

# Мікросистеми та фізична електроніка

УДК 62-93, 533.9

## Дослідження електронної складової імпульсного магнетронного розряду

Бевза<sup>f</sup> О. М., ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)Кузьмичев<sup>s</sup> А. І., д.т.н., проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ, Україна

**Анотація**—Для порівняння характеристик електронної хмари при збудженні розряду імпульсами прямокутної форми та імпульсами у формі затухаючої синусоїди була створена фізико-топологічна модель магнетронної розпилювальної системи.

В результаті моделювання було розраховано розподіл в просторі та часі щільність електронів, енергія електронів, щільність енергії електронів при прямокутному та ударному збудженні розряду. Аналіз отриманих результатів підтвердив раніше зазначену іншими авторами особливість, що виражається в формуванні підвищеної щільності електронів на фронтах імпульсів збудження розряду.

Також було з'ясовано, що при ударному збудженні магнетронного розряду: 1) енергія електронів над поверхнею катоду-мішені в декілька разів вище ніж при збудженні розряду імпульсом прямокутної форми і відповідно до більш інтенсивного розпилення поверхні катоду-мішені; 2) спостерігається незначне збільшення зони ерозії мішені і відповідно до збільшення коефіцієнта використання матеріалу мішені; 3) в позитивний період синусоїди, утворюються іони, які бомбардують плівку, що осаджується та розпилюють її, якщо вона знаходиться під потенціалом землі.

**Ключові слова** — магнетронна розпилювальна система; імпульсний розряд; ударне збудження розряду; енергія електронів; щільність енергії електронів

### I. Вступ

В магнетронних розпилювальних системах (МРС) для боротьби з дуговими пробоями та іскрінням на мішені, що є катодом, використовують живлення імпульсною або синусоїдальною напругою середньої частоти (від 10 кГц до 1МГц) [1], [2]. Відомо, що при збудженні імпульсного розряду однополярними імпульсами на підкладці виникають короткі імпульси струму з підвищеною енергією електронів [3]. Подібна ситуація спостерігається і при живленні імпульсного розряду біполярними імпульсами, як симетричними так і асиметричними, - на фронтах імпульсів генеруються високоенергетичні електрони. При роботі на середніх частотах (десятки сотні кілогерц) суттєво збільшується середня енергія електронів, що сприяє збудженню робочого газу, а у випадку реактивного розпилення – підвищенню його хімічної активності, що, в свою чергу, покращує синтез покриттів складного вмісту при розпиленні металевих мішеней [4].

В роботі порівнюються характеристики електронної хмари в імпульсному магнетронному розряді, що генерується при живленні розряду імпульсами прямокутної форми та імпульсами у формі затухаючої синусоїди.

### II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

Магнетронне розпилення широко використовується для осадження тонких металевих та діелектричних плівок на різноманітні підкладки. Фізичні процеси, що відбуваються в магнетронних розпилювальних системах на постійному струмі, та їх характеристики ґрунтовно описані в літературі [5]–[7] і т.д.. Не менше уваги приділяється дослідженню імпульсного режиму роботи магнетронних розпилювальних систем. Досліджено умови впевненого збудження імпульсного магнетронного розряду [3], [8]–[10], його підтримки [2], [3], [8] розподілу електронів та іонів на протязі імпульсного розряду [10], [11], розглянуто практичне застосування імпульсного магнетронного розряду [2], [12].

Авторами в роботі [3] було з'ясовано, що для переходу розряду в сильнострумну форму в розрядному проміжку має накопитись носії заряду, еквівалентні струму розряду в декілька десятків міліампер. А початкова концентрація заряджених частинок для переходу може бути забезпечена або початковим розрядом або залишковими частинками після попереднього розряду, або короточасним слабострумним високовольтним самопідтримуючимся розрядом. Зменшення затримки виникнення сильнострумного розряду може бути викликана збільшенням тиску



робочого газу, частоти імпульсів або їх амплітуди. В роботі [8] було досліджено умови, що забезпечують впевнене збудження магнетронного розряду. Було встановлено, що на початковому етапі виникнення магнетронного розряду, тобто коли розряд носить характер таундсендівського розряду, ефективна іонізація атомів робочого газу аргону, при типових для магнетронного розряду значеннях тиску робочого газу, можлива при напрузі на катоді-мішені більше – 1300 В. В діапазоні напруг від – 800 В до – 1300 В кількість електронів в розрядному проміжку, що мають енергію, яка відповідає максимальному поперечному перерізу іонізації атомів аргону електронами, дуже незначна, відповідно за таких умов, виникнення самостійного імпульсного розряду буде мати нестабільний характер. А при напрузі менше – 800 В, без допоміжного слабострумного розряду, самостійне виникнення імпульсного магнетронного розряду практично неможливо.

В роботі [11] досліджено функцію розподілу в часі середньої енергії електронів в імпульсному магнетронному розряді. Продемонстровано, що протягом імпульсу присутні дві енергетичні групи електронів з відповідними піками середньої енергії електронів. Зі зникненням групи високоенергетичних електронів, піки електронної щільності і розподілу енергії електронів мають Максвелівський розподіл. Наступний пік електронної щільності в плазмі набуває більш Дрювстейнівський розподіл, з більш високою середньою енергією електронів.

### III. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для живлення імпульсного магнетронного розряду, зазвичай, використовуються прямокутні уніполярні або біполярні імпульси, що можуть бути як симетричними, так і асиметричними, а також синусоїдальні імпульси. Імпульси живлення можуть бути одиночними, постійними або групуватись в пакки [2]. Але майже не досліджувався імпульсний магнетронний розряд з імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди, так званий імпульсний розряд ударного збудження, що виникає в коливальному контурі при збудженні його імпульсом струму. Особливістю такого розряду є надвисока напруга перших імпульсів, що викликана резонансними явищами в ланцюгу живлення.

Метою даного дослідження є вивчення та порівняння розподілу в просторі та часі енергії та щільності електронів при живленні імпульсного магнетронного розряду прямокутними уніполярними імпульсами та імпульсами у вигляді затухаючої синусоїди.

### IV. КОНСТРУКЦІЯ МАГНЕТРОННОЇ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ, ЩО МОДЕЛЮЄТЬСЯ

На Рис. 1 наведена спрощена 2D конструкція магнетронної розпилювальної системи з планарним магнетроном, яка була використана для побудови фізико-топологічної моделі магнетронної розпилювальної системи.

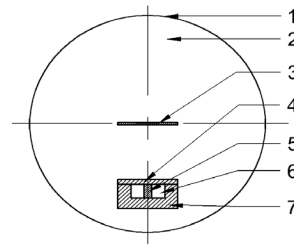


Рис. 1 2D модель вакуумної камери з планарним магнетроном: 1 – стінка вакуумної камери; 2 – робочий газ аргон; 3 – підкладка; 4 – мішень; 5 – постійний магніт; 6 – вода системи охолодження магнетрону; 7 – магнітопровід

МРС, що моделюється, розташована всередині вакуумної камери 1 (Рис. 1). Внутрішній об'єм камери 1 заповнено робочим газом аргонем 2 при тиску 0,5 Па. В нижній частині камери розташовано магнетрон, що складається з мідного катода-мішені 4, постійного магніту SmCo 5, системи охолодження магнетрону, що заповнена водою 6, та магнітопроводу 7 з магнітом'якої сталі. Над катодом-мішенню 4 на відстані 70 мм розташована мідна підкладка 3.

### V. ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ МАГНЕТРОННОЇ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Магнетронна розпилювальна система, що моделювалась має конструкцію наведену на Рис. 1. Діапазон тиску робочого газу, зазвичай це аргон, для МРС складає від 0,1 Па до 1,5 Па. В даній МРС тиск робочого газу для розрахунків було прийнято 0,5 Па.

Стінка вакуумної камери 1, та підкладка 3 в даній системі знаходились під потенціалом землі. Напруга розряду подавалась на катод-мішень 4. В роботі розглядаються два варіанти живлення МРС. В першому випадку на катод-мішень подавалась напруга у вигляді імпульсу прямокутної форми, в другому – затухаюча синусоїда. Частота, початкова амплітуда та коефіцієнт затухання синусоїди наведені в табл. 1. Протяжність прямокутного імпульсу складала 20 мкс, що відповідає часу затухання синусоїди.

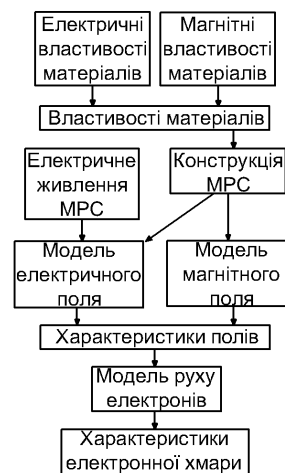


Рис. 2 Структура фізико-топологічної моделі магнетронної розпилювальної системи

Загальна структурна схема фізико-топологічної системи, що розроблена в даній роботі, наведена на Рис. 2. До її складу входять моделі магнітного та електричного полів. Дані моделі враховують електричні та магнітні властивості матеріалів з яких виготовлена МРС. Фізико-топологічна модель також включає в себе модель руху електронів, яка дозволяє порохувати рух електронів в електричному полі з врахуванням сили Лоренца.

Створена фізико-топологічна модель МРС має наступні вхідні параметри:

- Початкова напруга для рівняння синусоїди, що затухає  $V_k = 5000$  (В).
- Напруга імпульсу у випадку прямокутного імпульсу  $V_k = 800$  (В).
- Намагніченість SmCo постійного магніту  $M = 1,5 \cdot 10^5$  (А/м).
- Напруга виникнення розряду для випадку прямокутного імпульсу  $V_{крік} = 1300$  (В).
- Коефіцієнт затухання синусоїди  $K_z = 2,5 \cdot 10^5$ .
- Частота коливань контуру  $F_{диск} = 200$  (кГц).
- Тиск робочого газу (аргону)  $p_0 = 0,5$  (Па).
- Початкова температура робочого газу (аргону)  $T_0 = 300$  (К).
- Початкова концентрація електронів  $n_{e0} = 10$  (1/м<sup>3</sup>).
- Початкова енергія електронів  $\varepsilon_0 = 10^{-6}$  (В).
- Зменшення рухливості електронів  $\mu_{eN} = 10^{25}$  (1/(В·м·с)).

Результатами розрахунків були:

- Розподіл магнітного поля в вакуумній камері;
- Розподіл електричного поля в просторі та часі;
- Розподіл густини електронів в просторі та часі;
- Розподіл енергії електронів в просторі та часі.

#### A. Розрахунки розподілу магнітного поля

Магнітне поле (МП) магнетрону створюється постійним SmCo магнітом, Характеристики якого наведені в таблиці 1. Для спрощення розрахунків розподілу магнітного поля в вакуумній камері припускалося, що струм розряду не спотворює розподіл магнітного поля, тобто:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0,$$

де

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m.$$

Виходячи зі співвідношення між щільністю магнітного потоку та магнітним полем

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}),$$

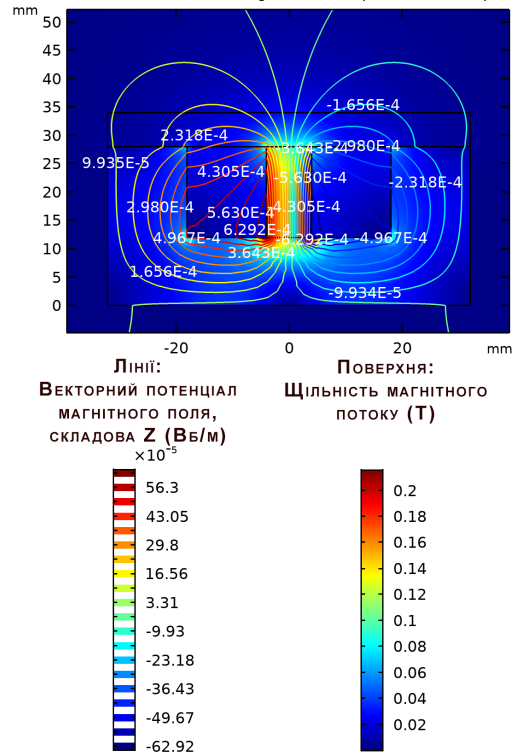


Рис. 3 Розподіл магнітного поля в МРС

і враховуючи, що

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

скалярний магнітний  $V_m$  потенціал визначається з виразу:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}_0) = 0$$

де  $\mu_0$  – магнітна постійна,

Розподіл МП розраховувався методом кінцевих різниць. На Рис. 3 наведено результати розрахунку МП в магнетронній розпилювальній системі.

#### B. Розрахунки розподілу електричного поля

В роботі порівнюються характеристики електронної хмари при живленні МРС прямокутними імпульсами та у вигляді затухаючої синусоїди.

В першому випадку в моделі на катод-мішень подавалась напруга, що імітує напругу живлення на реальному катоді-мішені МРС при її живленні прямокутними імпульсами. На Рис. 4 наведена часова діаграма, що ілюструє даний режим живлення МРС. Значення напруги виникнення розряду « $-1300$  (В)», та підтримання розряду « $-800$  (В)» при тиску робочого газу  $0,5$  (Па) для даної МРС, а також протяжність фронту наростання та спаду імпульсу були взяті з експериментальних даних.

В іншому випадку на катод-мішень МРС подавалась напруга у формі затухаючої амплітуди форма якої описується виразом

$$U = U_0 \exp[k_z t] \sin(2\pi f t)$$

де  $U_0$  – початкова напруга,  $k_z$  – коефіцієнт затухання,  $f$  – частота коливань.

На Рис. 5 наведена часова діаграма, що ілюструє режим живлення MPC напругою у формі затухаючої амплітуди.

При розрахунках параметрів синусоїди приймалось, що в початковий момент часу, через малу концентрацію носіїв заряду, розрядний проміжок має дуже високе значення опору і можна вважати, що джерело напруги працює в режимі холостого ходу. Тому для визначення початкової напруги  $U_0$  в моделі схеми опір навантаження брали максимально високим. В результаті моделювання було визначено, що  $U_0$ , в результаті резонансних явищ в коливальному контурі, досягає значення 5000 (В). Перший же імпульс напруги спричинює різке зростання концентрації носіїв заряду, що викликає падіння опору розрядного проміжку в результаті чого синусоїда різко згасає. Експериментальним шляхом було встановлено, що коливання напруги на магнетронному розряді згасають за 3-4 періоди, тому для коефіцієнта згасання було обрано значення 250000,85. В [2] вказано, що при живленні MPC від синусоїдальних джерел живлення, при реактивному розпиленні, рекомендується застосовувати частоту 10 – 100 (кГц) та вище, тому що при частотах нижче 10 (кГц) час заряду діелектричного шару достатній для виникнення дуг. Виходячи з вищевказаного, елементи коливального контуру схеми ударного збудження були розраховані такими чином, щоб на виході синусоїдальна напруга живлення MPC мала частоту 200 (кГц).

Розподіл електричного поля в просторі MPC моделлю розраховувався методом кінцевих різниць для кожного значення часу для якого розраховувались розподіл густини та енергії електронів.

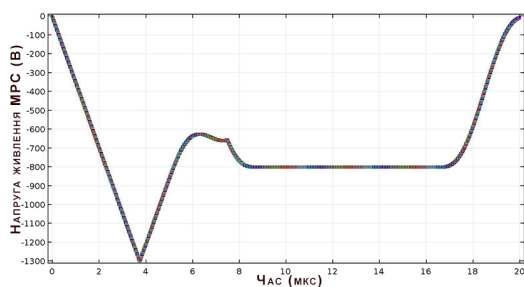


Рис. 4 Прямокутний імпульс напруги живлення MPC

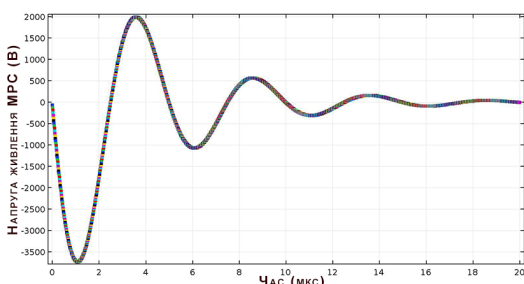


Рис. 5 Імпульс напруги живлення MPC у вигляді затухаючої амплітуди

### С. Розрахунки розподілу в просторі та часі щільності та енергії електронів

Кінетична модель руху електронів в електричному та магнітному полях в вакуумній камері базується на другому законі Ньютона з врахуванням дії сили Лоренца:

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

де  $e$  – заряд електрону,  $\mathbf{v}$  – його швидкість

Вираз для розрахунку щільності розподілу електронів має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e, \quad (1)$$

де

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E})n_e - D_e \cdot \nabla n_e, \quad (2)$$

де  $n_e$  – щільність електронів ( $1/\text{м}^3$ ),  $R_e$  – швидкість генерації електронів ( $1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ),  $\mu_e$  – рухливість електронів яка або скалярна або тензорна ( $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ),  $\mathbf{E}$  – електричне поле ( $\text{В}/\text{м}$ ),  $D_e$  – рухливість електронів яка або скалярна або тензорна. Перший член правої частини рівняння (2) представляє міграцію електронів в електричному полі, другий член в цьому рівнянні представляє дифузію електронів з області з високою щільністю в область з малою щільністю електронів.

Вираз для енергії електронів виведено у кон'юнкції з виразом (1) і має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_\epsilon) + \nabla \cdot \Gamma_\epsilon + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = R_\epsilon, \quad (3)$$

де

$$\Gamma_\epsilon = -(\mu_\epsilon \cdot \mathbf{E})n_\epsilon - D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon$$

де  $n_\epsilon$  – щільність енергії електронів ( $\text{В}/\text{м}^3$ ),  $R_\epsilon$  – отримана або втрачена енергія внаслідок не пружних зіткнень ( $\text{В}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ),  $\mu_\epsilon$  – рухливість енергії електронів ( $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ),  $\mathbf{E}$  – електричне поле  $\text{В}/\text{м}$ ,  $D_\epsilon$  – дифузія енергії електронів ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Індекс  $\epsilon$  позначає енергію електронів. Третій член лівої частини виразу (3) відображає нагрів електронів від зовнішнього електричного поля. Для максвелівської функції розподілу енергії електронів, співвідношення має вигляд:

$$D_e = \mu_e T_e,$$

$$\mu_\epsilon = \left(\frac{5}{3}\right) \mu_e,$$

$$D_\epsilon = \mu_\epsilon T_e,$$

де  $T_e$  – температура електронів. Отже, дана рухливість електронів дає можливість вираховувати інші властивості переміщення електронів. Температура електронів – це функція основної енергії електронів, яка може бути визначена як:

$$\bar{\epsilon} = \frac{n_\epsilon}{n_e}$$

і тоді



$$T_e = \left(\frac{2}{3}\right) \bar{\varepsilon}$$

$R_e$  це сума швидкостей електронних ударних взаємодій, що складають плазмохімію. Втрати енергії електрона, зумовлені непружними зіткненнями,  $R_e$  є функцією швидкості електронних ударів, що помножена на втрати енергії, які відповідають кожній взаємодії. Математично джерело електронів визначається як:

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e$$

де  $x_j$  фракція в молях цільових частинок для взаємодії  $j$ ,  $k_j$  коефіцієнт швидкості для взаємодії  $j$  ( $\text{m}^3/\text{c}$ ),  $N_n$  загальна щільність нейтральних частинок ( $1/\text{m}^3$ ). Втрати енергії визначаються як:

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j$$

де  $\Delta \varepsilon_j$  втрати енергії в взаємодії  $j$  (В). Вільні електрони, що знаходяться в об'ємі прискорюються електричним полем. Прискорення призводить до збільшення середньої енергії електронів, а потім відбувається іонізація. Це створює нові електрони, які зрештою втрачаються на стінках. В моделі враховуються взаємодії, що наведені в таблиці 1.

ТАБЛИЦЯ 1. ВРАХОВАНІ В МОДЕЛІ ЗІТКНЕННЯ ТА РЕАКЦІЇ

Взаємодія	1	2	3
Формула	$e+\text{Ar} \Rightarrow \Rightarrow e+\text{Ar}$	$e+\text{Ar} \Rightarrow \Rightarrow e+\text{Ar}s$	$e+\text{Ar} \Rightarrow \Rightarrow 2e+\text{Ar}+$
Тип	пружний	збудження	іонізація
$\Delta \varepsilon$ (eВ)	0	11,5	15,8
A	$1,99 \cdot 10^{-14}$	$8,77 \cdot 10^{-15}$	$2,15 \cdot 10^{-14}$
B	0,93	0,62	0,49
E	0,41	18,16	24,75

В таблиці e- електрон, Ar – атом аргону, Ars – збуджений атом аргону, Ar+ – позитивний іон аргону.

Величини констант для цих взаємодій наведені у рівнянні Арреніуса:

$$k_j = A T_e^B \exp\left[\frac{-E}{T_e}\right]$$

Величина констант вираховується з даних поперечного перерізу для кожної взаємодії, припускаючи, що електрони мають функцію розподілу енергії електронів Максвелла.

При розрахунках взаємодії електронів враховувались наступні коефіцієнти:

- Коефіцієнт пружності:

$$k_1 = 1,99 \cdot 10^{-14} T_e^{0,93} \exp\left[\frac{-0,41}{T_e}\right],$$

де  $T_e$  – температура електронів

- Коефіцієнт збудження:

$$k_2 = 8,77 \cdot 10^{-15} T_e^{0,62} \exp\left[\frac{-18,16}{T_e}\right],$$

- Коефіцієнт іонізації:

$$k_3 = 2,15 \cdot 10^{-14} T_e^{0,49} \exp\left[\frac{-24,75}{T_e}\right]$$

- Швидкість взаємодії пружного зіткнення:

$$r_1 = k_1 N_n n_e$$

де  $N_n$  – щільність нейтральних частинок,  $n_e$  – щільність електронів;

- Швидкість взаємодії електронного збудження:

$$r_2 = k_2 N_n n_e;$$

- Швидкість іонізації:

$$r_3 = k_3 N_n n_e;$$

- Втрата енергії при пружному зіткненні:

$$d_{e1} = 0 \text{ (В)};$$

- Втрата енергії при електронному збудженні:

$$d_{e2} = 11,56 \text{ (В)};$$

- Втрата енергії при іонізації:

$$d_{e3} = 15,8 \text{ (В)};$$

- Швидкість генерації електронів:

$$R_e = r_3;$$

- Втрати потужності при зіткненні:

$$S_{en} = -e(r_1 d_{e1} + r_2 d_{e2} + r_3 d_{e3}).$$

## VI. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На Рис. 6 наведено результати розрахунків щільності електронів для магнетронного розряду при збудженні його імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди.

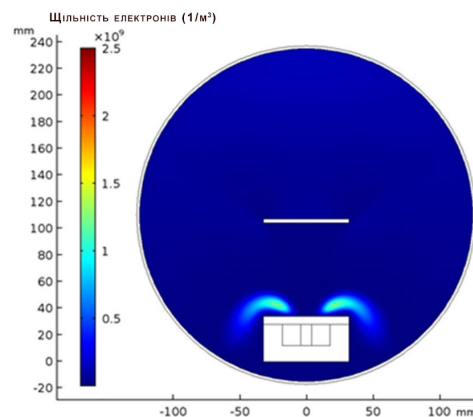


Рис. 6 Розподіл щільності електронів при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди для  $t = 0,08$  мкс.



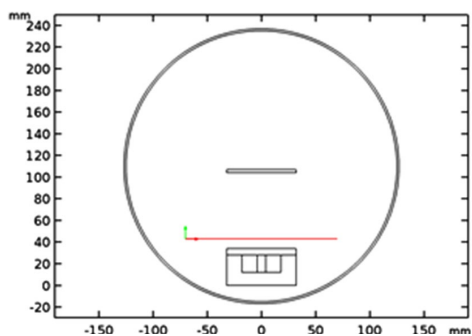


Рис. 7 Лінія виміру параметрів розподілу електронної хмари над поверхнею катоду-мішені

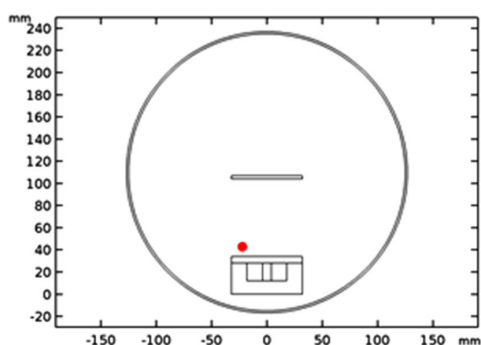


Рис. 8 Точка виміру параметрів електронної хмари

Для подальшого аналізу розподілу параметрів електронної хмари над поверхнею катоду-мішені були взяті дані з уявного відрізка, що знаходиться на відстані 11 мм над поверхнею катоду-мішені та кінці якого виходять на 38 мм за краї мішені, а також уявна точка, що також знаходиться на висоті 11 мм над поверхнею катоду-мішені та в 4 мм від його краю. Їх розташування наведено на Рис. 7 та Рис. 8 відповідно.

На Рис. 9 і Рис. 10 наведено розподіл щільності електронів в точці вказаній на рис. Рис. 8 для магнетронного розряду при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди та прямокутним імпульсом.

На Рис. 11 і Рис. 12 наведено результати розрахунків енергії електронів в магнетронному розряді в точці вказаній на Рис. 11 для магнетронного розряду при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди та прямокутним імпульсом.

Отримані результати показують, що концентрація електронів різко зростає на фронтах імпульсів і суттєво падає при максимальних значеннях амплітуди напруги на катоді-мішені. Це пояснюється тим, що на фронтах імпульсу енергія електронів набуває величини, що відповідає перерізу іонізації атомів Ar (див. Рис. 13), що в результаті призводить до зростання їх кількості. Подальше зростання напруги призводить до того, що енергія електронів виходить з оптимального для іонізації атомів Ar діапазону енергії і ефективність іонізації атомів робочого газу падає.

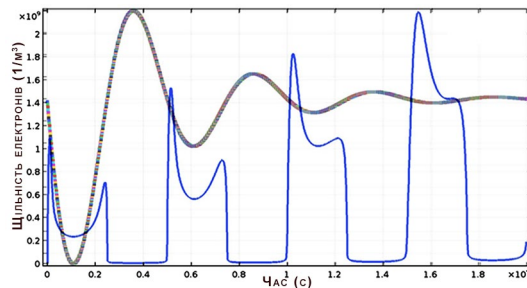


Рис. 9 Розподіл щільності електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди. Пістрявою лінією наведено форму напруги на катоді-мішені

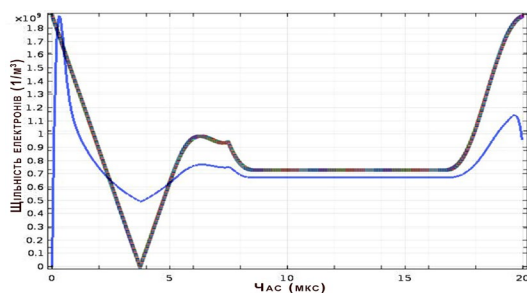


Рис. 10 Розподіл щільності електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду прямокутним імпульсом. Пістрявою лінією наведено форму напруги на катоді-мішені

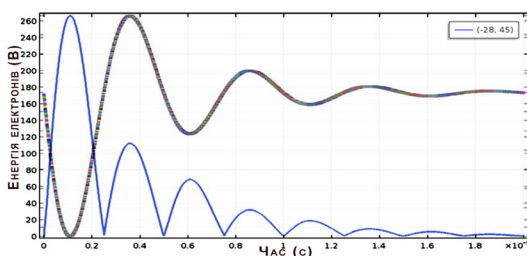


Рис. 11 Розподіл енергії електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди. Пістрявою лінією наведено форму напруги на катоді-мішені

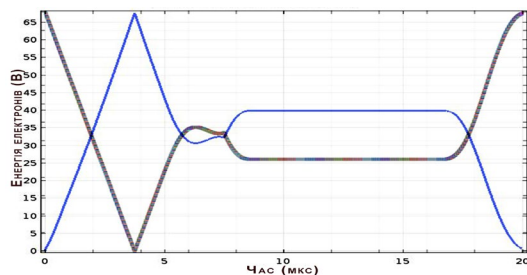


Рис. 12 Розподіл енергії електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду прямокутним імпульсом. Пістрявою лінією наведено форму напруги на катоді-мішені

DOI: 10.20535/2523-4455-2019-24-6-197171

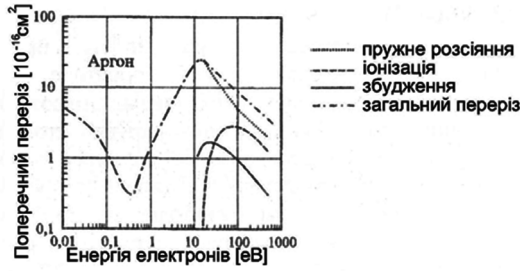


Рис. 13 Експериментальні значення перерізу зіткнень електронів з атомами аргону [13]. Наведені значення загального перерізу збудження, що дорівнює сумі перерізів збудження окремих станів

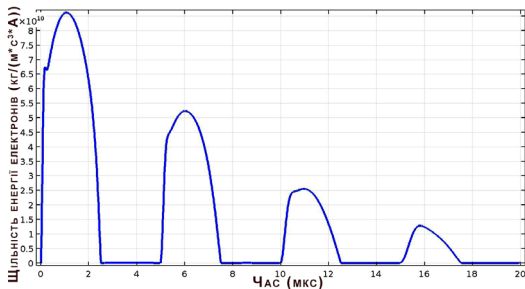


Рис. 14 Розподіл щільності енергії електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди

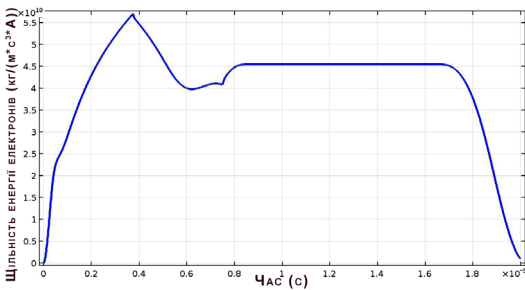


Рис. 15 Розподіл щільності енергії електронів в магнетронному розряді в точці над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду прямокутним імпульсом

На Рис. 14 та Рис. 15 наведено розподіл щільності енергії електронів в магнетронному розряді в точці вказаній на Рис. 8 над поверхнею катоду-мішені при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди та прямокутним імпульсом відповідно.

Розглянемо розподіл по лінії, що приведена на Рис. 7, щільності енергії електронів, а також їх енергії в точках максимумів для розряду з ударним збудженням та в точці максимум в момент виникнення розряду та під час квазістаціонарного розряду для розряду з збудженням прямокутним імпульсом, що наведені на Рис. 16, Рис. 17 та Рис. 18, Рис. 19 відповідно. На рисунках пунктирною лінією вказано межі катоду-мішені.

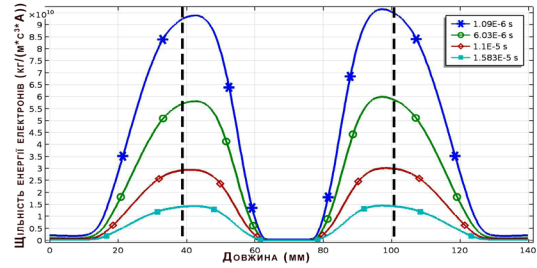


Рис. 16 Розподіл щільності енергії електронів в магнетронному розряді на прямій над поверхнею катоду-мішені, що вказана на рис. 7, при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди. Пунктирною лінією вказано межі катоду-мішені

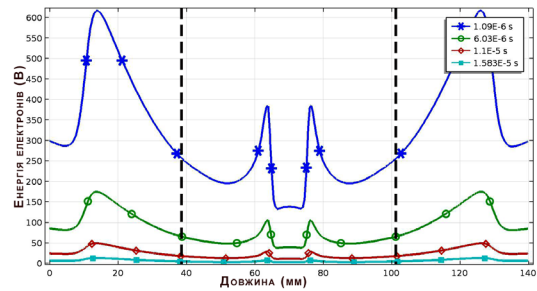


Рис. 17 Розподіл енергії електронів в магнетронному розряді на прямій над поверхнею катоду-мішені, що вказана на рис. 7, при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди. Пунктирною лінією вказано межі катоду-мішені

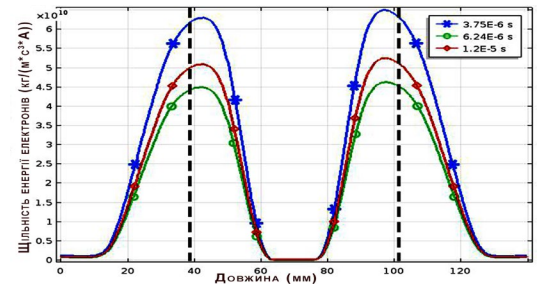


Рис. 18 Розподіл щільності енергії електронів в магнетронному розряді на прямій над поверхнею катоду-мішені, що вказана на рис. 7, при збудженні розряду прямокутним імпульсом. Пунктирною лінією вказано межі катоду-мішені

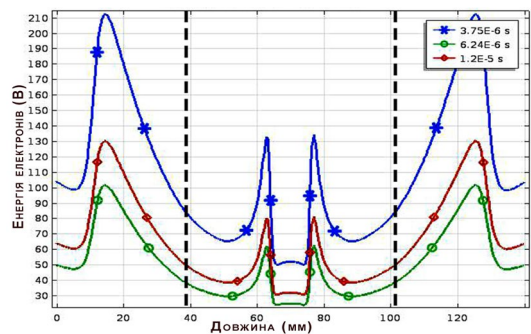


Рис. 19 Розподіл енергії електронів в магнетронному розряді на прямій над поверхнею катоду-мішені, що вказана на рис. 7, при збудженні розряду прямокутним імпульсом. Пунктирною лінією вказано межі катоду-мішені



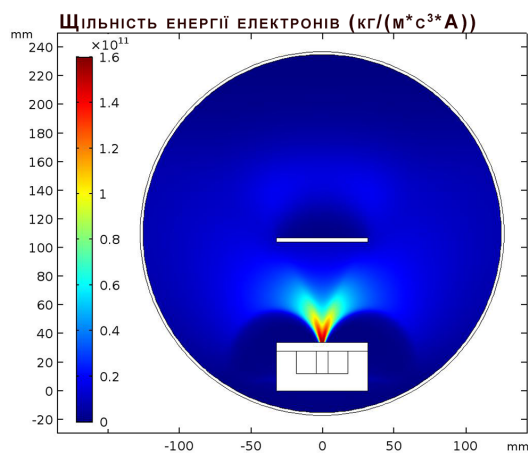


Рис. 20 Розподіл щільності електронної енергії в просторі вакуумної камери при збудженні магнетронного розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди при позитивній напрузі на катоді-мішені ( $t = 3,59$  мкс)

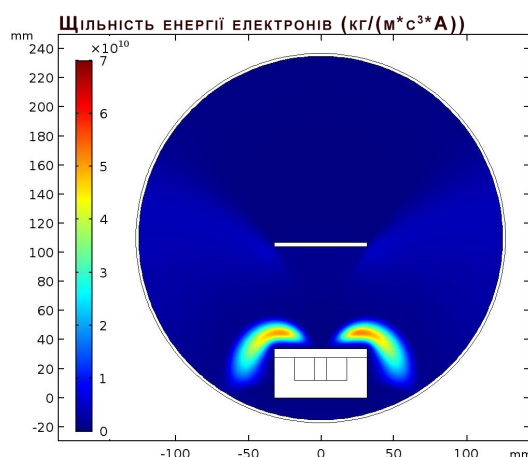


Рис. 21 Розподіл щільності електронної енергії в просторі вакуумної камери при прямокутних імпульсах збудження магнетронного розряду в інтервал квазі-стаціонарного розряду ( $t = 12,00$  мкс)

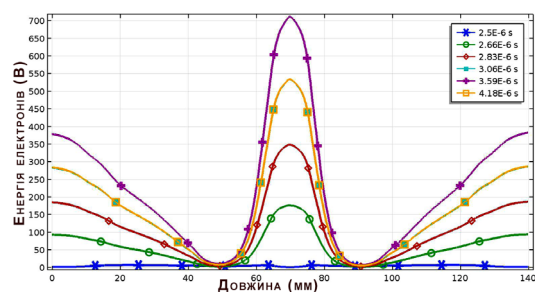


Рис. 22 Розподіл енергії електронів в магнетронному розряді на прямій над поверхнею катоду-мішені, що вказана на рис. 10, при збудженні розряду імпульсом у вигляді затухаючої синусоїди при позитивній напрузі на катоді-мішені

З наведених результатів видно, що при ударному збудження щільність енергії електронів над катодом-

мішенню в два рази вище в порівнянні з імпульсами прямокутної форми, а енергія електронів над поверхнею катоду-мішені також в декілька разів вище ніж для імпульсу прямокутної форми, при цьому значення енергії не виходять за рамки меж енергії ефективного перерізу іонізації атомів аргону. Це, в результаті більш ефективної іонізації атомів аргону, призведе до більш інтенсивного розпилення поверхні катоду-мішені.

Варто також звернути увагу на той факт, що у випадку ударного збудження магнетронного розряду, величина проекції кривої енергії електронів на площу катоду-мішені, в межах ефективного іонізації атомів аргону, дещо більша ніж для прямокутного імпульсу, в результаті чого, у випадку більших розмірів катоду-мішені, площа ерозії катоду, а отже і коефіцієнт використання мішені, для ударного збудження магнетронного розряду будуть більші.

Відмінною особливістю ударного збудження магнетронного розряду від збудження прямокутним імпульсом є наявність інтервалів часу з позитивною напругою на катоді-мішені. На Рис. 20 та Рис. 21 приведено розподіл щільності електронної енергії в вакуумній камері при позитивній напрузі на катоді-мішені при ударному збудженні магнетронного розряду, а також для прямокутних імпульсів збудження магнетронного розряду в інтервалі квазі-стаціонарного розряду, відповідно.

Як видно з наведених результатів розрахунку моделі, вид електронної хмари в негативний період для ударного збудження та для імпульсів прямокутної форми фактично не відрізняється. Але в позитивний період напруги на катоді-мішені над центральною частиною його поверхні виникає область високоенергетичних електронів. На Рис. 22 приведено результати розрахунків енергії електронів на лінії, що приведена на рис. 10, в позитивний період напруги в інтервалі від 2,5 мкс до 5 мкс (перший позитивний півперіод) на катоді мішені. Енергія електронів, практично на протязі всього півперіоду, знаходиться в межах енергії перерізу ефективного іонізації атомів Ar. Отже в позитивний період затухаючої синусоїди в цій області будуть генеруватись позитивні іони Ar, що, в свою чергу, будуть бомбардувати підкладку, що в цей період знаходиться під негативним потенціалом.

При даних умовах в розробленій фізико-топологічній моделі електрони мають енергію достатню для іонізації атомів аргону до 3-го позитивного півперіоду включно (до 55 eV). Це може призводити до розпилення вже осадженої плівки на підкладці, якщо та знаходиться під потенціалом землі. Цю особливість необхідно враховувати при проектуванні МРС з ударним збудженням розряду.

## ВИСНОВКИ

Розроблена нова фізико-топологічна модель магнетронної розпилювальної системи з збудженням магнетронного розряду імпульсами у вигляді затухаючої синусоїди та прямокутних імпульсів. Виконані, за допомогою моделі, розрахунки дозволили визначити розподіл в часі та просторі щільності електронів,





енергії електронів та щільності енергії електронів для обох видів збудження магнетронного розряду.

Отримані результати підтвердили вказану іншими авторами формування підвищеної щільності електронів

Отримані результати та їх аналіз підтвердив раніше зазначену іншими авторами особливість, що виражається в формуванні підвищеної щільності електронів на фронтах імпульсів збудження розряду. Це зумовлено тим, що електрони на певній ділянці фронту імпульсу набувають енергію, яка максимально відповідає ефективному перерізу іонізації атомів аргону, в результаті кількість електронів стрімко збільшується. При подальшому зростанні напруги кількість електронів, що мають енергію, яка максимально відповідає перерізу іонізації атомів аргону, зменшується і щільність електронів зменшується.

При моделюванні було з'ясовано, що при ударному збудженні магнетронного розряду енергія електронів над поверхнею катоду-мішені в декілька разів вище ніж при збудженні розряду імпульсом прямокутної форми, при цьому значення енергії не виходять за рамки меж енергії ефективного перерізу іонізації атомів аргону, що в свою чергу при ефективній іонізації атомів аргону, призведе до більш інтенсивного розпилення поверхні катоду-мішені.

Також з'ясовано, що при ударному збудженні магнетронного розряду в порівнянні з збудженням прямолінійними імпульсами спостерігається незначне збільшення зони ерозії мішені, що в свою чергу веде до пропорціонального збільшення коефіцієнта використання матеріалу мішені.

В результаті розрахунків було встановлено, що при ударному збудженні, в позитивний півперіод на катоді-мішені, над центральною частиною катоду-мішені утворюється область з високоенергетичними електронами енергія яких знаходиться в межах енергії перерізу ефективної іонізації атомів Ag. Таким чином в даній області, в позитивний період синусоїди, будуть утворюватись іони, що в свою чергу будуть бомбардувати плівку, що осаджується на підкладку, в разі знаходження її під потенціалом землі, та розпилювати її. Цю особливість необхідно враховувати при проектуванні МРС з ударним збудженням розряду.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. I. Kuzmichev, Y. I. Melnyk, V. Y. Kulikovskiy, P. Bohac, and L. Jastrabik, "Characteristics of pulse magnetron discharge with power supply from a capacitor energy storage," in *International Conference on Phenomena in Ionized Gases (26th)*, 2003, pp. 123–124, **URL:** <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p014993.pdf>
- [2] A. I. Kuzmichev, *Magnetronnyye raspylitel'nyye sistemy. Kn. 1. Vvedeniye v fiziku i tekhniku magnetronnogo raspyleniya [Magnetron Sputtering Systems. Book 1. Introduction to physics*

Надійшла до редакції 20 листопада 2019 р.

*and magnetron sputtering technology*]. Kyiv: Avers, 2008, ISBN: 966-8934-07-5.

- [3] A. I. Kuzmichev, S. B. Sidorenko, H. Steffen, R. Hippler, and V. Y. Kulikovskiy, "Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply," *Vacuum*, vol. 72, no. 1, pp. 59–69, Sep. 2003, **DOI:** [10.1016/S0042-207X\(03\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(03)00100-3).
- [4] A. I. Kuzmichev and O. D. Volpian, "Sistema dlya paketno-impul'snogo vzbuzhdeniya raspylyayushchego razryada na srednikh chastotakh [The system for burst pulse excitation of a sputtering discharge at medium frequencies]," in *Materialy 11-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh spetsialistov "Vakuumnaya nauka i tekhnika" [Materials of the 11th scientific and technical conference with the participation of foreign experts "Vacuum Science and Technology"]*, 2004, pp. 351–354.
- [5] K. Wasa and S. Hayakawa, *Handbook of sputter deposition technology*. Park Ridge, NJ (United States): Noyes Publications, 1992, **ISBN:** 0-8155-1280-5, **URL:** [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=source:%22ISBN-0-8155-1280-5%22](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=source:%22ISBN-0-8155-1280-5%22).
- [6] V. V. Zhukov, V. P. Krivobokov, V. V. Patsevich, and S. N. Yanin, "Svoystva magnetronnogo razryada na postoyannom toke. CH.1. Mekhanizm raspyleniya mishi [The properties of a direct current magnetron discharge. Part 1. Target sputtering mechanism]," *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. [The News Tomsk Polytech. Univ.]*, vol. 308, no. 6, pp. 69–74, 2005, **URL:** <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-magnetronnogo-razryada-na-postoyannom-toke-ch-1-mekhanizm-raspyleniya-mishi> **URL:** <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-magnetronnogo-razryada-na-postoyannom-toke-ch-1-mekhanizm-raspyleniya-mishi>.
- [7] A. A. Solovyev, N. S. Sochugov, K. V. Oskomov, and S. V. Rabotkin, "Issledovaniye kharakteristik plazmy v nesbalansirovannoy magnetronnoy raspylitel'noy sisteme [Study of plasma characteristics in an unbalanced magnetron sputtering system]," *Fiz. plazmy [Plasma physics]*, vol. 35, no. 5, pp. 443–452, 2009, **URL:** <https://elibrary.ru/item.asp?id=11919435>.
- [8] O. M. Bevza, "The magnetron discharge pulse excitation," *Electron. Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 12–18, Jun. 2017, **DOI:** [10.20535/2312-1807.2017.22.3.105448](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.3.105448).
- [9] S. V. Denbnoveckij, R. Hippler, A. I. Kuzmichev, and V. Y. Kulikovskiy, "Zapazdyvanie vozniknoveniya razryada v impul'snyh magnetronnyh raspylitel'nyh ustrojstvakh [The delay in the occurrence of discharge pulsed magnetron sputtering devices]," *Electron. Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 195–198, 2000.
- [10] A. I. Kuzmichev, V. Y. Kulikovskiy, and S. B. Sydorenko, "Dinamicheskie kharakteristiki impul'snoy magnetronnoy raspylitel'noj sistemy [Dynamic characteristics of the pulsed magnetron sputtering system]," *Izv. RAN. Seriya Fiz. [Proceedings RAS. Phys. Ser.]*, vol. 64, no. 7, pp. 1317–1321, 2000.
- [11] J. T. Gudmundsson, J. Alami, and U. Helmersson, "Evolution of the electron energy distribution and plasma parameters in a pulsed magnetron discharge," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 22, pp. 3427–3429, May 2001, **DOI:** [10.1063/1.1376150](https://doi.org/10.1063/1.1376150).
- [12] O. D. Volpian and A. I. Kuzmichev, "Magnetronnoye naneseniye opticheskikh pokrytiy pri pitanii magnetronov peremennym napryazheniyem sredney chastoty [Magnetron deposition of optical coatings with magnetron power supply by mid-frequency alternative voltage]," *Prikl. Fiz. [Applied Physics]*, no. 3, pp. 34–52, 2008.
- [13] I. Kolev, A. Bogaerts, and R. Gijbels, "Influence of electron recapture by the cathode upon the discharge characteristics in dc planar magnetrons," *Phys. Rev. E*, vol. 72, no. 5, p. 056402, Nov. 2005, **DOI:** [10.1103/PhysRevE.72.056402](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.056402).



# Исследование электронной составляющей импульсного магнетронного разряда

Бевза<sup>f</sup> О. Н., ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)

Кузьмичев<sup>s</sup> А. И., д.т.н., проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

Киев, Украина

**Аннотация**—Для сравнения характеристик электронного облака при возбуждении разряда импульсами прямоугольной формы и импульсами в форме затухающей синусоиды была создана физико-топологическая модель магнетронного распылительной системы.

В результате моделирования было рассчитано распределение в пространстве и времени плотность электронов, энергия электронов, плотность энергии электронов при прямоугольном и ударном возбуждении разряда. Анализ полученных результатов подтвердил ранее указанную другими авторами особенность, выражающаяся в формировании повышенной плотности электронов на фронтах импульсов возбуждения разряда.

Также было выяснено, что при ударном возбуждении магнетронного разряда: 1) энергия электронов над поверхностью катодмишени в несколько раз выше чем при возбуждении разряда импульсом прямоугольной формы и соответственно к более интенсивному распылению поверхности катодмишени; 2) наблюдается незначительное увеличение зоны эрозии мишени и соответственно к увеличению коэффициента использования материала мишени 3) в положительный период синусоиды, образуются ионы, которые бомбардируют пленку, осаждаются и распыляют ее, если она находится под потенциалом земли.

**Ключевые слова** — магнетронного распылительная система; импульсный разряд; ударное возбуждение разряда; энергия электронов; плотность энергии электронов

UDC 62-93, 533.9

## The Research of Pulsed Magnetron Discharge Electronic Component

O. M. Bevza<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)

A. I. Kuzmichiev<sup>s</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—In magnetron sputtering systems, an arc and arcing may happen at the cathode of a magnetron when operating in a reactive environment. To avoid their occurrence, pulse operating modes are used. For this, rectangular unipolar or bipolar pulses can be used or in the form of a sine wave with frequencies from 10 kHz to 1 MHz.

The purpose of this work is to study the electronic component of a magnetron discharge when it is excited by a pulse in the form of a damped sine wave, the so-called impact excitation. A comparison of its characteristics with similar characteristics of a magnetron discharge which is excited by unipolar rectangular pulses of the same duration, also.

A physically topological model of a magnetron sputtering system has been created to compare the characteristics of an electron cloud when a discharge is excited by rectangular pulses and pulses in the form of a damped sine wave. A pulse of this shape is obtained by applying a current pulse to the oscillating circuit. A feature of this discharge is the ultrahigh voltage of the first pulses. This is caused by resonant phenomena in the power circuit.

The work presents a 2D design of a simulated magnetron sputtering system, a structural diagram of a physical-topological model, and input parameters. The physical models for calculating magnetic and electric fields, the distribution in space and time of electron density and their energy are also given.

As a result of the calculations, the distribution of the magnetic and electric fields in the magnetron sputtering system, the distribution of electron density in space and time, the distribution of electron energy in space and time of electrons during rectangular and impact excitation of the discharge were obtained.



An analysis of the results confirmed the feature previously indicated by other authors. This is the formation of an increased electron density at the fronts of discharge excitation pulses. This can be explained by the acquisition by the electrons at the front of the momentum of energy which corresponds to the ionization cross section of Ar atoms. The electron energy leaves the optimal energy range for ionization of Ar atoms with a further increase of the voltage. Therefore, the ionization efficiency of the operating gas atoms decreases.

It was also found that upon impact excitation of a magnetron discharge: 1) The electron energy above the surface of the target is several times higher than when the discharge was excited by a rectangular pulse. Therefore, the sputtering of the target surface is more intense; 2) The erosion zone of the target increases and therefore the utilization rate of the target material increases 3) Ions bombard and sputter the deposited film in the positive period of the sine wave, if it is under the ground potential.

*Keywords* — magnetron sputtering system, pulse discharge, shock excitation of the discharge, electron energy, electron energy density