

Таблиця 1 – Параметри діаграми « σ - ϵ »

ϵ	0,0	0,08	0,16	0,4	9,9
$\sigma \cdot 10^{-8}$, Па	2,07	2,5	2,75	2,899	3,0

Навантаження оболонки здійснюється зверху твердим тілом (умовно не показано), масою m 800 кг, що рухається вертикально вздовж осі z зверху вниз з початковою швидкістю $v_0 = 8,94$ м/с. Використовується ключове слово *RIGIDWALL_PLANAR_MOVING_FORCES.

У нижній частині оболонка жорстко прикріплена до нерухомої основи, тому

$$u = 0, v = 0, w = 0 \text{ при } z = 0,$$

де u, v, w - переміщення точок серединної поверхні вздовж координат x, y і z відповідно.

На вертикальних межах виділеної чверті оболонки вводяться додаткові умови симетрії у переміщеннях

$$u = 0, \alpha_y = \alpha_z = 0 \text{ при } x = a/2,$$

$$v = 0, \alpha_x = \alpha_z = 0 \text{ при } y = b/2,$$

де $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ - кути повороту серединної поверхні щодо осей координат.

Параметри скінченно-елементної моделі: кількість вузлів 716 (плюс вузол 99999 для жорсткого ударника), кількість чотиривузлових скінченних елементів 641. Використані скінченні елементи типу 2 (Біличко-Цая).

Параметри управління обчислювальним процесом :

- тривалість процесу $dt = 0,0201$ с (* CONTROL _ TERMINATION);
- облік ефекту «пісочного годинника» у загальному балансі енергії $hgen = 2$ (* CONTROL ENERGY);
- облік розсіювання енергії при терті оболонки з ударником $rwen = 2$ (* CONTROL ENERGY).
- Результати розрахунків детально наведені в презентації.

Перелік посилань

1. LS-DYNA^R KEYWORD USER'S MANUAL, v. I,II. ANSYS, 2023. – 6065 р.

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРЯДУ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Д. Р. Степаненко

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Магнетронне розпилення є однією з провідних технологій нанесення тонких плівок у промисловості, зокрема в електроніці, машинобудуванні, оптиці та медицині. Ефективність роботи магнетронного розпилювального пристрою (рис. 1)

істотно залежить від точності опису фізичних процесів у плазмі, що генерується поблизу катода.

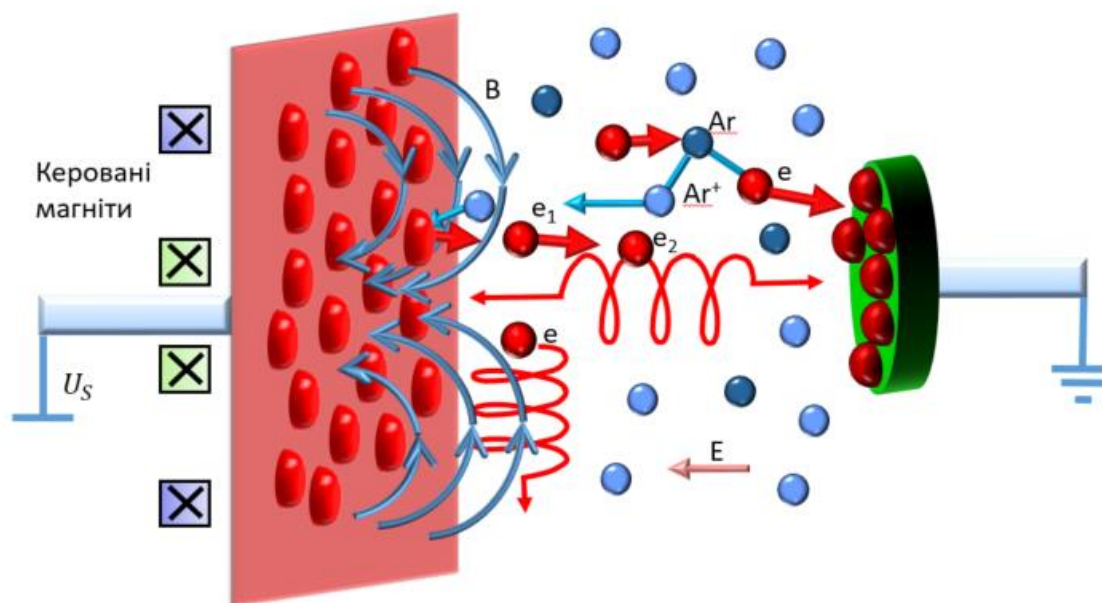


Рис. 1 – Схематичне зображення магнетронного розряду

Математичне моделювання розряду в планарних магнетронних розпилювальних пристроях є важливою складовою для оптимізації процесів осадження тонких плівок у різних галузях промисловості. Класичні моделі зазвичай базуються на припущеннях про постійність таких параметрів, як густина плазми та ефективність іонізації робочого газу. Такі спрощення дозволяють отримувати аналітичні рішення або будувати ефективні чисельні моделі, однак не відображають усіх складностей фізичних процесів, що реально відбуваються в магнетронному розряді. Одним із найбільш критичних припущень у класичних моделях є незалежність коефіцієнта вторинної емісії γ_{sec} від енергії E_i падаючих іонів. Проте численні експериментальні дослідження доводять, що γ_{sec} є сильно енергозалежною величиною: при низьких енергіях γ залишається незначною, але зростає із збільшенням енергії іонів, зберігаючи лінійну залежність до енергій іона близько 5 кеВ, залежно від матеріалу катода [1, 2]. Ігнорування цієї залежності призводить до некоректного опису механізмів запалювання розряду, динаміки струму розряду та стабільності плазми.

Таким чином, удосконалення математичної моделі шляхом урахування залежності $\gamma_{\text{sec}}(E_i)$ є логічним і необхідним кроком для підвищення точності та фізичної обґрунтованості опису процесів у планарних магнетронних розпилювальних пристроях. На основі експериментальних даних для широкого спектра матеріалів ця залежність може бути апроксимована функцією наступного вигляду:

$$\gamma_{\text{sec}}(E_i) = \gamma_{\text{sec}0} + \Delta\gamma_{\text{sec}} \frac{E_i}{E_{\text{imax}}},$$

де $\gamma_{\text{sec}0}$ – коефіцієнт вторинної емісії при нульовій енергії іона;
 E_i – енергія іона;



$E_{\text{imax}}, \Delta\gamma_{\text{sec}}$ – нормуючі множники.

Уведення такої лінійної залежності коефіцієнта вторинної електронної емісії є суттєвим удосконаленням, що дозволяє підвищити точність опису процесів, які відбуваються в зоні катодного розряду. Лінійна апроксимація є зручною формою для чисельного моделювання, яка дозволяє забезпечити як якісну, так і кількісну відповідність реальним характеристикам плазми.

Такий підхід приводить до нелінійного зв'язку між прикладеною напругою, іонною енергією, та генерацією вторинних електронів. Унаслідок цього, загальна густина електронів у плазмі стає функцією не лише геометрії й тиску, а й локального профілю напруженості електричного поля. Це впливає на стійкість розряду, розподіл потенціалу, а також на швидкість іонізації робочого газу, особливо в області поблизу мішені. Крім того, підвищення точності в розрахунку γ_{sec} дозволяє покращити передбачення критичних параметрів запуску й підтримки розряду, таких як порогова напруга, катодний струм та густина потоку іонів на поверхню.

Введення енергозалежної емісії також створює передумови для моделювання динамічних режимів магнетронного розряду, наприклад у HiPIMS, де енергія іонів може змінюватися в часі. В цілому, така модифікація математичної моделі дозволяє підвищити її універсальність і наблизити обчислення до реальних технологічних умов.

Перелік посилань

- 1 Zalm, P. C. Ion-induced secondary electron emission from copper and zinc [Text] / P. C. Zalm, L. J. Beckers // Surface Science. – 1985. – Vol. 152/153. – С. 135–141.
- 2 Ion induced electron emission from metal surfaces [Text] / D. Hasselkamp, K. G. Lang, A. Scharmann, N. Stiller // Nuclear Instruments and Methods. – 1981. – Vol. 180. – С. 349–356.