

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

(повне найменування вищого навчального закладу)

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ “ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ”

(назва факультету)

КАФЕДРА ФІЗИКИ ЯДРА ТА ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ІМЕНІ О. І. АХІЄЗЕРА

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

МАГІСТРА

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

укр. Фізичні основи магнетронного розпорощення та
різновиди магнетронних систем для нанесення покриттів

англ. Physical basics of magnetron sputtering and types of
magnetron systems for coating deposition

Виконав: студент 2 курсу навчання

за ОНП магістр

спеціальності 105 Прикладна фізика та
наноматеріали

освітня програма: Експериментальна ядерна
фізика та фізика плазми

Верещака Є. А.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Керівник кандидат фізико-математичних
наук, ст. н. с. Серeda К. М.

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

(особистий підпис)

Харків – 2022 рік

Зміст

Анотація	2
1. Вступ	3
2. Основна частина	13
2.1. Принцип дії магнетронних розпорошувальних систем	13
2.1.1. Фізичні принципи іонного розпорошення	22
2.1.2. Фізичні принципи дії магнетронних розпорошувальних систем	32
3. Висновки	43
Список літератури	44

Анотація

У цій оглядовій дипломній роботі розглядаються фізичні принципи дії магнетронних розпорошувальних систем. Детально обговорюється процес іонного розпорошення. Описано рух електронів та іонів у розрядному проміжку MPC, обґрунтовано принцип утворення магнітної пастки для електронів.

Розглянуто різні види MPC, залежно від їх геометрії (циліндричні, планарні, конічні) і магнітною конфігурацією (збалансовані і незбалансовані). Було оговорено імпульсні MPC та MPC з ВЧ-індуктором.

Annotation

In this review diploma paper the physical principles of operation of magnetron sputtering systems are considered. The process of ion sputtering is discussed in detail. The motion of electrons and ions in the discharge gap of the MSS is described, the principle of formation of a magnetic trap for electrons is explained.

Different types of MSS are considered, depending on their geometry (cylindrical, planar, conical) and magnetic configuration (balanced and unbalanced). Pulse MSS and HF-induced MSS were mentioned.

1. Вступ

У сучасному світі важко уявити наукове дослідження чи новітні технології, де б не використовувались в тому чи іншому обсязі нанесені покриття. Задля досягнення покриттів малої товщини, великої щільності розподілення наносимого матеріалу та низького вмісту домішок, використовують технологію напилення, яка базується на попередньому розпорошенні наносимого матеріалу та подальшому його осадженню на покриття, яке треба вкрити плівкою.

Серед великої кількості прикладів застосування нанесення тонких шарів покриттів слід виділити такі: мікро- і наноелектроніка (нанесення тонких шарів провідників у зони контактів, формування напівпровідникових та діелектричних шарів), машинобудування (окремі механізми та їх компоненти потребують нанесення покриттів зі зносостійких, жаростійких або стійких до корозії покриттів, як, наприклад, нікель-хромове покриття, або вольфрамове покриття), просвітлення оптики (створення тонкого шару оптично прозорої плівки сприяє інтерференції світлового випромінювання, що потрапляє в об'єктив оптичного пристрою, що, в результаті, підсилює потік світла, що реєструється приладом. Що важливо, така технологія дозволяє підсилювати випромінювання з конкретної довжиною хвилі.), в галузі нанесення захисних і декоративних покриттів для будівництва (наприклад “позолота” куполів церков, яку в наші дні зазвичай виконують за допомогою покриття, наприклад, з нітриду титану, який має золотистий колір, проте стійкий до корозії та подряпин) та створення захисних покриттів для наукових дослідницьких установок у яких присутнє іонізуюче випромінювання (наприклад, прискорювачі та реактори) та у інших галузях.

Загалом, існують такі методи газотермічного напилення: газополуменеве напилення (спочатку формується струмінь суміші газів, їх продукти згоряння спрямовуються на матеріал, який треба покрити) та високошвидкісне газополуменеве напилення (газотермічне напилення здійснюється за рахунок швидкого, до 3 швидкостей звуку, струменя газової або порошкової суміші), детонаційне напилення (струмінь матеріалу напилення походить від детонації), електродугове напилення (ще один вид газотермічного напилення, який полягає у тому, що напилюваний матеріал є електродом для дугового розряду, а струмінь матеріалу формується за рахунок стисненого газу, наприклад, повітря) та плазмове напилення (при якому використовується керований струмінь з іонів та електронів, а також атомів газової суміші, що транспортують матеріал розпорошеної мішені до підкладки).

Також слід згадати про метод термічного напилення який заснований на нагріванні вихідного матеріалу та його подальшому випарюванні; опісля пара вихідного матеріалу конденсується на підкладці. Такий метод напилення є залежним від “чистоти” вакууму, бо наявність будь-яких домішок призводить до формування бульбашок та крапель на поверхні підкладки незалежно від ступеня її поліровки. Також існує проблема фракціонування осаджуваного покриття через різницю тиску у парі випаровуваного матеріалу.

Окремо слід виділити технологію фізичного осадження у вакуумі (за тиску не більше ніж 10 Па або 0,1 Торр). Physical Vapor Deposition або PVD – фізичне осадження у вакуумі, це добре керована технологія, що дозволяє отримувати багатокomпонентні покриття, що мають складну структуру. Вміст забруднень та домішок при цьому залишається досить низьким. За допомогою PVD технології виробляють покриття, стійкі до корозії та механічних ушкоджень (стійкі до вологих та хімічно активних середовищ, а також до подряпин, високого тиску і т.д.), а також з підвищеною адгезією

до підкладки. Що ще важливо зазначити, при фізичному осадженні у вакуумі не виникає необхідності в утилізації відходів, тож ця технологія є досить екологічною.

Перевага плазмового напилення, а саме вакуумно-плазмових методів напилення матеріалу, полягає у тому, що вони дозволяють створити рівномірний струмінь напилюваного матеріалу великої щільності, майже без домішок, а саме нанесене покриття при цьому зазвичай однорodne, без крапель, бульбашок і тріщин.

У вакуумно-плазмових технологічних процесах осадження тонких плівок та покриттів поряд з іншими широко застосовується метод магнетронного розпорошення [1]. Завдяки використанню у магнетронних розпорошувальних системах (далі — МРС) зхрещених електричного та магнітного полів вдалося значно збільшити ефективність іонізації газу, а густина плазми стала на порядок (або порядки) більше, ніж у пристроях катодного розпорошення без магнітного утримання електронів газорозрядної плазми. Як результат, вдалося збільшити густину іонного току на катод, а також швидкість магнетронного розпорошення. Вдалося зменшити тиск робочого газу та покращити багато характеристик осаджуваних покриттів. В багатьох випадках тонкі плівки та покриття, осаджувані у МРС мають такі ж самі або кращі характеристики, ніж більш товсті шари, які було осаджено іншими методами, тому магнетронне розпорошення все частіше використовують для нанесення зміцнюючих, зносостійких, захисних, декоративних та інших видів покриттів на різноманітну основу [2-9].

Нижче наведено ключові моменти у дослідженні магнетронного (аномального тліючого) газового розряду та розвитку магнетронних розпорошувальних систем.

Таке фізичне явище як газовий розряд люди спостерігали ще у давні часи, ось найбільш яскраві приклади: це була і блискавка, яку і по сьогодні

досконально не вивчили, і так звані “Вогні Святого Ельма”, які добре відомі людству (цей коронний розряд можна побачити на гострих кінцях предметів: щогли кораблів, антени, тощо). Перші спроби дослідити газовий розряд було зроблено ще наприкінці 18 — початку 19 сторіччя. Як результат — було відкрито та досліджено тліючий та дуговий розряди (Деві, Петров, Фарадей) у 19 сторіччі, оскільки лише тоді було винайдено достатньо потужні джерела живлення. Багатим на відкриття був зтик 19 і 20 сторіч, коли Таунсенд, Томсон, Крукс та інші видатні вчені проводили свої дослідження.

У 1898 році англійським науковцем Філіпсом було проведено дослідження розряду між двома залізними електродами стрижневого типу, розміщених у герметичній скляній колбі. Експеримент показав, що зниження тиску робочого газу всередині колби до критично низького рівня, за якого припиняється самостійний розряд між електродами, за наявності коаксіального соленоїдного магнітного поля, у колбі на короткий час можна було спостерігати світіння у формі кільця навколо міжелектродного простору. Цей вид розряду пізніше було названо філіпсівським.

У 1913 році проф. Струттом було інтерпретовано філіпсівський розряд як електричний розряд у схрещених полях — аксіальному магнітному полі та радіальному електричному [17]. Задля цього було промодифіковано систему Філіпса: було з'єднано обидва стрижневі електроди та сформовано у суцільний катод, навколо якого було розміщено суцільний кільцевий анод. Струтт зробив спостереження, що при достатньому значенні напруженості магнітного поля встановлювався

стійкий газовий розряд між катодом та анодом. Цей ефект було обґрунтовано тим, що за низького тиску довжина вільного пробігу електронів була вищою за міжелектродну відстань, проте вплив магнітного поля змінював траєкторію електронів таким чином, що вони проходили значно більший шлях і, як наслідок, кількість іонізуючих зіткнень була достатньо збільшена для утворення газового розряду.

Пізніше у 1921 році Альберт Хелл опублікував статтю [18]. У цій було описано новий пристрій для генерації надвисокочастотних (НВЧ) електромагнітних коливань — магнетрон. Він дослідив залежність критичної величини індукції магнітного поля (B) від критичного значення напруги (U) на електродах та сформулював вираз для параболі критичного режиму (яку пізніше було названо параболою відсічки Хелла):

$$\left(\frac{U}{B_{кр}^2}\right) = \frac{ed^2}{2m}$$

де d — міжелектродна відстань, e та m — заряд та маса електрона.

У 30-і роки 20 сторіччя систематично вивчав газові розряди у магнітних полях Франц Мішель Пеннінг. Він досліджував розряд у комірці Пеннінга, а також розряд у циліндричному зверненому магнетроні (обидві системи мають спільні риси з експериментальним приладом Струтта)[19]. У 1940 році Пеннінгом було опубліковано статтю [20], у якій було описано стрижневу магнетронну розпорошувальну систему на основі нормального магнетрона. Ця праця була дуже важливою для технології магнетронного розпорошення і, можна сказати, розпочала її. Хоча магнетронний розряд і

застосовувався у багатьох пристроях, проте використання методу магнетронного розпорошення для нанесення покриттів не набуло активної популярності.

У 1960 роках дослідження магнетронного розряду було поновлено задля задоволення потреб мікроелектроніки, що відображено у роботах таких вчених як С. Хаякава та К.Васа; В. Джил та Е. Кей. А у 1970 роках — у роботах Дж. Торнтонна.

З 1970-х років і до сьогодення основним напрямком розвитку МРС були системи з конічним або пласким катодом-мішенню. Перші планарні МРС (МРС з пласким катодом) були зконструйовані так, що мали два пласких паралельних один одному електроди, однак через неоднорідність магнітного поля (тобто, незбалансованість системи) розряд ставав нерівномірним [21].

У 1973 році Дж. Корбані та у 1974 році Дж. Чепін заявили МРС, які було побудовано таким чином, що радіальне магнітне поле створювалось лише біля поверхні катода. Окрім цього в цих системах було використано магнітопроводи для замикання магнітних ліній над поверхнею катода та збалансування системи [21].

Ще наприкінці 1960-х років були спроби використати імпульсні режими у технології нанесення покриттів, однак в ті часи ця технологія не віднайшла популярності, через складнощі у розробці імпульсного блоку живлення, маючи електроніку тих часів. Лише у 1990-х роках імпульсні

МРС почали активно використовувати у промисловості. Значний внесок у дослідженнях в цьому напрямі зробили вчені з Фраунгоферівського інституту з електронно-променевої та плазмової техніки у Дрездені, під керівництвом З. Шиллера [22].

Дослідження магнетронного розряду та проєктування новітніх МРС не стоїть на місці та проводиться і у наші дні, наприклад, не так давно, у 2019 році, вийшла праця “Дослідження електронної складової імпульсного магнетронного розряду”, Кузьмичев А.І., Бевза О.М.

Максимальна ефективність методу магнетронного розпорошення пропорційна величині максимального струму магнетронного розряду. При цьому МРС зі стаціонарним режимом роботи (при постійному струмі розряду), при великих значеннях струму, вище деякого критичного, магнетронний (аномальний тліючий розряд у поперечному магнітному полі) розряд переходить у дуговий, а сам процес ерозії мішені змінює свій характер. Характерною особливістю для дугового розряду є утворення на поверхні катода магнетронної розпорошувальної системи катодних плям, що швидко пересуваються [10]. Під впливом катодної плями, процес ерозії катода вакуумної дуги призводить до формування так названого “катодного факела” - надзвукового струменя частково іонізованого матеріалу катода, у вигляді крапель та пари речовини, з високою провідністю [11-13], що замикає накоротко проміжок розряду. Блоки електроживлення МРС зазвичай не розраховані на такі великі значення

струму (для дугового розряду характерні значення струму порядку 100 А і вище), тож утворення замикання призводить до поломки або руйнування систем електроживлення МРС, або до спрацьовування запобіжника. Окрім цього, макрочастинки з матеріалу катода, що розпорошені у плазмі газового розряду, призводять до погіршення адгезії покриття до поверхні, появи пористості та шорсткості поверхні, і, як результат, покриття стає непридатним для використання у низці технологічних задач, як, наприклад, нано- та мікроелектроніка, точна механіка, медицина, оптика та інші.

У сучасних МРС активно застосовуються блоки електроживлення постійного струму з запобіжною системою у вигляді резистивного обмеження струму розряду до величини менше критичного струму формування дуги; також використовують запобіжні системи електронного відключення живлення в момент виникнення дугового розряду [14].

Ще одним цікавим рішенням є дослідження імпульсних режимів роботи МРС, що дозволяють гасити дугу за допомогою застосування імпульсних джерел живлення та ВЧ-джерел живлення [15,16]. Як результат, ефективність переносу маси зростає в кілька разів, при цьому поверхня покриття залишається чистою від новоутворень у вигляді крапельної фази матеріалу катода.

Для запобігання переходу розряду з магнетронного (аномального тліючого) в дуговий також часто використовують системи з додатковою

магнітною ізоляцією анода. Застосування такої конфігурації магнітного поля зазвичай забезпечує ефективне переривання струму дуги, при цьому магнетронний розряд не вимикається примусово ззовні.

Подальше підвищення ефективності нанесення покриттів за допомогою МРС гіпотетично дозволяє швидко наносити покриття (наприклад, на рулонні матеріали), а також покращити структуру, властивості і якість покриттів.

Дослідження у цій галузі важливі для розвитку технологій нанесення покриттів, що в свою чергу є нагальною потребою у багатьох областях науки та техніки.

Нанесення покриттів, які є стійкими до високих температур, механічних та радіаційних пошкоджень, корозії – це одна з першочергових технологічних задач сучасної науки і техніки, яка може знайти використання у багатьох галузях не тільки промисловості, а й наукових досліджень. Так, наприклад, покриття із вольфраму (з якого важко виробляти будь-які деталі через його високу температуру плавлення — 3695 K; більшість вольфрамових виробів отримують за рахунок спікання порошку, або вироблення сплавів) може віднайти місце у технологіях захисту від іонізуючого випромінювання. Захист з вольфраму є значно ефективнішим, порівняно зі свинцевим. Однак через його твердість і велику температуру плавлення, для захисту від іонізуючого випромінювання використовують сплави вольфраму з додаванням нікелю, міді, заліза та інших металів, або суспензію

порошкового вольфраму у полімерній основі. Використання покриттів з вольфраму, які було нанесено методом магнетронного розпорошення, допоможе просунутися у вирішенні цієї проблеми. Це може знайти застосування, наприклад, у наукових дослідницьких центрах з вивчення термоядерного синтезу або радіоізотопів. Однак в установках такого типу потрібно використовувати досить товстий шар вольфраму. Задля цього і потрібно розвивати технологічну галузь нанесення покриттів.

2. Основна частина

2.1. Принцип дії магнетронних розпорошувальних систем

2.1.1. Фізичні принципи іонного розпорошення

Для повного розуміння принципу дії МРС необхідно розглянути процес іонного розпорошення катоду-мішені.

Іонне розпорошення - це процес кінетичного вибивання атомів з поверхні твердого тіла (мішені) за рахунок передачі імпульсів від іонів до атомів при бомбардуванні її поверхні іонами.

В умовах газового розряду на іонне розпорошення впливають не тільки іони робочого газу, а й інші види частинок, включно з атомами після перезарядки іонів і фотонами з газорозрядної плазми. Також, на поверхню мішені можуть наносити хімічно активні добавки задля впливу на хід процесу розпорошення (це може бути як пришвидшення, так і уповільнення).

Отже, як наслідок бомбардування поверхні катода іонами робочого газу, відбувається її (мішені-катода) розпорошення та формування потоку розпорошених атомів у напрямку підкладки. Коефіцієнт розпорошення S визначається за формулою N_a/N_i , де N_a - кількість розпорошених атомів, а N_i - кількість іонів, що розпорошили ці атоми. Для іонного розпорошення іони мають бути достатньо швидкими, а їх енергія має бути більшою за порогову. Зазвичай порогова енергія знаходиться у діапазоні 10-30 еВ. Коефіцієнт розпорошення залежить від енергії іонів, куту їх падіння, їх маси та матеріалу і температури мішені.

Залежність коефіцієнту розпорошення від енергії іонів робочого газу наведено на рис. 1. Як можна проспостерігати, коефіцієнт розпорошення за енергій до 70-80 еВ швидко зростає, а ближче до 10-40 кеВ виходить на насичення.

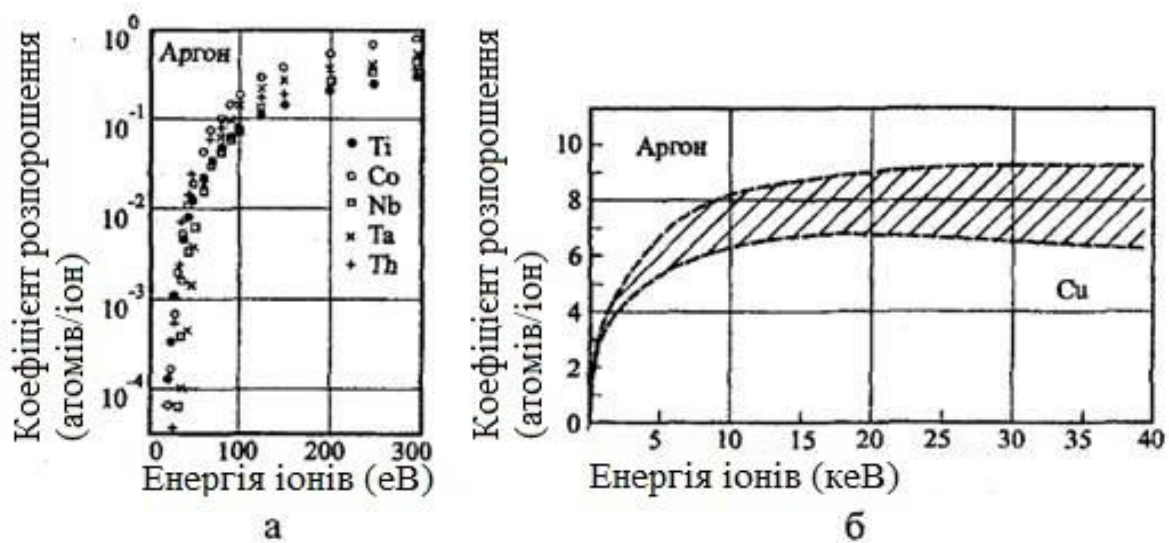


Рис.1 Залежності коефіцієнта іонного розпорошення від енергії іонів аргону для різних металів (а) та для міді (б) [23]

Залежність коефіцієнта розпорошення від кута падіння іонів φ можна апроксимувати формулою:

$$S(\varphi) = S(0)\cos^{-1}\varphi$$

де $S(0)$ – це значення коефіцієнту розпорошення при нормальному падінні іонів на мішень. При збільшенні кута падіння φ від 0 до $40-70^\circ$ спостерігається зростання S . При подальшому збільшенні φ , величина S зменшується і за $\varphi = 90^\circ$ практично знижується до нульових значень. У магнетронному розряді, зазвичай, кут падіння $\varphi = 0$, оскільки межа розрядної плазми, що слугує емітером іонів, проходить паралельно до поверхні мішені (катода), а силові лінії електричного поля у шарі між плазмою і катодом являють собою прямі, перпендикулярні до поверхні мішені.

Щодо залежності коефіцієнту розпорошення S від маси бомбардуючих катод іонів робочого газу, то S зростає зі зростом маси та

атомного номера іону в області енергій, що характерні для магнетронного розряду. На практиці, частіше за все в якості робочого газу, з якого походять іони, використовують аргон, адже він хімічно нейтральний, досить важкий, тож добре розпорошує матеріали і відносно дешевий.

Залежність S від атомного номера розпорошуваного матеріалу має складний періодичний характер і в межах одного періоду періодичної таблиці Менделєєва зростає по мірі заповнення електронних d-оболонки.

Залежність коефіцієнту розпорошення від температури підкладки майже відсутня в діапазоні від нуля до декількох сотень градусів, проте має бути врахована для більших температур.

Розпорошені частинки мають достатньо велику кінетичну енергію (порядку 1-10 eV), завдяки якій вони здатні вільно переміщатися на великі відстані від катоду-мішені. Якщо частинки потрапляють на підкладку, то вони конденсуються на ній, утворюючи тонкий шар матеріалу з розпорошеної мішені, що і є основою іонної технології нанесення покриттів.

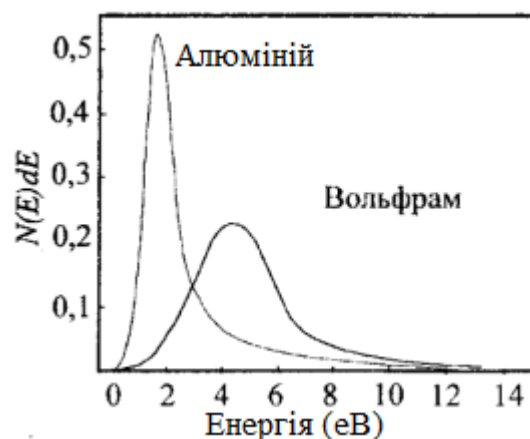


Рис. 2 Енергетичне розподілення розпорошених атомів мішені-катоду [23]

На рис. 2 наведено розподілення розпорошених атомів алюмінію і вольфраму по енергіям. Як видно з графіків, енергія розпорошених

частинок значно вище, ніж енергія частинок, отриманих методом термовакuumного випаровування (порядка 0.1 eV). Підвищена енергія розпорошених частинок, у свою чергу, під час конденсації призводить до енергетичної активації процесу конденсації атомів мішені-катода на підкладці, що в результаті суттєво впливає на якість осаджуваних плівок: підвищується їх адгезія до підкладки, а також їх структура стає більш щільною.

Під час бомбардування більш складних, багатокomпонентних, мішеней, розпорошені частинки можуть бути не тільки окремими атомами, з яких складається речовина мішені, але й молекулярними структурами. При розпорошенні оксидів і нітридів у інертному газі конденсат на підкладці не буде повністю відповідати хімічному складу мішені через те, що частина розпорошених молекул могла пройти процес дисоціації та втратити кисень або азот. Для відновлення хімічної однорідності складу покриттів розпорошення проводиться у суміші аргону з реакційним газом (процес реакційного розпорошення). Однак присутність реакційного газу призводить до того, що на поверхні мішені утворюються продукти реакції розпорошеного матеріалу мішені з газом – оксида, нітрида, тощо. Залежно від того, яке покриття потрібно нанести, це може як допомогти, так і завадити.

Що також дуже важливо зазначити при розгляді іонного розпорошення, це той факт, що іонне бомбардування мішені призводить до вторинної іон-електронної емісії (яку ще часто називають гамма-емісія через те, що вона визначається однойменною константою з теорії газового розряду Таунсенда). [23] Ця емісія дуже важлива для підтримання самостійного газового розряду і має дві складові: потенціальну і кінетичну (відповідно до механізмів виходу електронів з твердого тіла). Потенціальна емісія відбувається за рахунок дії поля іонів, що знаходяться у зоні, близькій до поверхні тіла, і не залежить від енергії іонів. Кінетична емісія

обумовлена тим, що іони передають частину своєї кінетичної енергії електронам, тож ця частина пропорційна кінетичній енергії іонів. За енергії іонів порядку сотні eV, що відповідає магнетронному розряду, гамма-емісія дуже слабо залежить від енергії іонів, тож є переважно потенціальною.

На гамма-емісію впливає багато чинників: рід іонів, хімічний склад поверхні (наявність забруднень, оксидних плівок, діелектричних покриттів, тощо), а також, геометрія її поверхні. Через те, що в умовах реального газового розряду, особливо з включенням реакційного газу, коефіцієнт гамма-емісії постійно змінюється, тож інформація з літературних джерел може слугувати лише як орієнтовна.

Також слід зазначити, що до вторинної електронної емісії в мішені магнетронної розпорошувальної системи призводять не лише іони робочого газу, а також метастабільні збуджені частинки та/або фотони з розрядної плазми і ще як наслідок бомбардування високоенергійними нейтральними частинками. Однак, з усіх перелічених чинників, потенційна гамма-емісія відіграє найбільшу роль.

Іони, що бомбардують поверхню катоду-мішені, також беруть участь і в інших процесах, таких як: нагрів мішені, імплантація або адсорбція до поверхні мішені, або часткове розсіяння у зворотному напрямку.

Нагрів мішені – це дуже важливий технічний аспект розпорошувальних систем. Основна частка первинної енергії іонів, що бомбардують мішень-катод (близько 80%), іде на її нагрівання, тож МРС потребують системи примусового охолодження. Частка енергії, що йде на розпорошення мішені зазвичай не перевищує 5%, а інші 15% енергії йдуть на інші втрати: імплантацію іонів в тіло мішені, її радіаційні пошкодження, зворотне розсіювання іонів, вторинну електронну емісію і електромагнітне випромінювання. Таким чином, ККД розпорошувальних систем досить низький і не перевищує кількох відсотків.

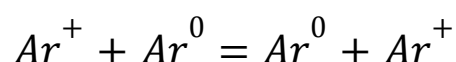
Оскільки енергія іонів у магнетронному розряді не перевищує 1 кеВ, то іони втручаються тільки у тонкий приповерхневий шар матеріалу, а пізніше вони, наразі з адсорбованими іонами, звільняються в нейтралізованому стані (тобто атомарному) під час подальшого розпорошення і десорбуються.

Розглядаючи зворотно розсіяні іони, слід зазначити, що частина іонів, що бомбардують поверхню мішені, розсіюються у зворотному напрямку у вигляді нейтральних атомів робочого газу. Частка зворотно розсіяних іонів, що не проходять процес нейтралізації та зберігають свій заряд, нехтовно мала ($\sim 10^{-3}$), тож її можна не брати до уваги. Коефіцієнт відбиття залежить від енергії первинних іонів, їх роду і матеріалу мішені. Для іонів аргону в умовах магнетронного розряду його величина може становити до 20%, а в середньому вона порядку кількох відсотків. При нормальному падінні іонів, зворотно розсіяні атоми розподіляються по кутах вильоту за законом косинуса, а спектр їх енергій від 0 до енергії первинних іонів. Середня енергія відбитих частинок становить 100 еВ. Зворотно розсіяні атоми летять в напрямі підкладки та можуть передавати їй значну енергію.

Ще одне важливе для обговорення питання – це зіткнувальний характер руху іонів у шарі просторового заряду поблизу мішені, а також, розпорошених частинок та відбитих атомів (описані раніше іони, що пройшли “нейтралізацію”) у газі в напрямку підкладки.

Іони, що потрапляють на мішень МРС (яка є катодом), прискорюються у прикатодному шарі позитивного просторового заряду. Цей шар також зветься темним катодним простором, оскільки газ у ньому світиться набагато слабше, ніж у розрядній плазмі. Шар автоматично формується навколо катода в будь-якому типі розряду через низьку рухливість іонів і забезпечує прискорення не тільки іонів, а ще й катодних електронів у зворотному напрямку. Падіння напруги у цьому шарі

приблизно дорівнює напрузі розряду U , і якщо іони не зіштовхуються з молекулами газу, їх енергія на катоді дорівнює qU , де q - заряд іона. При зіткненні з молекулами газу іони здійснюють пружні й непружні зіткнення: перші призводять до їх відхилення від попереднього напрямку руху і втрати їх кінетичної енергії; другі, за умов, які зазвичай наявні в розпорошувальних системах, пов'язані з перезарядкою іонів, під час якої вони перетворюються в нейтральні частинки, зберігаючи вектор своєї швидкості, а газові молекули перетворюються на іони з початковою енергією, що відповідає тепловій енергії молекул газу. Опісля нейтральні частинки летять до мішені- катоду за інерцією, а іони починають прискорюватись до наступного зіткнення з молекулою газу або мішенню. Для реакції перезарядки іонів Ar^+ у власному газі можна записати наступне рівняння:



Таким чином, рух іонів у катодному шарі має “естафетний характер”, а катодне розпорошення обумовлюється бомбардуванням іонами і нейтральними частинками. При цьому, чим нижчий тиск робочого газу і тонше катодний шар, тем менший вплив у цих ефектів.

Щодо руху розпорошених частинок і відбитих нейтралізованих іонів через газ у напрямі підкладки, то вони, під час руху в газі, здійснюють зіткнення з молекулами газу і розсіюються з втратами енергії спрямованого руху. За достатньо великих значень pd_{m-p} , де p – це тиск робочого газу в просторі мішень-підкладка, d_{m-p} – це відстань між мішенню та підкладкою, ці частинки повністю втрачають спрямований рух і термалізуються, тобто сповільнюються до теплових швидкостей, відповідних температурі газу. Після цього розпорошені частинки будуть продовжувати рух у режимі дифузії по закону “броунівського”

(хаотичного) руху. Величина $pd_{\text{м-п-диф}}$ за якої встановлюється дифузійний режим з термалізацією високоенергетичних частинок, залежить від співвідношення мас розпорошених і відбитих високоенергетичних частинок і молекул газу. Чим більше маса частинок, що зіштовхуються, тим швидше встановлюється такий режим. Орієнтовне значення $pd_{\text{м-п-диф}}$ для різних газів і матеріалів мішені складає 200-600 Па*см. [1]

При значеннях $pd_{\text{м-п}} < pd_{\text{м-п-диф}}$ відбувається зворотне розсіювання розпорошених і відбитих частинок на газових молекулах з частковою втратою енергії. Зворотне розсіювання з поверненням частини розпорошених атомів на мішень призводить до зменшення коефіцієнта розпорошення і в цілому знижує швидкість нанесення тонких плівок на підкладку.

Іноді зіштовхувальний режим переносу розпорошених атомів застосовують для нанесення відносно рівномірно товстих шарів на підкладки зі складним рельєфом, нанесення покриттів на них з заднього боку, а також для отримання нанокластерів з атомів мішені та аерозолів у газовій фазі. Термалізацію високоенергетичних частинок застосовують у випадках, коли необхідно нанести покриття на структури, що є чутливими до таких частинок, як, наприклад, напівпровідники.

Для визначення характеристик переносу розпорошених атомів і відбитих високоенергетичних частинок до підкладки можна використовувати розрахунки, що надано у [1 с.48] і [26]. У [27] надана гібридна модель розпорошувальної системи, що враховує зіштовхувальний характер руху іонів у прикатодному шарі та розпорошених атомів в проміжку “мішень-підкладка”, непогано погоджується з експериментом. Відповідно до неї в планарній системі швидкість осадження плівки D визначається за формулою:

$$D = V_s \frac{\lambda_a}{d_{\text{м-п}}} = V_s \frac{M_a + M_g}{\pi(R_a + R_g)^2 n_g M_g d_{\text{м-п}}},$$

де V_s – швидкість розпорошення матеріалу, λ_a – середня довжина вільного пробігу розпорошеного атому в робочому газі, M_a і R_a – маса та радіус розпорошеного атома, M_g і R_g – маса та радіус молекули газу, n_g – концентрація молекул робочого газу.

В магнетронному розряді (аномальному тліючому у зхрещених електричному і магнітному полях), на відміну від звичайного аномального тліючого розряду тиск робочого газу і товщина катодного шару менше, при цьому швидкість розпорошення більше (через те, що електрони, захоплені на стабільні траєкторії магнітним полем, живуть набагато довше, тож одночасно відбувається більше актів іонізації), тож ефекти зіткнень з молекулами газу мають менший ефект на швидкість нанесення покриттів.

В магнетронних розпорошувальних системах велика ефективність генерації вільних іонів, що бомбардують мішень а область генерації іонів максимально наближена до мішені, що дозволяє отримувати великі значення іонного струму (до десятків ампер на квадратний сантиметр), чого неможливо досягти в інших системах (наприклад, в діодних системах без магнітного поля щільність струму не перевищує 1-10 мА/см²); та великі швидкості нанесення шарів матеріалу на підкладку (1 мкм на хвилину і вище). [23] Також, отриманню високої швидкості осадження покриття сприяє також той факт, що магнетронний розряд може існувати за низького тиску (~ 0.1 Па), за якого зворотне розсіювання розпорошеного матеріалу при переносі до підкладки через простір, заповнений робочим газом, зводиться до мінімуму.

2.1.2. Фізичні принципи дії магнетронних розпорошувальних систем

Електроди в МРС обмежують простір, в якому відбуваються розрядні процеси, а також, при подачі на них живлення, створюють у міжелектродному проміжку електричне поле, що прискорює заряджені частинки (електрони до аноду та іони до катоду) та генерують конвекційний струм. При цьому електроди виступають у якості колекторів частинок, забезпечуючи замикання зовнішнього електричного ланцюга. Більш того, катод у магнетронному розряді є джерелом вільних електронів, які після прискорення електричним полем іонізують робочий газ, чим забезпечують самопідтримання розряду. Вплив електродів на траєкторії руху частинок залежить від багатьох факторів: конфігурації електродної системи, величини напруги, конфігурації і величини магнітного поля, тиску газу, значення параметра замагніченості електронів. Замагніченість електронів характеризує силу магнітного поля. Для сильного поля $\omega_{ce} \tau_e \gg 1$; а у слабого поля, або для високої концентрації робочого газу $\omega_{ce} \tau_e \ll 1$, тож у цьому випадку вплив магнітного поля на рух окремого електрона майже повністю зникає. Для іонів, які є важкими частинками, циклотронна частота ω_{ce} менше, а частота зіткнень $1/\tau_e$ більше, ніж для електронів, отже іони практично не замагнічені у магнетронних розрядах.

При значенні індукції магнітного поля $B = B_{кр}$ рівному деякому критичному, відбувається відсічка струму електронів на анод. Це відбувається через те, що при значенні $B = B_{кр}$, траєкторія руху електронів під дією сили Лоренця викривляється настільки, що вони тільки торкаються поверхні аноду в одній точці (вершині циклоїди), а після цього йдуть до катоду. При $B > B_{кр}$ електрон, що виходить з катода,

вже не може потрапити на анод і через це його траєкторія значно подовжується, тож відбувається значно більше актів іонізації робочого газу.

Для планарного магнетрона вираз для $B_{кр}$ має вигляд:

$$B_{кр} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2m}{e}} U$$

де d - міжелектродна відстань, m та e – маса та заряд електрона, U – напруга на електродах. Водночас, для кожного значення B існує критична напруга $U_{кр}$, нижче якої анодний струм дорівнює нулю. $B_{кр}$ та $U_{кр}$ разом визначають параболу критичного режиму, або, як її ще називають, параболу відсічки Хелла, вже згадувану раніше:

$$\left(\frac{U}{B^2}\right)_{кр} = \frac{ed^2}{2m}$$

Парабола критичного режиму ділить значення напруги на дві частини (рис. 3). В області $U > U_{кр}$ всі електрони потрапляють на анод і струм проходить через міжелектродний проміжок, а область $U < U_{кр}$, у якій струм відсутній, або дуже малий, називають областю відсічки магнетрона (рис. 4б). Саме в області відсічки працюють магнетронні розпорошувальні системи.



Рис. 3 Парабола критичного режиму та область відсічки магнетрона

Для визначення $B_{кр}$ для циліндричних магнетронів були вирішені рівняння руху електронів у циліндричних координатах. Для нормального магнетрона було отримано вираз:

$$B_{кр} = \frac{\sqrt{\frac{8m}{e}} U}{R_a \left(1 - \frac{r_k^2}{R_a^2}\right)},$$

де R_a – радіус анода, r_k – радіус катода.

За дуже малого радіусу катода:

$$B_{кр} \approx \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{8m}{e}} U$$

У випадку, коли радіус аноду R_a близький до радіусу катода r_k , можна використовувати формулу для планарного магнетрона.

Для оберненого циліндричного магнетрона з внутрішнім анодом малого радіуса r_a і зовнішнім катодом радіуса R_k , Хеллом було отримано такий вираз для $B_{кр}$ у наближенні нульової початкової швидкості катодного електрона:

$$B_{кр} \approx \frac{r_a}{R_k} \sqrt{\frac{8m}{e}} U.$$

Незважаючи на те, що формули для $B_{кр}$ було отримано без врахування просторового заряду, вони є досить точними для МРС з однорідним магнітним полем, не залежать від форми електронних траєкторій та співпадають з експериментом. [24]

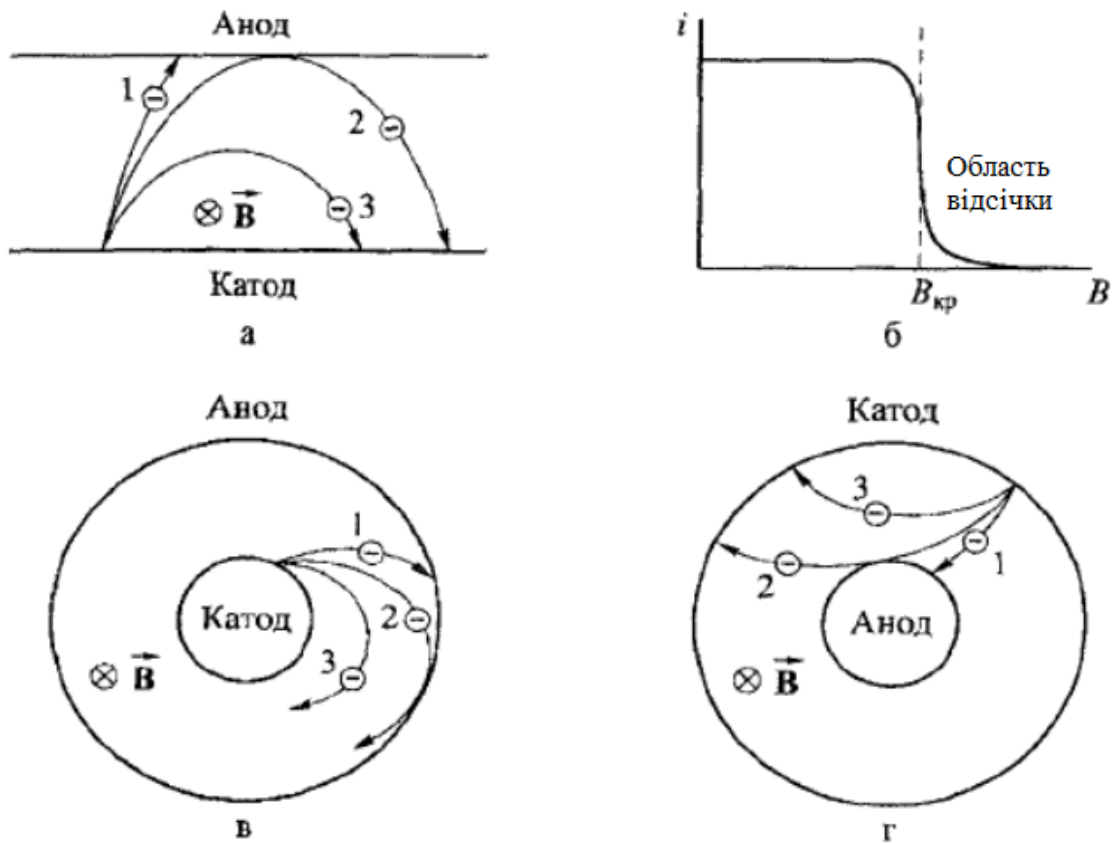


Рис. 4 Траєкторії електронів у вакуумних магнетронах (а – планарний магнетрон, в – циліндричний коаксіальний магнетрон, г – обернений циліндричний коаксіальний магнетрон) та залежність анодного струму від індукції магнітного поля (б). Траєкторії 1: $B < B_{кр}$; траєкторії 2: $B = B_{кр}$; траєкторії 3: $B > B_{кр}$. [24]

Скінченна швидкість спаду струму при $B \approx B_{кр}$ та ненульовий струм при $B > B_{кр}$ на реальних кривих $i(B)$ навіть у високому вакуумі пояснюються дифузією електронів на анод поперек магнітного поля в результаті зіткнень електронів з молекулами залишкового газу, широким спектром початкових швидкостей, тобто немоноенергетичністю електронів, неоднорідностями електродної структури (яка викликана крайовими ефектами, несиметричністю геометрії та розташування

електродів, неоднорідністю їх поверхні), що призводять до порушення ортогональності електричного та магнітного полів.

У випадку магнетрона з газовим наповненням ефект відсічки катодних електронів та спаду анодного струму нівелюється, оскільки катодні електрони у великій кількості мають можливість потрапляти на анод через зіткнення з молекулами газу. Окрім цього, в міжелектродному проміжку з'являються додаткові електрони, як продукт іонізації газу. При виникненні магнетронного розряду в таких умовах анодний струм не спадає, а навпаки зростає у режимі відсічки. Таким чином, на анод потрапляють тільки електрони, а на катод – як іони, так і електрони у режимі відсічки.

Катод підвержений бомбардуванню пришвидшеними іонами, які нейтралізуються на його поверхні, що еквівалентно поглинанню їх заряду, та емітує вторинні електрони. Як результат, у зовнішньому ланцюгу протікає струм, що дорівнює сумі струмів іонів та вторинних електронів. Крім того, катод слугує джерелом нейтральних частинок – розпорошених атомів і молекул свого матеріалу, зворотно розсіяних газових іонів, що пройшли нейтралізацію, та десорбованих газових молекул з тепловою енергією.

У режимі відсічки катод не тільки емітує вільні вторинні електрони, але й може їх захоплювати, оскільки поперечне магнітне поле повертає електрони на катод. Явище повернення і захоплення електронів в магнетронному розряді схоже на ефекти зворотного розсіювання та зворотної дифузії електронів на катод, викликаних зіткненнями вторинних електронів з газовими молекулами в газонаповненому діоді з емітуючим катодом без магнітного поля. Однак ефекти зворотного розсіювання і зворотної дифузії електронів не є істотними для магнетронного розряду через низьку щільність газу та високу напруженість електричного поля у

прикатодній області, тоді як захоплення електронів катодом слід брати до уваги.

Явище захоплення електронів катодом призводить до перерозподілу щільності електронного струму на катоді та перерозподілу щільності плазми в магнетронному розряді, а останнє призводить до деякого розширення зони ерозії мішені. Захопленню електронів катодом сприяє наявність у вторинних електронів початкової енергії (порядку 2-4 eV), завдяки якій вони здатні долати дії гальмуючого електричного поля на зворотних частинах траєкторій та потрапити на поверхню катода. [24] Через малу величину енергії електронів що повертаються, вторинна електрон-електронна емісія катода незначна.

Анод у магнетронному розряді, як і у будь-якому газовому розряді, поглинає електрони у кількості, достатній для врівноваження струму у зовнішньому ланцюгу. Врівноваження струму (регулювання електронного струму на анод) відбувається в розряді автоматично за рахунок зміни падіння напруги у прианодній області, так званому прианодному шарі.

Вплив анода на рух електронів залежить від багатьох факторів: розташування у просторі та конфігурації поверхні анода, конфігурації електричного поля, створюваного анодом, орієнтації магнітного поля та його величини поблизу анода. Екранування анода плазмою у плазмовому магнетронному розряді зменшує вплив анода на траєкторії електронів за межами прианодного шару.

Якщо електричне поле поблизу анода не є великим, наприклад, у випадку, коли плазма щільно прилягає до аноду, анод може перехоплювати електрони, віддалені від нього на відстань, дорівнюючу циклотронному радіусу електрону.

У просторі над полюсами магнітів планарного (на прикладі планарного магнетрона найбільш зручно проілюструвати утворення магнітної пастки) магнетрона є область у якій силові лінії магнітного поля

більш-менш ортогональні силовим лініям електричного поля. В цій області утворюється ефект так званої магнітної пастки для катодних електронів, які рухаються по траєкторіях, подібних до циклоїди. У межах магнітної пастки електрони мають найбільшу вірогідність іонізації газу, а сама зона іонізації має форму тороїда, витягнутого вздовж лінії електромагнітного дрейфу електронів.

В тих місцях, де силові лінії магнітного поля перетинають поверхню мішені (на осі і периферії магнітної системи), вони паралельні до силових ліній електричного поля, тож електрони мають можливість швидко залишити область локалізації магнітного поля, йдучи на анод. Відповідно, захоплення периферійних катодних електронів у пастку малоімовірне, як і малоімовірна іонізація ними газу за низького тиску.

Очевидно, що для отримання ефекту магнітної пастки для катодних електронів необхідна така величина індукції магнітного поля, за якої траєкторії катодних електронів не виходили б за межі зони схрещених полів. Аналіз розподілень електричного і магнітного полів в різних конструкціях планарних магнетронів показує, що висота зони схрещених полів над поверхнею мішені є досить невеликою – до 0.5 - 1 см, а відповідна потрібна величина індукції магнітного поля на поверхні мішені складає близько 0.05 - 0.1 Т. [24]

Траєкторії руху електронів для найбільш загального випадку для планарної МРС з неоднорідним магнітним полем за наявності плазми у міжелектродному проміжку проілюстровано на рис. 5(а, б), де (а) відповідає збалансованій системі (всі лінії магнітного поля виходять і входять до мішені, тобто є замкненими), а (б) – незбалансованій (магнітні силові лінії розімкнені). На ділянках, де силові лінії є замкненими, електрони рухаються за траєкторіями, подібними до циклоїди, водночас закручуючись навколо силової лінії магнітного поля. В місцях, де силові лінії магнітного поля паралельні до мішені, і є зона іонізації робочого газу.

Водночас з циклоїдальним рухом та обертанням навколо магнітних ліній, електрони зазнають азимутального дрейфу.

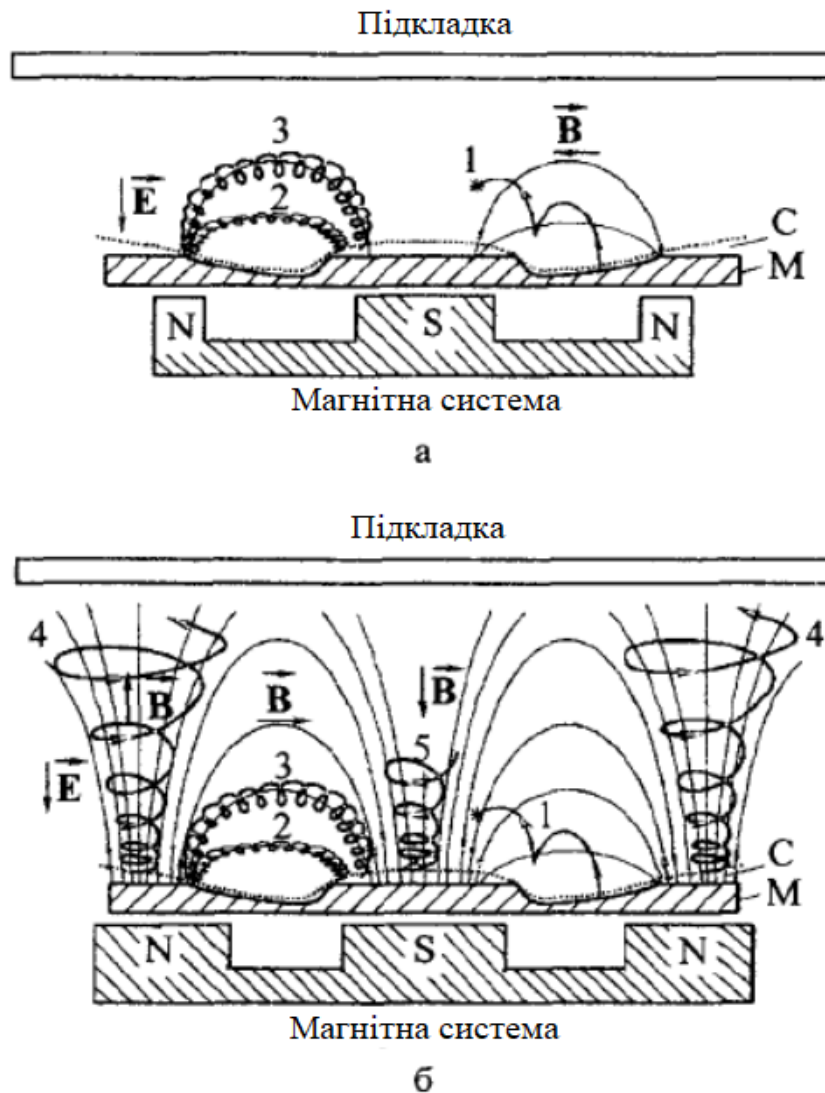


Рис. 5 Траєкторії електронів у планарному магнетроні з неоднорідним магнітним полем. 1 – траєкторія катодного електрона у розрядній зоні (електрон емітується катодом в області схрещених полів, де магнітне поле паралельне поверхні катода), 2,3 – траєкторії катодних електронів у розрядній зоні (електрони емітовані катодом у місцях, де лінії магнітного поля перетинають його поверхню), 4,5 – траєкторії електронів, що прискорюються електричним полем вздовж силових ліній магнітного поля; М – мішень (катод), С – катодний шар додатного просторового заряду. “*” позначає місце можливого іонізуючого зіткнення. [24]

Електрони, що рухаються вздовж ліній 2 і 3 періодично проходять зіткнення з молекулами робочого газу, через що переходять на вищу траєкторію (ближче до аноду), з подальшою можливістю потрапляння на анод. Важливо зазначити, що рух по лініям 2 і 3 має осциляційний характер: під час руху вздовж силової лінії електрон потрапляє до області сильнішого поля і внаслідок закону збереження магнітного моменту, відбивається від цієї області. Якщо електрон не відбивається під дією поздовжнього градієнта поля, то він дістанеться катодної межі плазми і буде відбитий електричним полем катодного слоя. Поздовжня швидкість електрона змінить знак і він продовжить рух у зворотному напрямку. Водночас, сама дуга, за якою виконує осциляції електрон, буде повертатися за азимутом через поперечний градієнт магнітного поля та центрообіговий ефект через кривизну його силових ліній.

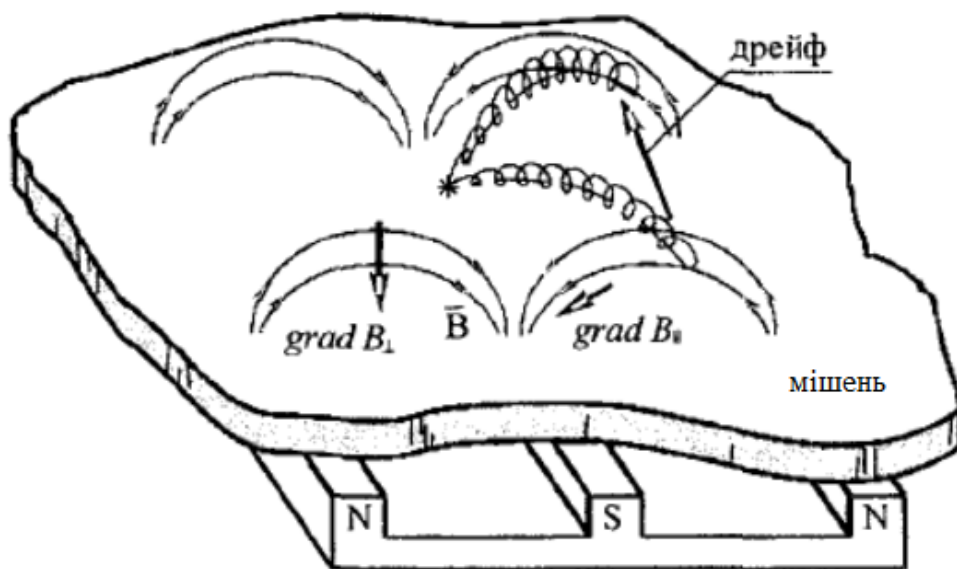


Рис. 6 Траєкторія електрона (у магнітній пастці), що осцилює вздовж магнітної силової лінії у планарному магнетроні; “*” позначає місце, де електрон було відбито від області сильного магнітного поля [24]

Траєкторії типу 4 та 5 (рис. 5(б)) спостерігаються у магнетронах, де присутнє розбалансування магнітної системи, тож наявна велика

вертикальна складова магнітного поля. У таких траєкторій поздовжня вісь спіралей спрямована вздовж силових ліній магнітного поля від катода до анода, або до підкладки. Крок спіралей збільшується через збільшення поздовжньої швидкості електронів у слабкому поздовжньому електричному полі плазми та через ефект, що обумовлено поздовжнім градієнтом магнітного поля. Діаметр спіралей поступово збільшується через віддалення від катода, бо це призводить до послаблення магнітного поля. Електрони, що рухаються за траєкторіями типу 4 на периферії МРС також перебігають азимутального дрейфу, тим часом як електрони, що рухаються за траєкторіями 5 не перебігають азимутального дрейфу через те, що система має осьову симетрію.

Ефект магнітної пастки призводить до підвищення концентрації електронів та локалізації іонізації та збудження газу у вищевказаній тороїдальній області, що, в свою чергу, призводить до підвищення щільності іонного струму на катоді безпосередньо під областю іонізації та підвищенню щільності струму вторинної іон-електронної емісії з тої ж зони. Останнє викликає ще більшу локалізацію зони іонізації газу, через те, що вторинні електрони також потрапляють у магнітну пастку. Обмеження зони іонізації та збудження газу призводить до локалізації зони магнетронного розряду, який в умовах азимутального дрейфу для електронів, набуває форми замкненого тороїда.

Таким чином, утворення магнітної пастки є самою суттю магнетронного розряду та виступає основою застосування магнетронних розпорошувальних систем у технології нанесення покриттів.

2.2 Види магнетронних розпорошувальних систем

Попередня частина була присвячена фізичним принципам, що відповідальним за роботу магнетронних розпорошувальних систем. Ця частина більш технічна і присвячена саме можливим технічним реалізаціям МРС.

Магнетронні розпорошувальні системи можна розділити на кілька типів, залежно від виду мішені (циліндричні, планарні, конічні), магнітної конфігурації (збалансовані та незбалансовані) та джерела живлення (постійне або імпульсне; також існують джерела живлення змінного струму та джерела ВЧ живлення).

Першими МРС, що широко використовувалися для комерційних потреб були **циліндричні коаксіальні МРС**:

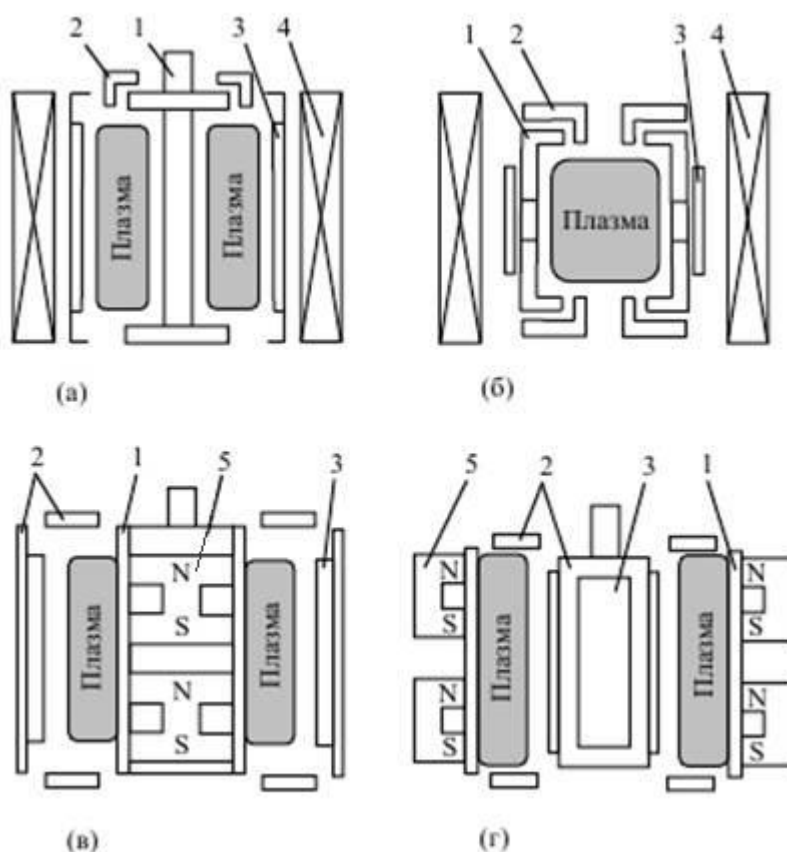


Рис. 7 Циліндричні коаксіальні МРС: 1 – катод-мішень; 2 – анод; 3 – підкладка; 4 – соленоїд; 5 – постійні магніти

Як можна побачити, системи (а), (б) на (рис. 7) сконструйовані таким чином, що силові лінії магнітного поля соленоїдів проходять через увесь простір між електродами і підкладкою, причому його силові лінії паралельні поверхні підкладки, а також майже всій поверхні катода. Величина магнітного поля ($< 0,1$ Т) є достатньою для замагнічування електронів, тобто для сильного впливу на їх траєкторії, але мала для замагнічування іонів.

Основною проблемою даного типу МРС є втеча електронів з розряду вздовж силових ліній магнітного поля на торці електродної системи. Це призводить до нерівномірності у розпорошенні мішені. Для запобігання цьому ефекту використовують різні методи, наприклад, забезпечують катод торцевими відбивачами у вигляді дисків або плоских кілець, які сприяють осциляції електронів у плазмі розряду вздовж силових ліній магнітного поля та додатковому збільшенню траєкторій їх руху в міжелектродному проміжку.

Для підвищення рівномірності розпорошення катода-мішені застосовували довгі соленоїди з однорідним магнітним полем, крім того, використовували спеціальні сталеві магнітопроводи, що охоплюють технологічну камеру. Все це суттєво збільшує масу і розміри установок, але все одно не дозволяє отримати абсолютну однорідність розпорошення через втечу іонів на торці системи і зниження їх концентрації на краях системи.

Для усунення недоліків, властивих МРС із зовнішніми соленоїдами, розглянутими вище, замість соленоїдів застосовувалися постійні магніти (рис. 7 (в), (г)), що значно спростило конструкцію МРС. Постійні магніти утворюють локалізоване біля катода поле з дугоподібною формою силових ліній. Плазма при цьому локалізується біля катода області “магнітних тунелів”, де напруженість поля максимальна, паралельно до поверхні катода. Тунельна форма магнітного поля перешкоджає втечі розрядних

електронів на торці МРС. Такі системи забезпечують досить високу однорідність плівок по товщині, хоча для них і притаманна деяка локальна нерівномірність розпорошення катода.

МРС із внутрішнім циліндричним катодом-мішенню (за термінологією Дж. Торнтон - Cylindrical-post magnetron), показана на рис. 7 (в), зручна для установок з барабанним тримачем плоских підкладок навколо мішені, а також для нанесення покриттів на внутрішню поверхню виробів трубчастої форми. МРС із зовнішнім циліндричним катодом-мішенню (рис. 7 (г)) також може застосовуватися для нанесення покриттів на плоскі підкладки, але вона більше підійде для установок безперервної дії для нанесення покриттів на довгомірні вироби типу дротів та стержнів.

Основна лінія розвитку МРС від початку і аж до теперішнього часу пов'язана з переходом у 70-х роках до **систем із планарним та конічним катодом-мішенню** (рис. 8). Перші спроби отримати МРС з планарним катодом полягали в тому, що в плоскопаралельній системі електродів, звичайної розпорошувальної системи в аномальному тліючому розряді (у початковій системі не було магнітного поля), створювали поперечне магнітне поле з прямими силовими лініями. Однак через азимутальну неоднорідність магнітного поля і незамкнутість поперечного дрейфу заряджених частинок, вони йшли на край електродів, що ускладнювало підтримання розряду при низьких тисках і робило його нерівномірним. [25]

Більш результативним було накладення на плоскопаралельний проміжок аксіально симетричного квадрупольного магнітного поля, яке мало радіальну компоненту та створювало умови для замкнутого азимутального дрейфу електронів уздовж поверхні електродів. Задля підвищення ефективності генерації радіального магнітного поля, було запропоновано помістити соленоїди безпосередньо за планарними

електродами. Однак, результуюча конструкція виявилася занадто громіздкою для подальшого використання.

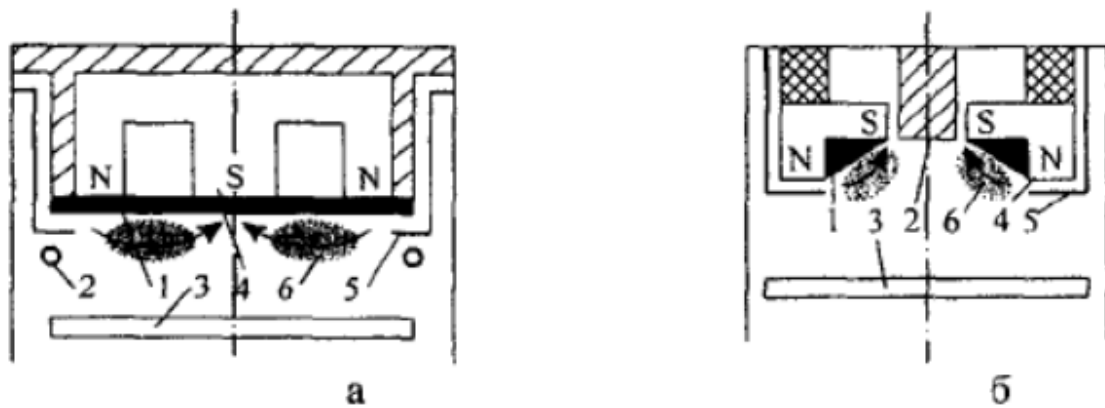


Рис. 8 MPC з планарною (а) та конічною (б) мішенню. 1 – катод-мішень; 2 – анод; 3 – підкладка; 4 – магніт; 5 – екран; 6 – плазма [25]

Найбільш результативним рішенням з точки зору геометрії MPC було використання такої планарної системи, де плазма генерується тільки біля катода. Для запобігання втечі електронів із розряду у прианодній області, магнітна система була забезпечена магнітопроводом (як на рис. 8 (а)), завдяки якому силові лінії магнітного поля утворювали над поверхнею катода замкнене дугу, де виникав і підтримувався магнетронний розряд із замкнутим азимутальним дрейфом електронів.

Найбільша вада таких MPC в тому, що зона ерозії катода виглядає як вузька канавка, тобто використовується достатньо низький відсоток матеріалу катода (до 50-60%).

Далі мова піде про **збалансовані і незбалансовані MPC**.

MPC з такою системою створення магнітного поля (рис. 9 (а)), в яких силові лінії двічі перетинають катод-мішень, виходячи з одного полюса і входячи в інший, проходячи тільки поблизу поверхні катода і не розсіюючись убік, були названі **збалансованими**. У таких MPC плазмова область розряду притиснута до поверхні катода (висота зазвичай не

перевищує 30-60 мм). При розміщенні підкладки поза цією зоною, що зазвичай роблять щоб не ускладнювати підтримку розряду, до неї доходить мало заряджених частинок, в основному розпорошені атоми мішені, які осаджуються на підкладку і утворюють шар покриття.

Підвищити щільність іонного струму на підкладку в МРС зі збалансованою магнітною системою певною мірою можна лише за максимального наближення підкладки до плазмової області. Це можливо при нанесенні покриттів з підвищеною твердістю і зносостійкістю на плоскі підкладки, а також дрібні вироби типу лез, свердл, хірургічного інструменту, тощо.

Кардинально підвищити щільність іонного струму на підкладку до величини більш ніж $1-2 \text{ мА/см}^2$ можна в МРС з об'ємним магнітним полем, як було запропоновано на роботах [28-30].

Було створено магнетрони з **незбалансованим** магнітним полем, частина силових ліній якого спрямована у бік підкладки, вони носять назву "незбалансовані магнетронні розпорошувальні системи".

У МРС цього типу магнітне поле створюється не тільки в зоні іонізації біля поверхні мішені, а й у просторі між мішенню і підкладкою, що дозволяє підвищити щільність іонного струму і керувати властивостями осаджених покриттів за допомогою іонної бомбардування. Конфігурацію поля такого типу показано на рис. 8 (б), де зовнішній полюс системи створює більший магнітний потік, ніж внутрішній; також магнітний потік від зовнішнього полюса лише частково замикається через внутрішній полюс.

У цій системі генеруються бічні вертикальні силові лінії, що йдуть до підкладки, що дозволяє збільшити потік заряджених частинок та плазми загалом на неї. Аналогічне поле можна створити і в збалансованій МРС, якщо навколо неї розташувати додатковий соленоїд, напрямок магнітного

поток якого збігається з напрямком потоку від зовнішнього полюса магніту, проте це зробить конструкцію значно більш громіздкою.

У незбалансованих МРС плазма газового розряду вільно рухається вздовж силових ліній магнітного поля до підкладки, що призводить до підвищеної концентрації заряджених частинок біля неї. Цьому також сприяє іонізація газу у просторі між мішенню та підкладкою.

В результаті цих процесів щільність іонного струму на підкладку може досягати $2-10 \text{ мА/см}^2$ навіть без зовнішньої напруги зсуву.

Однак у розглянутих незбалансованих МРС є суттєва вада, пов'язана з тим, що розподіл концентрації заряджених частинок біля поверхні підкладки визначається розподілом магнітного поля і може бути неоднорідним. Ця обставина позначається на рівномірності покриття, що наноситься.

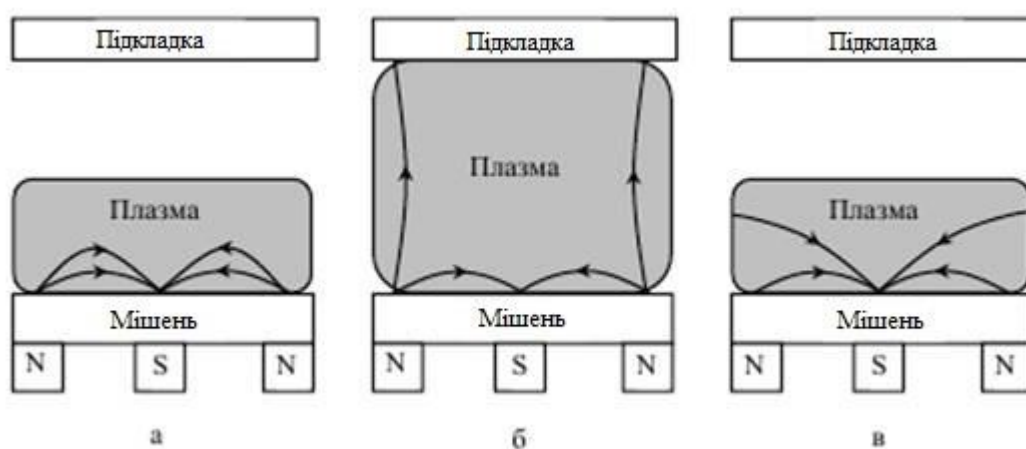


Рис. 9 МРС з планарною мішенню та різними конфігураціями магнітного поля: а – збалансована магнітна система; б – незбалансована, з вертикальною складовою, спрямованою до підкладки; в – незбалансована з розсіюванням магнітного поля в бік від підкладки

Для підвищення однорідності об'ємної плазми в роботі [29] було запропоновано застосувати **багатополюсну магнітну систему**, сильне магнітне поле в якій створюється тільки біля стінок камери, всередині камери і біля підкладки поле слабе. Така МРС проілюстрована на рис. 10.

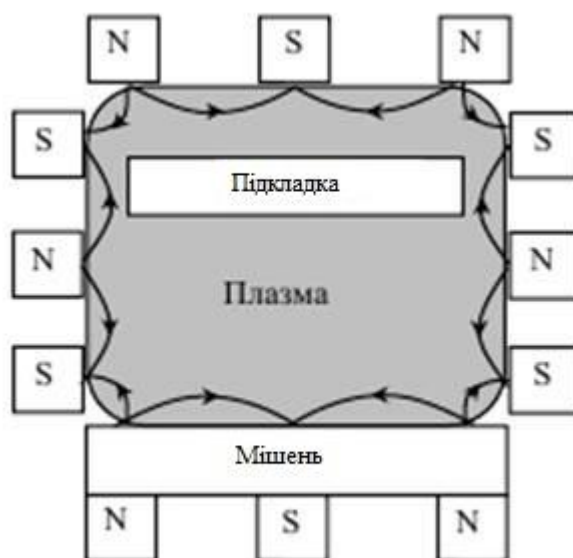


Рис. 10 МРС з магнітною ізоляцією стінок вакуумної камери

Генератором плазми у такій системі слугує магнетрон, а вакуумна камера оточена додатковими магнітами. Поле, що створюється додатковою магнітною системою, перешкоджає дифузії плазми до стінок і діє як магнітна пастка для частинок плазми, але не заважає вирівнюванню концентрації заряджених частинок всередині проміжку.

Розглянуті вище типи незбалансованих МРС та властивості покриттів, що наносяться за їх допомогою, дозволяють реалізувати процеси осадження плівок на широкі поверхні та виробу складної форми. Зокрема, було реалізовано високоякісні покриття з нітриду титану, оксидів алюмінію, тощо.

Для отримання структур з великою кількістю пор та розвиненою поверхнею для хімічно активних плівок, каталізу, покриттів, що не відбивають випромінювання, і т. д. використовується інший варіант

незбалансованої магнітної системи, у якої внутрішній полюс генерує більший магнітний потік, ніж зовнішній (рис.9 в).

При такому способі створення магнітного поля деякі силові лінії не замикаються через катод на зовнішній полюс, а йдуть у бік підкладки, до стінок. Це ускладнює дифузію плазми до підкладки і знижує концентрацію іонів біля неї. Щільність струму на підкладку в такому разі значно менше, ніж 1 мА/см^2 .

Іонна дія на зростаючу плівку в даній МРС мінімальна. Крім того, ускладнюється запалювання та підтримання розряду при низьких тисках через втечу електронів до стінок камери.

Для управління потоком заряджених частинок до підкладки застосовують так зване магнітне зміщення. Позаду підкладки розташовують додатковий соленоїд або постійний магніт, силові лінії якого збігаються з полем магнетрона і потік плазми ніби фокусується біля підкладки. При цьому зростає плаваючий потенціал та іонний струм на підкладку. При протилежному напрямку поля відбувається розфокусування плазми, знижується плаваючий потенціал та іонний потік.

Таким чином, магнітне усунення дозволяє керувати процесом напilenня, не змінюючи режиму роботи магнетрона.

У роботі [31] магнітне зміщення використовувалося в МРС із двома незбалансованими магнетронами, які мали протилежну полярність магнітних систем. Вони розташовувалися над підкладкою, під якою був додатковий соленоїд. Змінюючи напрямок струму соленоїда, можна було регулювати інтенсивність іонного бомбардування для кожного магнетрона та отримувати багат шарову структуру покриття. Щільність іонного струму на підкладку досягала 6 мА/см^2 , а відношення потоку іонів до потоку атомів, що осаджуються ~ 20 .

Розглядаючи системи з незбалансованим магнітним полем також варто згадати про **незбалансовані МРС з двома магнетронами**

Описані вище МРС мають одну мішень, що призводить до неоднорідності нанесення покриття. Для підвищення однорідності застосовують МРС із двома та більше мішенями або магнетронами. Найбільшого поширення набули системи з двома магнетронами, як найпростіші.

Магнетрони можуть працювати як незалежні модулі, так і взаємопов'язано. У роботі [32] два магнетрони, розташовані поруч або навпроти один одного, мають зв'язок по живленню. На них подавалася знакозмінна напруга, при якій кожен із магнетронів виконує по черзі роль катода і анода, але магнітні поля цих магнетронів незалежні.

Можливі дві конфігурації таких МРС: 1) **Дзеркальна**, коли полярність магнітів у магнетронах однакова та силові лінії бічного поля спрямовані до стінок (рис. 11 (а)). Це призводить до відходу на них заряджених частинок та зниження щільності плазми в центрі системи;

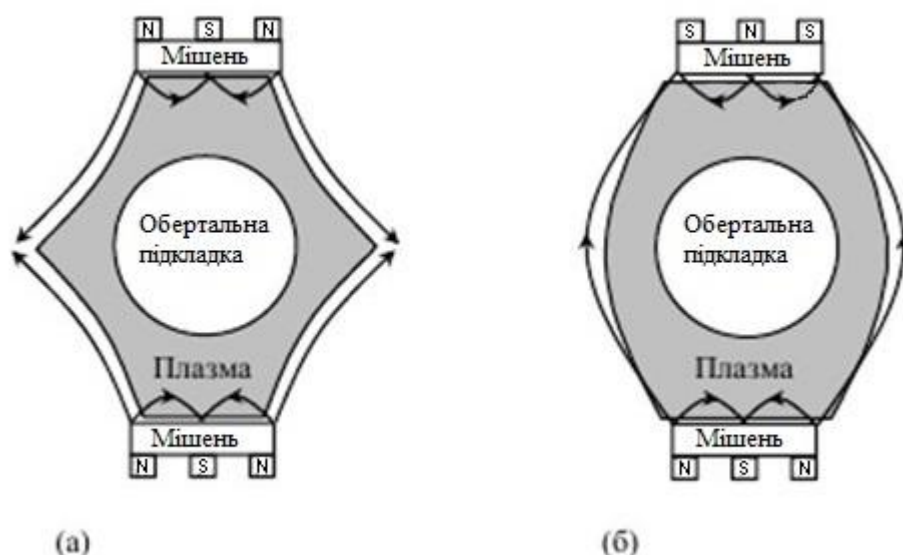


Рис. 11 МРС з двома магнетронами та об'ємним магнітним полем: а – дзеркальна конфігурація; б – замкнена конфігурація

2) **Замкнена** конфігурація, коли полярність магнітів протилежна (рис. 11 (б)). В такому випадку заряджені частинки плазми утримуються у системі. Це призводить до багаторазового підвищення концентрації іонів навколо підкладки в порівнянні з дзеркальною системою та МРС з одиночним магнетроном.

При порівнянні параметрів осадження покриттів в трьох системах (2 магнетрони із замкнутою конфігурацією магнітного поля, 2 магнетрони із дзеркальною конфігурацією магнітних силових ліній, одиночний магнетрон із незбалансованим полем) видно, що вони дають приблизно однакову швидкість осадження плівки (~ 250 нм/хв), проте система із замкнутою конфігурацією магнітного поля забезпечує найбільшій щільність іонного струму та відношення потоку іонів до потоку нейтральних атомів на підкладку. Особливо помітна різниця між цими типами МРС зі збільшенням відстані між мішенню однієї з магнетронів і підкладкою.

Таким чином, змінюючи конфігурацію магнітного поля в камері та відстань, можна регулювати рівень іонного впливу на підкладку.

Часто для отримання плівок високої чистоти, без домішок газу, рівномірного запорошення глибоких канавок та отворів із субмікронними розмірами, необхідно забезпечити роботу МРС при зниженому тиску робочого газу. Також знижений тиск необхідний у тих випадках, коли треба використовувати ефекти іонного бомбардування при осадженні плівок та покриттів, при цьому треба збільшити концентрацію іонів у плазмі біля підкладки, відповідно підвищити коефіцієнт іонізації газу та розпиленої речовини.

У цих випадках застосовуються додаткові пристрої для іонізації газу. Найпростіший спосіб додаткової іонізації полягає у введенні допоміжного розжареного катода, що емітує електрони в проміжок між мішенню та підкладкою. Але оскільки розжарені катоди не можна експлуатувати в

середовищі реакційних газів, а також через сильне нагрівання підкладок тепловим випромінюванням розжарених катодів, більш переважно застосовувати для іонізації газу елементи, що не розжарюються, і, в першу чергу, ВЧ і НВЧ пристрою – це **МРС з пристроями для додаткової іонізації газу (індуктором)**. Індуктор в таких МРС встановлюють між мішенню та підкладкою.

Для отримання тонких плівок та покриттів, що складаються з декількох компонентів, з використанням простих вихідних речовин застосовуються технології розпорошення серед реакційних газів. Останнім часом для цього зазвичай використовуються імпульсні магнетронні розряди.

Імпульсні режими живлення магнетронів дозволяють знизити теплові навантаження на підкладку і мішень за рахунок збільшення скважності імпульсів, і навіть наносити багатоконпонентні покриття шляхом послідовного розпорошення кількох мішеней, що в результаті дозволяє отримувати покриття майже однородного складу і структури. Крім того, в імпульсному режимі можна збільшити густину розрядного струму і підвищити ступінь іонізації розпорошеної речовини до 40% і вище. [25]

При використанні **МРС з імпульсним живленням** застосовуються в основному три схеми використання магнетронів: поодинокій магнетрон; подвійні або спарені магнетрони, розташовані поруч і паралельно на одному боці технологічної камери; декілька магнетронів, розташованих на різних сторонах технологічної камери, навпроти один одного.

Також МРС з імпульсним живленням є дуже важливим аспектом розвитку технології магнетронного розпорошення, оскільки імпульсний режим можна ефективно використовувати задля запобігання переходу магнетронного розряду у дуговий. [25]

3. Висновки

У даній оглядовій роботі, що присвячена технології магнетронного розпорошення було надано аргументацію щодо актуальності цієї технології в наші дні, історичну довідку з історії розвитку МРС, а також фізичні засади дії МРС, а саме: фізичні принципи процесу іонного розпорошення задля описання розпорошення матеріалу мішені-катода в МРС, а також фізичні засади роботи МРС, поведінку заряджених частинок у магнетронному розряді.

Також було обговорено основні різновиди магнетронних розпорошувальних систем згідно з їх геометрією, конфігурацією магнітного поля та типом живлення.

Дослідження в галузі технології нанесення покриттів за допомогою МРС становлять значний науковий і технічний інтерес для практичного використання. Дослідження, що проводилися протягом останніх років [33-39] показують, що за допомогою створення нових магнітних конфігурацій, а також використання імпульсного режиму роботи МРС, можуть значно підвищити їх ефективність: збільшити як швидкість нанесення покриття, так і його якість. Це покращить використання МРС у нанесенні покриттів з твердого оксиду алюмінію, з вольфраму, нанесенні покриттів на скло, а також, що є найперспективнішим, нанесенні покриттів на рулонні матеріали.

Виходячи з усього, написаного вище, дослідження у галузі використання магнетронного розряду у різних його режимах роботи та з різними конфігураціями магнітних полів становлять наукову цінність та є і будуть предметом інтересу багатьох досліджень ще довгий час.

Список літератури:

1. Данилин Б. С. *Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок.* – М.: Энергоатомиздат, 1989, с. 338.
2. Вершина А. К., Агеев В.А. *Ионно-плазменные защитно-декоративные покрытия.* - Гомель: ИММС НАНБ, 2001.
3. Musil J. Nanostructured hard coatings. - N.Y.: Klumer Academic, 2005/
4. Schiller S., Heisig U., Beister G. Et al. *Deposition of hard wear-resistant coating by reactive d.c. plasmatron sputtering* // Thin Solid Films 1984. Vol. 118. No. 3. P. 255-270.
5. Biederman H., Kohoutek, Chmel Z., Stary V. *Hard carbon and composite metal/hard carbon films prepared by a DC unbalanced planar magnetron* // Vacuum. 1990. Vol. 40. P. 251-255
6. Münz. W.-D., Hauser F. J. M., Schulze D., Buil B. *A new concept for physical vapor deposition coating combining the methods of arc evaporation and unbalanced magnetron sputtering* // Surf. Coat. Technol. 1991. Vol. 49. P.161 – 167.
7. Efeoglu I., Arnell R.D., Tinston S. F., Teer D. G. *The mechanical and tribological properties of titanium nitride coatings formed in a four magnetron closed-field sputtering system* // Surf. Coat. Technol. 1993. Vol. 57. P.61 – 69.
8. Arnell R. D., Kelly P. J. *Recent advances in magnetron sputtering* // Surf.

- Coat. Technol. 1999. Vol. 112. P.170 – 176. || Kelly P. J., Arnell R. D. *Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications* // Vacuum. 2000. Vol. 56. P. 159 – 172.
9. Wei R., Vajo J.J., Matossian N. et al. *Aspects of plasma-enhanced magnetron-sputtered deposition of hard coatings on cutting tools* // Surf. Coat. Technol. 2002. Vol. 158-159. P.465 – 472.
10. Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фаррелл, А. Гринвуд, Л. Харрис. *Вакуумные дуги* / Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. М.: «Мир», 1982.
11. C.W. Kimblin. *Erosion and ionization in the cathode spot region of vacuum arcs* // J. Appl. Phys. 1973, v.44, №7, p.3074-3081
12. J.E. Daalder. *Components of cathode erosion in vacuum arcs* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1976, v.9, №11, p.2379-2395.
13. J.E. Daalder. *Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975, v.8, N.14, p.1647-1659.
14. И.Р. Арсланов, В.Г. Подковыров, Н.С. Сочугов // Докл. VI Конф. “Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц”. 2002, с.186.
15. K. Awazu, N. Sakudo, H. Yasui, E. Saji, K. Oka-zaki, Y. Hasegawa, N. Ikenaga, T. Sato, Y. Nambo, K. Saitoh. *Films formed by hybrid pulse plasma coating (HPPC) system* // AIP Conference Proceed-ings. 2001, v.576, issue 1, p.955.

- 16.Sanner, A. Mark, Jin.Y. Park. *Dynamic pulsed plasma reactor for chemical vapor deposition of ad-vanced materials* // Rev. Sci. Instr. 1997, v.68, issue 3, p.1575.
- 17.Strutt R. J. *A peculiar form of low potential discharge in the highest vacua* // Proc. Royal Soc. (London). A, 1913. Vol. 189. No 607. P. 68-74.
- 18.Hull A. W. *The effect of a uniform magnetic field on the motion of electrons between coaxial cylinders* // Phys. Rev. 1921. Vol. 18. No. 1. P. 31 – 57.
- 19.А. И. Кузьмичёв. *Магнетронные распылительные системы*. Киев: «Аверс», 2008, с. 47.
- 20.Penning F. M., Moubis J. H. A. *Cathode sputtering in a magnetic field* // Proc. Royal Netherlands Academy of Science. 1940. Vol. 43. P.41.
- 21.А. И. Кузьмичёв. *Магнетронные распылительные системы*. Киев: «Аверс», 2008, с.с. 137 – 138.
- 22.Schiller S., Goedicke K., Reschke J. et al. *Pulsed magnetron sputter technology* // Surf. Coat. Technol. 1993. Vol. 61. P.331 – 337 || Schiller S., Kirchhoff V., Goedicke K., Schiller N. *Pulsed Plasma – a New Era of PVD Technique*. - In: FEP Annual Report. Dresden: FEP, 1996. P. 23-30.
- 23.А. И. Кузьмичёв. *Магнетронные распылительные системы*. Киев: «Аверс», 2008, с.с. 9-27.
- 24.А. И. Кузьмичёв. *Магнетронные распылительные системы*. Киев: «Аверс», 2008, с.с. 27-130.

- 25.А. И. Кузьмичёв. *Магнетронные распылительные системы*. Киев: «Аверс», 2008, с.с. 130-208.
- 26.Somenh R. The thermalization of energetic atoms during the sputtering process // J. Vac. Sci. Technol. A. 1984. Vol. 2. P. 1284-1294.
- 27.Кононенко Ю.Г., Кузьмичёв А.И. Скорость осаждения плёнок в диодном разрядном устройстве // Вакуумная наука и технология 1992. Т. 2. № 1.С. 13-18.
- 28.Recent advances in magnetron sputtering / Arnell R. D., Kelly P. J. // Surf. and Coat. Technol., V.112, 1999, p. 170-176.
- 29.Unbalanced magnetrons and new sputtering system with enhanced plasma ionization / Musil J., Kadlec S., Мьnz W. D. // J. Vac. Sci. Technol., V. 9, № 3, 1991, p..
- 30.High-rate reactive DC magnetron sputtering of oxide and nitride superlattice coatings / Sproul W. D. // Vacuum, V. 51, № 4, 1991, p.641-646.
- 31.Design, plasma studies, and ion assisted thin film growth in an unbalanced dual target magnetron sputtering system with a solenoid coil / Engstrom C., Berlind T., Birch J. et al. // Vacuum, V. 56, 2000, p.107-113.
- 32.Pulsed magnetron sputter technology / Schiller S., Goedicke K., Reschke J. et al. // Surf. and Coat. Technol., V.61, 1993, p. 331-337.
- 33.А.А. Бизюков, К.Н. Середа, В.В. Слепцов *Сильноточный магнетронный разряд с магнитоизолированным анодом*. // Вопросы

атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6).№4, 2008, с.с. 179-183.

- 34.A.G. Chunadra,K.N. Sereda,I.K. Tarasov,A.A. Bizyukov. *Increasing of mass transfer efficiency at magnetron deposition of metal coating. // Problems of atomic science and technology.Series “Plasma Physics”(21), №1 (95), 2015. P.p. 181-183*
- 35.A.A. Bizyukov, O.I. Girka, K.N. Sereda, V.V. Sleptsov, A.G. Chunadra. *Control of planar magnetron sputtering system Operating modes by additional anode magnetic field // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics» (16). 2010, № 6, p. 144-146.*
- 36.A.A. Bizyukov, K.N. Sereda, V.V. Sleptsov, I.K. Tarasov, A.G. Chunadra *Pulsed magnetron sputtering system power supply without limitation and forced interruption of the discharge current. // Problems of atomic science and technology. Series “Plasma Physics” (19), №1 (83), 2013. P.p. 225-227.*
- 37.A. A. Bizyukov, K. N. Sereda, V.V. Sleptsov. *The increasing of limiting current of magnetron discharge increasing by magnetoinsulation of sectionalized anode // Applied Physics. 2008, N 6, p. 96-101.*
- 38.A.G. Chunadra, K.N. Sereda, I.K. Tarasov, A.A. Bizyukov. *Increasing of mass transfer efficiency at magnetron deposition of metal coating // Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”. 2015, v. 95, №1 (21), p. 181-183.*

39. A.G. Chunadra, K.N. Sereda, I.K. Tarasov. *Probe measurements of parameters of dense gasmetallic plasma in the inhomogeneous magnetic field of a planar magnetron discharge.* // Problems of atomic science and technology. 2018, № 6 (118). Series: Plasma Physics (24), p.p. 252-254.