинов Е. А. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах / Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139. – № 2. – С. 265–302.
7. Месяц Г. А. Эктоны / Г. А. Месяц. – Екатеринбург : Наука. – Т. 1. – 1993. – 184 с.
8. Месяц Г. А. Эктоны – лавина электронов из металла / Г. А. Месяц // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 6. – С. 601–626.
9. Литвинов Е. А. О природе цикличности взрывной электронной эмиссии / Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, А. Г. Парфенов // Письма в ЖТФ, 1984. – Т. 10. – № 11. – С. 593–596.
10. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном дуговом разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. – М. : Наука. – 2000. – 424 с.
11. Месяц Г. А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги / Г. А. Месяц, С. А. Баренгольд // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 10. – С. 1113–1130.
12. Plasma filters in technique of the vacuum-arc composite coating deposition / D. S. Aksonov, I. I. Aksenov, V. A. and etc. // East Eur. J. Phys, 2014. – Vol. 1. – № 1. – P. 57–69.
13. Аксёнов Д. С. Подавление эмиссии макрочастиц в вакуумно-дуговых источниках плазмы / Д. С. Аксёнов, И. И. Аксёнов, В. Е. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники, 2007. – № 6. – С. 106–115.
14. Прямолинейный сепаратор углеродной плазмы вакуумной дуги / И. И. Аксенов, В. А. Белоус, В. В. Васильев и др. // Вопросы атомной науки и техники. – 2001. – № 2. – С. 127–130.
15. Стрелецкий В. Е. Вакуумно-дуговой синтез алмазоподобных пленок: история, последние разработки, применение, перспективы / В. Е. Стрелецкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2002. – № 6. – С. 125–133.
16. Аксёнов И. И. Высокопроизводительная вакуумно-дуговая установка для осаждения покрытий / И. И. Аксёнов, В. А. Белоус // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 108–118.

17. Столбовой В. А. Методы пайки изделий в вакууме с помощью вакуумно-дугового разряда / В. А. Столбовой // Журнал фізики та інженерії поверхні. – 2016. – № 2. – С. 152–157.
18. Brown I.G. Cathodic Arc Deposition of Films / Ian G. Brown // Annu. Rev. Mater. Sci., 1998. – 28. – P. 243–269.
19. Anders A. Micropulsion Based on Vacuum Arc Physics and Technology : A Review / A. Anders, J. Kolbeck // 52 AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, July 25–27, 2016. – P. 1–15.
20. Anders A. Unfiltered and filtered cathodic arc deposition / A. Anders Chapter 10 of Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (3rd ed.) edited by P.M. Martin, 2010, William Andrew, Amsterdam.
21. Martin P. J. Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition / P. J. Martin, A. Bendavid // Thin Solid Films, 2001. – 394. – P. 1–15.
22. Takikawa H. Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films / H. Takikawa, H. Tanoue // IEEE Transaction on Plasma Science, 2007. – 35. – № 4. – P. 992–999.
23. Tay B.K. Review of metal oxide films deposition by filtered cathodic vacuum arc technique / B.K. Tay, Z.W. Zhao, D.H.C. Chua // Material Science and Engineering R, 2006. – 52. – P. 1–48.
24. Sekutowicz J. Cryogenic test of the Nb-Pb SRF photoinjector cavities / J. Sekutowicz, A. Munh, P. Kneisel, R. Nietubyc // Proceed. of PAC09, Vancouver, BC, Canada, 2009.-M06RFP056, EuCARD-CON-2009-45. – P. 1–3.
25. Characterization of a superconducting Pb photocathode in a superconducting rf photoinjector cavity / R. Barday, A. Burrill, A. Jankowiak end etc. // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beam, 2013. – 16. – 123402.
26. Fabrication of thin metallic films by arc discharges under ultra-high vacuum conditions / P. Srazewski, M.J. Sadowski, R. Nietubyc, K. Rogacki end etc. // Materials Science-Poland, 2008. – 26. – № 1. – P. 213–220.
27. Test results of components for CW and near-CW operation of a superconducting LINAC / J. Sekutowicz, M. Ebert, F. Mittag, P. Kneisel end etc. // Proceedinf of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, 2010. – TUP010. – P. 413–415.
28. Nb coating of copper cavities by UHV cathodic arc / L. Catani, A. Cianchi, D. DiGiovenale, J. Lorkiewicz end etc. // Proceeding of SRF2007, Peking University, Beijing, China, 2007. – WEP70. – P. 675–680.
29. Deposition of superconducting niobium films inside RF-cavities of particle accelerators / M.J. Sadowski, R. Mirowski, R. Nietubyc end etc. // KSUPS-2007: Abstracts. Synchrotron Radiation in Natural Science, 2007. – 6. – № 1–2.- O6.
30. Недоля А. В. Температурное распределение на катодном эмиттере при формировании высокочастотной вакуумной дуги / А. В. Недоля, Е. И. Пиваев, И. Н. Титов // Фізична Інженерія Поверхні, 2009. – Т. 7. – № 4. – С. 330–334.
31. Алимов В. Д. Моделирование условий существования эмиттера тугоплавкого материала в процессе катодного вакуумно-дугового осаждения / В. Д. Алимов, А. В. Недоля, И. Н. Титов // Металофізика і новітні технології. – 2014. – Т. 36. – № 11. – С. 1523–1532.
32. Физические величины : Справочник / А. П. Бабищев, Н. А. Бабушкина, А. М. Брагковский и др. ; под ред. И. С. Григорьевой, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
33. Cottrell T.H.E. Selected values of the thermodynamic properties of the elements / R. Hultgren, Metals Park, Ohio : American Society for Metals, 1973. – 636 p.
34. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
35. Anders A. Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation / A. Anders, New York : Springer Inc., 2008. – 544 p.

Одержано 21.06.2017

Недоля А.В. Мультифизические модели: температурные условия формирования и испарения эмиттера

Усовершенствована трехмерная модель формирования и испарения эмиттера в условиях катодно-дугового осаждения тугоплавких металлов и их соединений. Проведено численное моделирование и расчеты методом конечных элементов распределения температуры по высоте эмиттера при различных плотностях тока; температуры от времени разогрева эмиттера; времени достижения температуры испарения эмиттера в зависимости от плотности тока. Определен нелинейный характер температурного распределения по высоте эмиттера для тугоплавких материалов та некоторых их соединений. Оценено эрозию эмиттера в процессе разогрева.

Ключевые слова: эмиттер, катодно-дуговое осаждение, тугоплавкий металл, метод конечных элементов, распределение температуры.

Nedolya A. Multiphysics modeling: the temperature conditions of the formation and evaporation of emitter

The three-dimensional model for the formation and evaporation of the emitter under conditions of cathodic arc deposition of refractory metals and their compounds was improved. Numerical simulation and calculation have been realized by finite elements method of temperature distribution along the height of the emitter at various current densities; the temperature dependence on the time of the emitter heating; the time to reach of the evaporation temperature of the emitter; depending on the current density were done. The nonlinear character of the temperature distribution along the height of the emitter for refractory metals and some of their compounds has been established. The dependence of the heating time of the emitter on temperature was established. Erosion of the emitter during of warming up was estimated.

Key words: emitter, cathode-arc deposition, refractory metal, finite elements method, temperature distribution.