

Імпульсне збудження магнетронного розряду

Бевза О. М., ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)

e-mail o.bevza@kpi.ua

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Технології нанесення тонких плівок останнім часом широко застосовують імпульсні режими осадження. Такі режими мають ряд переваг перед традиційним магнетронним осадженням на постійному струмі, а також дозволяють реалізовувати нелінійні ефекти. Але існують певні труднощі при збудженні імпульсного магнетронного розряду, що пов'язані з генерацією вільних носіїв заряду на початковому етапі його розвитку.

Для визначення умов впевненого збудження імпульсного магнетронного розряду без підтримки слабкострумовим фоновим розрядом була створена модель таундсендівського розряду, що виникає на самому початку імпульсного магнетронного розряду та забезпечує його вільними носіями заряду.

В результаті розрахунків були встановлені: 1) напруга, при якій відбувається стабільне збудження самостійного імпульсного магнетронного розряду; 2) діапазон напруг, при яких збудження самостійного імпульсного магнетронного розряду носить нестабільний характер і може призводити до затримки збудження розряду на протязі імпульсу, або взагалі до їх пропусків; 3) напруга, при якій практично неможливо збудити імпульсний магнетронний розряд без сторонніх джерел вільних носіїв заряду.

Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова — імпульсний магнетронний розряд; таундсендівський розряд; траєкторія електронів.

I. ВСТУП

Останнім часом в технології іонного осадження все частіше застосовують імпульсне збудження магнетронного розряду. Імпульсний магнетронний розряд має певні переваги перед магнетронним розрядом на постійному струмі. Такий вид розряду дозволяє знизити теплове навантаження на підкладку шляхом збільшення шпаруватості імпульсів.

У випадку біполярних імпульсів можливо отримати двокомпонентне покриття шляхом почергової подачі імпульсів різної полярності на дві різні мішені. Багатокомпонентні покриття також можливо отримати шляхом почергового короткоімпульсного розпилення декількох мішеней. Дана технологія дозволяє отримувати плівку будь-якого складу, регулюючи довжину імпульсів на кожну з мішеней, компенсуючи таким чином різницю коефіцієнтів розпилення для різних матеріалів.

Імпульсне збудження магнетронного розряду дозволяє суттєво збільшити щільність розрядного струму, а також збільшити ступінь іонізації робочого газу та розпиленого матеріалу з 1%-10% для звичайного магнетронного розряду на постійному струмі до 30%-90% для імпульсного збудження магнетронного розряду [1] [2].

Іншою значною особливістю імпульсного магнетронного розряду є здатність значно знизити вірогідність дугоутворення на катоді при роботі магнетрону в середовищі реактивних газів [3].

Імпульсне збудження магнетронного розряду можливо також застосовувати для реалізації нелінійних ефектів, що обумовлені нелінійною залежністю деяких його параметрів від миттєвої потужності розряду розпилення. Наприклад, залежність щільності упаковки, переважної орієнтації, складу та параметрів решітки тонкої плівки, що осаджується одночасно з іонним бомбардуванням, від енергії окремих іонів при збереженні кількості енергії, що передається одному атому при осадженні [4], залежність розміру плазмової області і ширини зони ерозії мішені від величини миттєвої потужності розряду [5] [6], та інші.

При імпульсному збудженні магнетронного розряду, якщо період між імпульсами > 1 мс, спостерігається нестабільність його виникнення, що обумовлена майже повною деіонізацією міжелектродного простору. В свою чергу, це призводить до зміни довжини імпульсів, а інколи і їх пропуску.

Уникнути вищезгаданої проблеми можливо шляхом застосування слабкострумового фонового розряду, збільшенням тиску робочого газу або напруги, підвищенням частоти імпульсів та зменшенням токової паузи.

В роботі досліджено умови стабільного збудження імпульсного магнетронного розряду без слабкострумового фонового розряду. Таке стабільне збудження можливе, якщо електрони мають енергію, яка відповідає максимальному поперечному перерізу іонізації атомів аргону електронами. Розглянуто перші десятки долі мікросекунди розвитку розряду, коли розряд має характер таундсендівського розряду, вплив



магнітного та електричного полів на процес його розвитку.

II. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

При імпульсному збудженні магнетронного розряду можливо виділити три основні періоди: початковий, квазістаціонарний та післярозрядний. На початковому етапі за умови, що період між імпульсами достатньо великий, кожен раз відбувається формування імпульсного розряду через малу кількість вільних носіїв заряду. Це призводить до значного запізнення виникнення розряду і, в свою чергу, до зміни довжини імпульсів та навіть їх пропусків [3] [4] [5].

Для зменшення часу затримки та нестабільності виникнення розряду застосовують слабкострумовий фоновий розряд, який забезпечує початкову концентрацію заряджених частинок.

При збільшенні тиску нестабільність виникнення імпульсного розряду зменшується за рахунок збільшення частоти зіткнень електронів з молекулами робочого газу. При збільшенні напруги імпульсу збудження розряду нестабільність зменшується за рахунок коефіцієнту вторинної іонно-електронної емісії катода-мішені [6].

Підвищуючи частоту імпульсів та зменшуючи струмову паузу, також можна підвищити стабільність збудження імпульсного магнетронного розряду [11]. При зменшенні інтервалу між імпульсами збільшується залишкова концентрація заряджених частинок і відповідно зменшується нестабільність виникнення розряду. При збільшенні частоти

імпульсів понад 20 кГц практично зникає необхідність в сторонньому джерелі заряджених частинок, наприклад, такому, як слабкострумний фоновий розряд [7] [4]. Але, наприклад, у випадку чутливої до перегріву підкладки такий метод неможливо застосовувати через збільшення теплового навантаження на підкладку.

III. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення умов набуття електронами енергії, яка відповідає максимальному поперечному перерізу іонізації атомів робочого газу (аргону) електронами в перші десяти долі мікросекунди, що відповідає періоду формування початкового таундсендівського розряду. Досліджено інтервал робочих напруг від 300 В до 1800 В за умов, характерних для магнетронного розряду.

IV. МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРЯДНОГО ПРОМІЖКУ (ОСНОВНА ЧАСТИНА)

Досліджувалась модель планарного магнетрону, що зображена на рис. 1. Модель магнетрону має наступні характеристики:

- Розподіл МП змодельований з експериментально виміряного магнетрону.
- Магнітна система магнетрону збалансована.
- Індукція МП в області електронної пастки орієнтовно складає 0,04 Т.

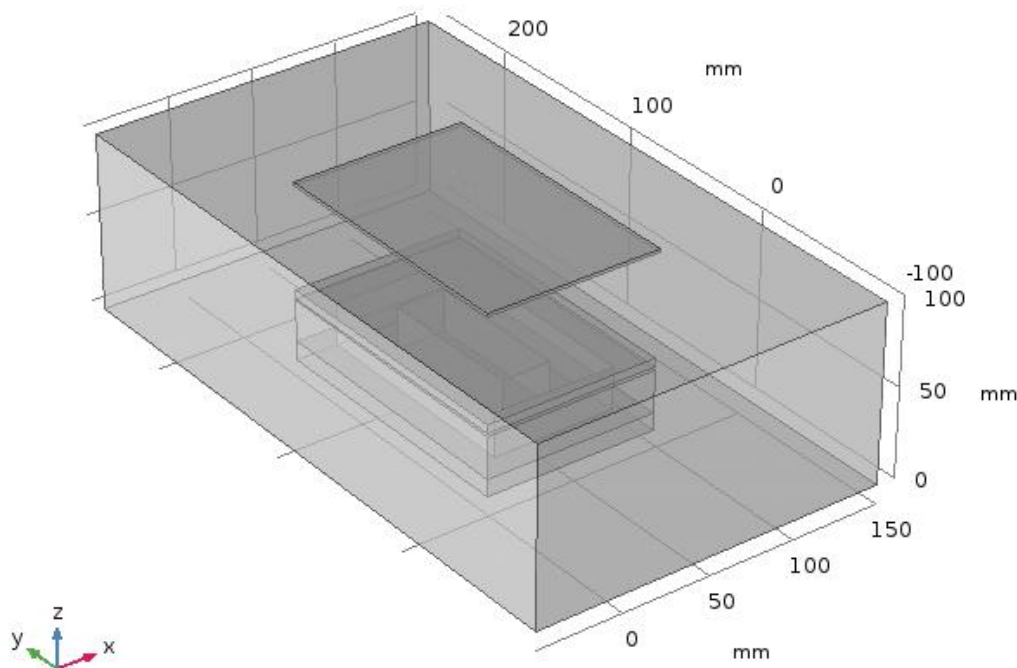


рис. 6 Геометричні параметри моделі магнетрону.

- Катодом-мішенню є мідна пластина з розмірами 154 x 98 мм².
- Напруга на катоді-мішені змінювалась від -300 В до -1800 В з кроком 250 В.
- Анодом є прямокутна пластина з площею, що дорівнює площі катоду-мішені, який розташований над ним на відстані 60 мм. Таке розташування аноду забезпечує максимальну ортогональність електричного та магнітного полів, що є характерною особливістю конструкції магнетронів.
- Пластина аноду знаходиться під потенціалом землі.
- Модель містить розраховане ЕП всередині об'єму, що моделюється.

Модель містить розраховане МП. Приймається, що величина струму, який утворюють електрони, незначна і не вносить спотворень в картину просторового розподілу МП.

- Тиск робочого газу аргону становить 0,67 Па.
- Часовий інтервал, в якому розглядається модель, від 0,01 мкс до 0,1 мкс, в залежності від напруги, що прикладена до катоду-мішені, відповідає часу вільного прольоту електрону, тому в моделі не розглядаються процеси, які відбуваються при зіткненні електрону з іншими елементарними частинками.
- Для моделювання руху електрону в ЕП та МП беруться 100 електронів з нульовою початковою швидкістю, які випадковим чином розміщуються на поверхні катоду-мішені.

Умовою виникнення початкового таундсендівського розряду, який, в свою чергу, генерує носіїв розряду, що необхідні для формування магнетронного розряду, є набуття електронами енергії, величина якої відповідає максимальному поперечному перерізу іонізації атомів аргону електронами. Як видно з рис. 2 [7], енергія електронів, яка відповідає максимальному поперечному перерізу атомів аргону, коли відбувається їх іонізація, лежить в проміжку від 30 еВ до 200 еВ. При енергіях електронів менше 30 еВ іонізація атомів аргону або взагалі не відбувається, або має малу вірогідність, а при енергіях електронів більше 200 еВ різко зменшується загальний переріз взаємодії електронів з атомами аргону і іонізації в тому числі.

Діапазон тиску робочого газу для магнетронного розряду лежить в інтервалі від 0,5 Па до 1 Па. При такому тиску середня довжина вільного прольоту електрону згідно з виразом

$$\lambda = v\tau = \frac{1}{n\sigma},$$

де λ – середня довжина вільного прольоту, v – швидкість електронів, τ – середній час між зіткненнями, n – густина газу, σ – переріз зіткнень [6], складає від 188 мм до 377 мм.

Як показано в [6], в ортогональних ЕП та МП електрон з нульовою початковою швидкістю рухається по траєкторії, відомій під назвою "циклоїда". Циклоїда являє собою траєкторію точки кола, яке котиться в напрямку $[\mathbf{E}\mathbf{V}]$, що складає з векторами \mathbf{E} та \mathbf{V} праву систему. Діаметр кола $D_{це}$, що котиться, можна знайти за виразом:

$$D_{це} = \frac{2mE}{eB^2} = h_{це} (m) = 11,36 \cdot 10^{-12} \frac{E(B/m)}{B^2(T)}, \quad (1)$$

де $h_{це}$ – висота циклоїди, m – маса електрону, B – індукція МП, E – напруженість ЕП.

А період циклотронного обертання $T_{це}$ знаходиться за виразом:

$$T_{це} = \frac{2\pi m}{eB}. \quad (2)$$

Як впливає з виразів (1) та (2) та за умов, типових для магнетрону до виникнення розряду, тобто за умов таундсендівського розряду, коли напруга падає рівномірно на всій довжині розрядного проміжку і магнітна індукція $\leq 0,1$ Т, циклотронна частота електронів складає десятки ГГц, тобто період циклотронного обертання складає соті та десятки долі наносекунди, а висота циклоїди складає 10^{-5} м. Тобто в інтервалі часу, який розглядається в моделі, та за умов, наведених вище, рух електрону в моделі потрібно розглядати як дрейф вздовж силових ліній МП.

З використанням розрахунків моделі та визначеної з них швидкості електрону для різних значень напруженості ЕП було встановлено, що при типових значеннях тиску Аг та напруженості МП час вільного прольоту електрону становить від $\sim 0,5$ мкс при 1800 В до ~ 1 мкс при 300 В. Тобто в інтервалі від 0,01 мкс до 0,1 мкс, в якому здійснено розрахунок моделі, рух електрону можна вважати вільним прольотом.

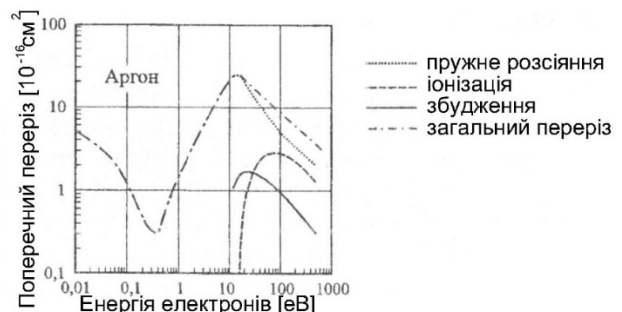


рис. 7 Експериментальні значення перерізу зіткнень електронів з атомами аргону [7]. Наведені значення загального перерізу збудження, що дорівнює сумі перерізів збудження окремих станів. Вісь ординат – поперечний переріз (10^{-16} см²), вісь абсцис – енергія електронів – (eВ).

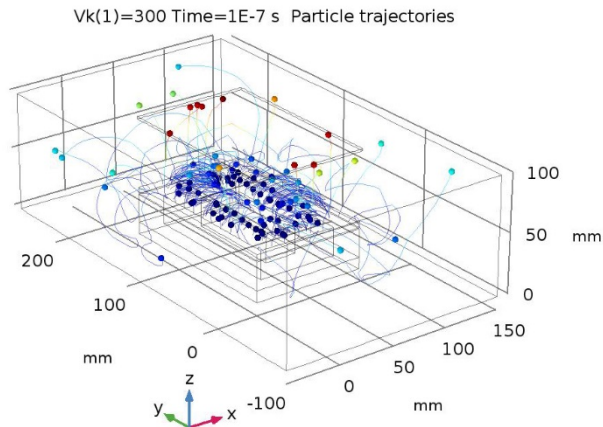


рис. 8 Розраховане переміщення електронів через 0,1 мкс від початку імпульсу при напрузі на катоді-мішені -300 В.

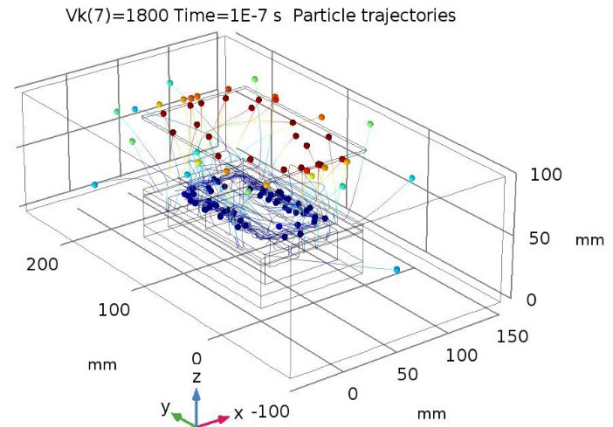


рис. 9 Розраховане переміщення електронів через 0,1 мкс від початку імпульсу при напрузі на катоді-мішені -1800 В.

На рис. 3 та рис. 4 приведено зразок розрахованого переміщення електронів в магнетроні через 10^{-7} с після подачі напруги -300 В та -1800 В на катод-мішень відповідно.

З рисунку видно, що електрони, які не потрапляють в електронну пастку, майже відразу покидають розрядний проміжок, потрапляючи на анод, або уходять в сторону бічних стінок і не беруть участь в розвитку розряду.

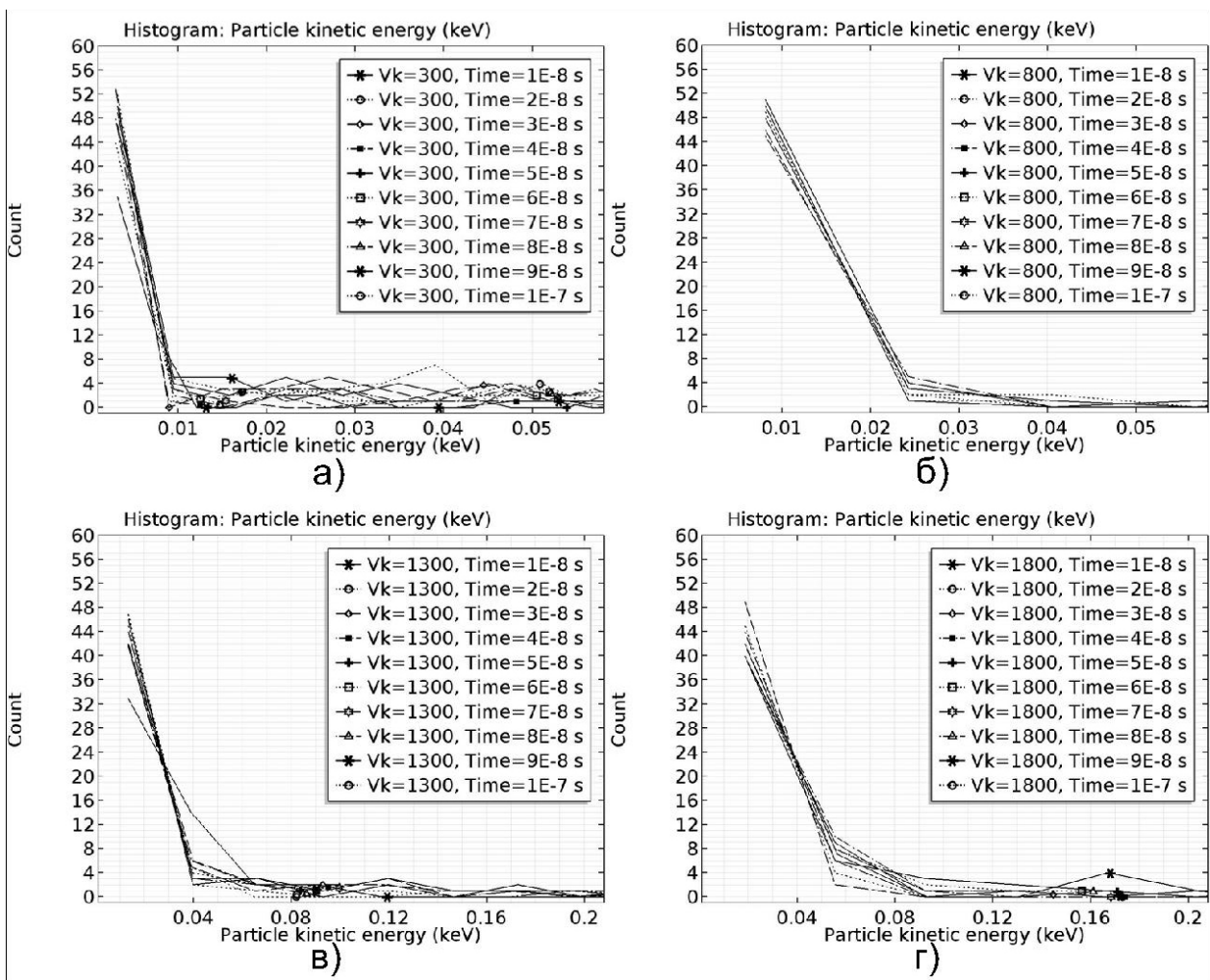


рис. 10 Розподіл електронів по енергіям. Вісь ординат – кількість електронів, вісь абсцис – кінетична енергія електронів в eВ; а – напруга на мішені-катоді $U_k=300$ В; б – напруга на мішені-катоді $U_k=800$ В; в – напруга на мішені-катоді $U_k=1300$ В; г – напруга на мішені-катоді $U_k=1800$ В.

Порівняння характеру руху електронів над поверхнею катоду-мішені для різних значень напруги на катоді-мішені показує, що чим більша напруга, тим сильніше притискається електронна пастка до його поверхні, що в подальшому при розвитку магнетронного розряду призводить до явища локального розрідження робочого газу.

На рис. 5 наведено розподіл електронів по енергіям, яку вони отримують за час вільного прольоту в системі при різних значеннях напруги на катоді-мішені.

Розрахунки показали, що енергія основної частини електронів (понад 70%) в часовому інтервалі від 0,01 мкс до 0,1 мкс фактично не змінюється і має наступні значення:

- $U_k = -300$ В до 10 еВ;
- $U_k = -550$ В – від 5 еВ до 15 еВ;
- $U_k = -800$ В – від 10 еВ до 25 еВ;
- $U_k = -1050$ В – від 10 еВ до 30 еВ;
- $U_k = -1300$ В – від 15 еВ до 40 еВ;
- $U_k = -1550$ В – від 15 еВ до 45 еВ;
- $U_k = -1800$ В – від 20 еВ до 55 еВ,

де U_k – напруга на катоді мішені.

Лише при напрузі -1800 В з'являється незначна кількість електронів (близько 5%) з енергією до 100 еВ. Як видно з наведених розрахунків, енергію, яка відповідає максимальному поперечному перерізу атомів аргону, коли відбувається їх іонізація, набуває переважна більшість електронів при напрузі на катоді-мішені від -1300 В і вище. При менших напругах переважна більшість електронів не отримує енергію, достатню для іонізації атомів аргону.

ВИСНОВКИ

В даній роботі був промодельований таундсендівський розряд, що виникає при формуванні магнетронного розряду. Розраховані траєкторії та енергетичний розподіл електронів в розрядному проміжку в часовому інтервалі від 0,01 мкс до 0,1 мкс для напруги на катоді-мішені від 300 В до 1800 В за допомогою COMSOL Multiphysics®. Результати розрахунків показують, що при імпульсному збудженні магнетронного розряду, за відсутності високовольтного фонового розряду, отримати ефективну іонізацію Ag можливо при напрузі на катоді-мішені більше 1300 В. При напругах від 800 В до 1300 В кількість електронів, що мають енергію, яка відповідає максимальному поперечному перерізу іонізації атомів аргону електронами, дуже незначна і тому розвиток імпульсного магнетронного розряду буде носити нестабільний характер. Тобто запалювання можливе, але буде здійснюватись зі значним запізненням або взагалі з пропус-

Надійшла до редакції 28 травня 2017 р.

сками імпульсів. При напрузі менше 800 В самостійне збудження імпульсного магнетронного розряду практично неможливе.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bradley, J. W.; Karkari, S. K.; Vetushka, A., "A study of the transient plasma potential in a pulsed bi-polar dc magnetron discharge," *Plasma Sources Science and Technology*, no. 13, pp. 189-198, 2004. DOI: [10.1088/0963-0252/13/2/001](https://doi.org/10.1088/0963-0252/13/2/001)
- [2] Welzel, Th.; Dunger, Th.; Kupfer, H.; Richter, F., "A time-resolved Langmuir double-probe method for the investigation of pulsed magnetron discharges," *Journal of Applied Physics*, vol. 96, no. 12, pp. 6994-7001, 2004. DOI: [10.1063/1.1808481](https://doi.org/10.1063/1.1808481)
- [3] Kuzmichev, Anatoly; Sidorenko, Sergey; Steffen, Hartmut; Hippler, Rainer; Kulikovskiy, Valery, "Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply," *Vacuum*, vol. 72, no. 1, pp. 59-69, 2004. DOI: [10.1016/S0042-207X\(03\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(03)00100-3)
- [4] Denbnoveckij, S. V.; Hippler, R.; Kuzmichev, A. I.; Kulikovskij, V. Ju., «Zapazdyvanie vznikovenija razrjada v impul'snyh magnetronnyh raspylitel'nyh ustrojstvah [Delay in the beginnings of a discharge in pulsed magnetron sputtering devices],» *Electronics and communications*, vol. 8, no. 2, pp. 195-198, 2000.
- [5] Kuzmichev, A. I.; Kulikovskij, V. Ju.; Sidorenko, S. B., «Dinamicheskie karakteristiki impul'snoj magnetronnoj raspylitel'noj sistemy [Dynamic characteristics of the pulsed magnetron sputtering system],» *Izv. AN (Moskva). Ser. Fizicheskaja*, vol. 64, no. 7, pp. 1317-1321, 2000.
- [6] A. Kuzmichev, *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy [Magnetron sputtering systems]*, vol. 1, Kiev: Avers, 2008. ISBN 966-8934-07-5
- [7] Kolev, Ivan; Bogaerts, Annemie; Gijbels, Renaat, "Influence of electron recapture by the cathode upon the discharge characteristics in dc planar magnetrons," *Physical Review E*, vol. 72, no. 056402, pp. 1-11, 2005. DOI: [10.1103/PhysRevE.72.056402](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.056402)
- [8] Kouznetsov, Vladimir; Macak, Karol; Schneider, Jochen M.; Helmersson, Ulf; Petrov, Ivan, "A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities," *Surface and Coatings Technology*, vol. 122, no. 2-3, pp. 290-293, 1999. DOI: [10.1016/S0257-8972\(99\)00292-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00292-3)
- [9] Kuzmichev, A. I.; Melnyk, Yu. I.; Kulikovskiy, V. Yu.; Bohac, P.; Jastrabik, L., "International Conference on Phenomena in Ionized Gases (26th)," in *Characteristics of pulse magnetron discharge with power supply from a capacitor energy storage*, Greifswald, 2003.
- [10] Macak, Karol; Kouznetsov, Vladimir; Schneider, Jochen; Helmersson, Ulf, "Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density magnetron discharge," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 18, no. 4, pp. 1533-1537, 2000. DOI: [10.1116/1.582380](https://doi.org/10.1116/1.582380)
- [11] J. S. Colligon, "Energetic condensation: Processes, properties, and products," *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 13, no. 3, pp. 1649-1657, 1995.
- [12] Romanov, N. V.; Gavrilov, S. E., "Effect of cathode surface state on the characteristics of pulsed hollow-cathode glow discharges," *Technical Physics*, vol. 44, no. 5, pp. 497-500, 1999.



УДК 62-93

Импульсное возбуждение магнетронного разряда

Бевза О. Н., ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)e-mail o.bevza@kpi.ua

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Технологии нанесения тонких пленок в последнее время широко применяют импульсные режимы осаждения. Такие режимы имеют ряд преимуществ перед традиционным магнетронным осаждением на постоянном токе, а также позволяют реализовывать нелинейные эффекты. Но существуют определенные трудности при возбуждении импульсного магнетронного разряда, связанные с генерацией свободных носителей заряда на начальном этапе его развития.

Для определения условий уверенного возбуждения импульсного магнетронного разряда без поддержки слабо-точным фоновым разрядом была создана модель таунсендовского разряда, возникающего в самом начале импульсного магнетронного разряда и обеспечивающего его свободными носителями заряда.

В результате расчетов были установлены: 1) напряжение, при котором происходит стабильное возбуждение самостоятельного импульсного магнетронного разряда; 2) диапазон напряжений, при которых возбуждение самостоятельного импульсного магнетронного разряда носит нестабильный характер и может приводить к задержке возбуждения разряда во время импульса, или вообще к их пропускам; 3) напряжение, при котором возбудить импульсный магнетрон разряд без посторонних источников свободных носителей заряда практически невозможно.

Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова — импульсный магнетронный разряд; таунсендовский разряд; траектория электронов.

UDC 62-93

The magnetron discharge pulse excitation

O. M. Bevza, ORCID [0000-0002-0903-1263](https://orcid.org/0000-0002-0903-1263)e-mail o.bevza@kpi.uaNational technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—Pulse mode is widely used for deposition technology of thin films. These regimes have the advantages over traditional magnetron deposition. During pulsed sputtering nonlinear effects may occur also. But there may be difficulties in excited of a pulsed magnetron discharge. It is due to the generation of free electric charge carriers at the initial stage of the discharge.

The purpose of the work is to determine the conditions when the electron energy corresponds to the maximum cross-section of argon atoms ionization for hundreds of nanoseconds from begin. During this period a Townsend discharge develops. The research is conducted for voltages from 300 V to 1800 V and a pressure of $5 \cdot 10^{-3}$ Torr, which are typical for magnetron discharge.

The magnetron model has the following characteristics:

The magnetic field has a distribution as an experimental sample;

The magnetic field of the magnetron is balanced;

The voltage at the cathode-target varies from -300 V to -1800 V with 250 V step.

The anode is located at a distance of 60 mm from the cathode-target;

The anode has the potential of the ground;

The pressure of the working gas (argon) is $5 \cdot 10^{-3}$ Torr;

Trajectories of 100 electrons were modeled. They were located on the cathode-target surface in a random manner and had zero kinetic energy at the beginning.



The Townsend discharge is beginning when the electrons has an energy corresponding to the maximum cross-section of argon atoms ionization by electrons. It corresponds to the interval of electron energy from 30 eV to 200 eV.

The calculations are made for the time interval from 0.01 μ s to 0.1 μ s after voltage was applied to the discharge gap. They show that the energy of the main part of electrons (over 70%) has the following meanings:

For $U_k = -300$ V, the electron energy is up to 10 eV;

For $U_k = -550$ V, the electron energy is from 5 eV to 15 E;

For $U_k = -800$ V, the electron energy is from 10 eV to 25 E;

For $U_k = -1050$ V, the electron energy is from 10 eV to 30 E;

For $U_k = -1300$ V, the electron energy is from 15 eV to 40 E;

For $U_k = -1800$ V, the electron energy is from 20 eV to 55 E,

where U_k is voltage on the cathode-target.

The trajectories of electrons for the cathode-target voltage from 300V to 1800V were calculated. The samples of the calculation results are shown in Figures 3 and 4. It shows that with increase of voltage at the cathode-target, the electronic trap is move down to the surface of it. When the Townsend discharge passes into a magnetron discharge, this leads to the phenomenon of rarefaction of the working gas over of the cathode- target surface.

As a result of calculating the distribution of electron energies, the following were determined: 1) The voltage of a self-maintained pulsed magnetron discharge stable excitation. This voltage should be more than 1300 V. 2) The voltage range at which the excitation of a self-maintained pulsed magnetron discharge is unstable and can lead to a delay in the excitation of the discharge during the pulse, or to their passes. This is the voltage range is from 800 V to 1300 V. 3) The voltage at which a pulsed magnetron discharge can't be excited without external sources of free electric charge carriers.

Ref. 12, Fig. 5.

Key words — Pulsed magnetron discharge; Townsend discharge; Trajectory of electrons.