

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра наноелектроніки та модифікації поверхні

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

зі спеціальності 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему:

**«Розрахунок розподілу складу покриття на внутрішній поверхні
циліндричної підкладки»**

Гончар Артем Євгенович

Студент групи ФЕ-81

_____ А.Є. Гончар

Науковий керівник

_____ доц Ю.О. Космінська

«__» _____ 2022 р.

«__» _____ 2022 р.

Суми 2022

РЕФЕРАТ

Робота складається з вступу, трьох основних розділів, висновків, списку літератури. Проведено огляд принципу роботи та конструктивних особливостей сучасних магнетронних розпилювальних систем. Розглянута математична модель для розрахунку елементного складу покриттів на внутрішній поверхні труби. Проведено розрахунок елементного складу покриття з використанням середовища Python 3, проведено порівняння з експериментальними даними.

Звіт містить 41 сторінку, 13 рисунків та 15 літературних джерел.

Об'єктом дослідження є пристрій із розпилювальною мішенню у вигляді стрижня

Мета роботи – з'ясувати особливості принципів роботи і конструкції сучасних магнетронних розпилювальних систем та провести розрахунок розподілу елементного складу покриттів у розпилювачі стрижневих мішеней.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МРС, РОЗПИЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. СТАНДАРТНІ МАГНЕТРОННІ РОЗПИЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ	6
1.1 Пристрій та принцип дії магнетронних розпилювальних систем	6
1.2 Основні технологічні параметри МРС і їх вплив на властивості плівок, що осаджуються	10
1.3 Переваги та недоліки методу МРС	13
2. САМОУЗГОДЖЕНІ РОЗПИЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ	16
2.1 Самоузгоджені розпилювальні системи на базі порожнистого катоду.	16
2.2 Самоузгоджені розпилювальні системи з використанням зворотних дифузійних потоків МРС	19
3 РОЗПОДІЛ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПОКРИТТЯХ, ОДЕРЖАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СТРИЖНЕВОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	22
3.1 Конструктивні особливості та принцип роботи пристрою із розпилюваною мішенню у вигляді стрижня	22
3.2 Математична модель для розрахунку елементного складу покриттів на внутрішній поверхні труби	23
3.3 Результати обчислень	28
ВИСНОВКИ.....	39
Список літератури.....	40

ВСТУП

Серед широкого класу пристроїв для генерації потоку частинок, що осаджуються, оснований на ерозії електродів у вакуумному розряді, особливе місце займають магнетронні розпилювальні пристрої.

Фізичною основою принципу дії магнетронного розпилювального пристрою є різновид класичного самостійного аномального тліючого розряду в розрідженому газі. Відмітна особливість магнетронних розпилюючих пристроїв полягає в наявності кільцеподібної замкнутої зони схрещених неоднорідних електричних і магнітних полів, що локалізують розрядну плазму в прикатодній ділянці.

У магнетронних пристроях при одночасній дії електричних і магнітних полів змінюється траєкторія руху електрона. Електрони, що емітуються катодом і утворюються в результаті процесів іонізації, під дією замкнутого магнітного поля локалізуються безпосередньо над поверхнею розпилюваного матеріалу. Вірогідність та кількість зіткнень електронів з молекулами аргону досить велика, і їх іонізація в області магнітної пастки різко зростають. Через неоднорідності дії електричних і магнітних полів прикатодній зоні інтенсивність іонізації в різних ділянках різна. Максимальне значення спостерігається в області, де лінії індукції магнітного поля перпендикулярні вектору напруженості електричного поля, мінімальне – де їх направлення збігаються.

У цій роботі проводиться порівняння стандартних пристроїв магнетронного розпилення та деяких нових пристроїв, які були запатентовані Сумським державним університетом. У цих винаходах поставлене завдання вдосконалення розпилювальних пристроїв для нанесення покриттів у вакуумі шляхом модифікації конструкцій катодного корпусу, фокусуючого магнітопроводу та зміни розташування підкладок, на які наноситься покриття, що дало б можливість додатково стабілізувати роботу пристрою, охолоджувати підкладки в процесі нанесення покриття і завдяки цьому

отримувати покриття з легкоплавких металів, знижуючи при цьому вміст небажаних домішок, що розширило б таким чином технологічні можливості існуючого пристрою. Крім того, вдосконалення катодного вузла дає можливість його використання при підвищених тисках робочого газу, тобто в умовах необхідної оберненої дифузії та в умовах створення ефективного об'ємного дифузійного поля біля ростової поверхні.

1. СТАНДАРТНІ МАГНЕТРОННІ РОЗПИЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

1.1 Пристрій та принцип дії магнетронних розпилювальних систем

МРС є вдосконаленим варіантом діодних систем розпилення. Причиною появи таких систем стало прагнення підвищити швидкість розпилення при одночасному зниженні радіаційного впливу електронів на підкладку.

Принцип дії МРС із збудженням на постійному струмі ілюструється рис 1.1 на прикладі плоского катода-мішені. Основними елементами системи є катод-мішень 1, анод 4 і магнітна система 2. Підкладки розташовують над анодом (на схемі не показано) [1-3].

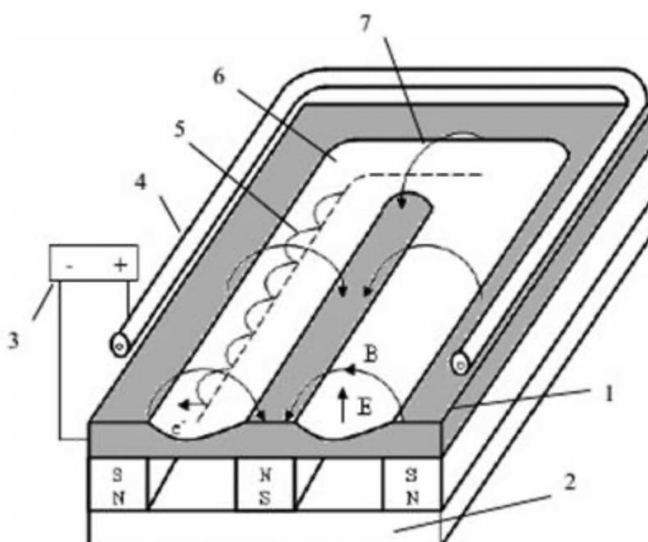


Рисунок 1.1 – Схема МРС із плоскою мішенню: 1 - катод-мішень; 2 – магнітна система; 3 – джерело живлення; 4 – анод; 5 – траєкторія руху електрона; 6 – зона розпилення; 7 – силові лінії магнітного поля [3]

При подачі постійної напруги між мішенню та анодом виникає неоднорідне електричне поле, силові лінії якого схрещуються з силовими лініями магнітного поля, що замикають магнітну систему, і виникає розряд, що тліє. В умовах аномального тліючого розряду електрони, що емітуються з мішені під дією іонного бомбардування, захоплюються магнітним полем і роблять складний рух біля поверхні катода-мішені замкнутими траєкторіями,

близькими до циклоїдальних. В результаті багаторазових зіткнень електронів з атомами робочого газу (зазвичай Ar) різко збільшується ступінь іонізації плазми та зростає щільність іонного струму, що призводить до суттєвого (у 50...100 разів у порівнянні з діодними системами розпилювання без магнітного поля) збільшенню швидкості розпилення матеріалу мішені. Локалізація електронів поблизу мішені запобігає бомбардування ними підкладок, внаслідок чого знижується температура підкладки та зменшуються радіаційні дефекти у створюваних структурах. Хоча повністю це бомбардування не усувається через крайові ефекти в зоні розряду.

Електрони рухаються в магнітній пастці, доки не станеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу та електрони не втратять отриману від електричного поля енергію. Надалі вони дифундують через плазму до аноду. Область існування плазми обмежується межами, де електрони втрачають свою енергію.

Локалізація плазми аномального тліючого розряду у поверхні мішені, що розпилюється, є однією з особливостей МРС. При цьому плазма має близьку до тороїдальної форми, а ступінь її іонізації максимальна в центральній частині над зоною розпилення.

Одним із найважливіших елементів МРС є катодний вузол. Зазвичай він складається з мішені, виготовленої з матеріалу, що розпорошується, і її водоохолоджуваного тримача. При виготовленні мішені та катодного вузла загалом необхідно забезпечити [3]:

- високу чистоту (99,999 %) та високу щільність матеріалу мішені, а при використанні мішеней зі сплавів - точність легування матеріалу мішені домішками та їх рівномірний розподіл по всьому об'єму мішені;

- максимальне використання матеріалу мішені (що особливо важливо при розпиленні дорогих матеріалів);

- ефективне охолодження мішені, щоб її температура в процесі розпилення не перевищувала 100 °С.

Охолодження мішені вкрай необхідне, оскільки в процесі розпилення в результаті інтенсивного іонного бомбардування вона може розігріватися до високої температури (близько 400 °С), що призводить до окислення її поверхні, посилення дифузійних процесів у сплавних мішенях, може викликати деформацію мішені і навіть розплавлення. Це знижує ефективність процесу розпилення, якість плівок, що формуються, і може призвести до аварійної ситуації.

Існує багато варіантів конструкції катодних вузлів. Можливе використання варіантів із прямим або непрямим охолодженням мішеней проточною водою. Незважаючи на максимальну ефективність охолодження при прямому способі, небезпека прориву води при утворенні тріщини в мішені або при надмірному збільшенні зони ерозії та зниження цього коефіцієнта використання матеріалу мішені істотно обмежує застосування цього способу охолодження. Тому конструкції з непрямим охолодженням, що використовують водоохолоджуваний утримувач, знаходять найбільше поширення.

Залежно від конфігурації використовуваної мішені знаходять застосування багато видів МРС (див. рис.1.2): з плоскою простою або фасонною мішенню (планарні МРС), з конусоподібною мішенню, а також з мішенями інших форм залежно від конструкції застосовуваної магнітної системи.

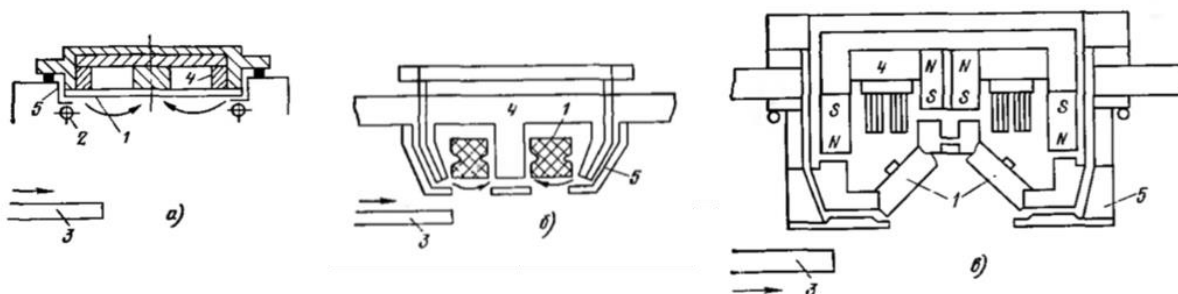


Рисунок 1.2 – Приклади зміни мішеней МРС: 1 – мета; 2 – анод; 3 – підкладка; 4 – магнітна система; 5 – екран [3]

Інший найважливіший елемент МРС – магнітна система. До неї пред'являються такі основні вимоги [3]:

- формування поблизу поверхні катода однієї чи кількох замкнутих просторових змін магнітного поля певної форми (коло, овал тощо.) із забезпеченням необхідної величини магнітної індукції (0,02...0,1 Тл);
- стабільність магнітної індукції в умовах тривалої експлуатації та температурного впливу;
- корозійна стійкість матеріалу магнітів та конструкційних матеріалів системи загалом при інтенсивному водоохолодженні.

Зазвичай магнітна система складається з магніту, що створює поле з необхідною індукцією, і полюсних наконечників, що безпосередньо примикають до мішені і забезпечують формування необхідної (оптимальної для даної конструкції МРС) зміни магнітного поля. Як джерела магнітного поля найчастіше застосовуються постійні магніти на основі барієво-стронцієвих феритів, сплавів альніко, сплавів кобальту з рідкісноземельними елементами. Всі ці матеріали мають досить високу коерцитивну силу і залишкову індукцію і можуть довго зберігати ці параметри в нормальних умовах розпилення. Феритові магніти не схильні до корозії, що дозволяє розташовувати їх усередині водоохолоджуваного катодного вузла.

Форму та геометричні розміри полюсних наконечників (визначають конфігурацію магнітного поля над поверхнею мішені) вибирають залежно від необхідної геометрії зони ерозії мішені та магнітного матеріалу, що застосовується. Полюсні наконечники найчастіше виготовляють із магнітом'яких матеріалів (маловуглецевих сталей, інших відповідних сплавів). В ідеальному варіанті силові лінії магнітного поля повинні входити і виходити нормалі до поверхні мішені для усунення розпилення її країв і забезпечення максимального поперечного компонента поля в цій області.

Іноді замість постійних магнітів застосовують електромагніти, що дозволяють оперативно змінювати магнітну індукцію та форму поля за рахунок електричних параметрів системи збудження. Але внаслідок недоліків

застосування електромагнітів - таких, як необхідність додаткового джерела сильноточного електроживлення обмоток, додатковий нагрівання мішені тепловим потоком від обмоток та ін - краще використання постійних магнітів.

Існує багато варіантів конструкцій магнітних систем. Два з них, найбільш типові, представлені на рис. 1.3. Найпростішою є система, що складається з набірних магнітних блоків, перекритих загальним полюсним наконечником (рис. 1.3). Але можливі інші варіанти з ефективнішим використанням магнітного поля. Наприклад, у разі мішеней малої товщини раціонально використовувати магнітну систему з полюсними наконечниками спеціальної форми (рис. 1.3). У цьому випадку в прикатодній області створюється сильне магнітне поле, силові лінії якого майже паралельні мішені, що розпорошується, і, як наслідок цього, відбувається більш рівномірне розпилення зони ерозії.

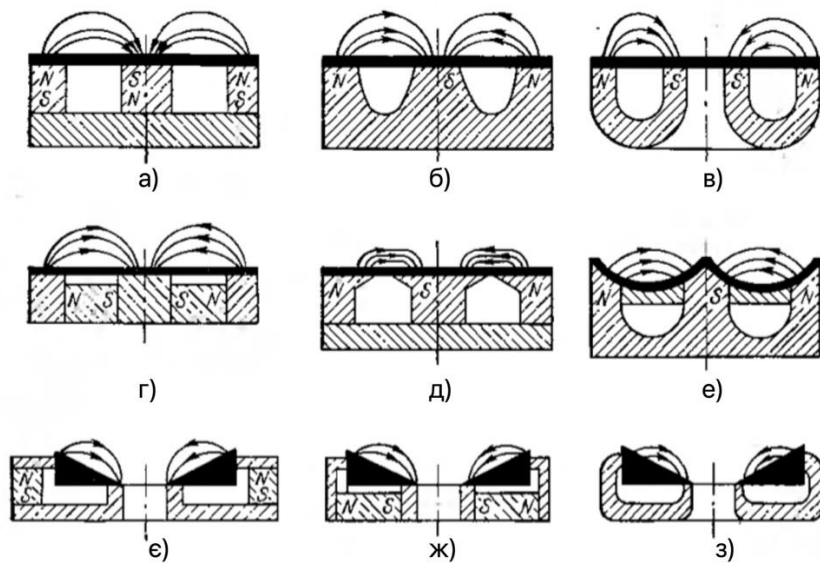


Рисунок 1.3 – Варіанти конструкції магнітних систем МРС

1.2 Основні технологічні параметри МРС і їх вплив на властивості плівок, що осаджуються

До основних робочих параметрів МРС відносяться напруга та струм розряду, індукція магнітного поля та тиск робочого газу. Ці параметри

взаємопов'язані і їх значення і стабільності залежать стабільність розряду, відтворюваність процесу осадження, параметри одержуваних плівок.

Від показників магнітного поля залежать розрядний струм і структура розряду [1]. При досить сильному магнітному полі майже все падіння потенціалу відбувається в анодному шарі. Електрони, прискорюючись у цій галузі, іонізують атоми газу, у результаті домінуючої областю іонізації стає прианодна область. Таким чином, при схрещених електричному та магнітному полях можуть спостерігатися три типи розряду залежно від напруженості магнітного поля (рис. 1.4):

- розряд у сфері катодного падіння потенціалу;
- розряд у галузі анодного падіння потенціалу;
- Розряд при одночасному існуванні обох областей.

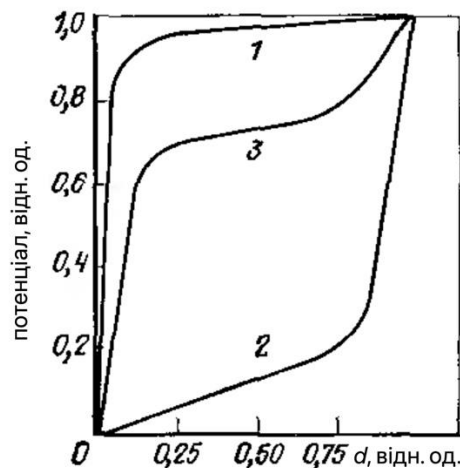


Рисунок 1.4 – Розподіл потенціалу U у розрядному проміжку МРС:

1 – для області із позитивним просторовим зарядом у катода; 2 – для області із негативним просторовим зарядом у анода; 3 – при одночасному існуванні обох областей; d – відстань між анодом та атодом; U – потенціал у розрядному проміжку

Перший тип розряду спостерігається у звичайних розпилювальних системах та в магнетронних системах зі слабкими магнітними полями (B 0,01..0,03 Тл). Він характеризується наявністю у катода області із позитивним просторовим зарядом. Індукція магнітного поля, коли він виникає цей тип

розряду, залежить від конструкції розрядної системи, робочого тиску та інших чинників. Для розпилення матеріалів найефективніший розряд із позитивним просторовим зарядом та катодним падінням потенціалу. Розряд при одночасному існуванні катодного і значного анодного потенціалів також ефективний, оскільки він забезпечує рівномірний розподіл щільності струму на поверхні мішені, що розпиляється.

У МРС магнітне поле збільшує траєкторію руху електронів у міжелектродному проміжку, отже, зростає і кількість зіткнень з атомами робочого газу. Внаслідок цього розряд існує при нижчих тисках. Інакше кажучи, можна вважати, що накладання магнітного поля еквівалентно збільшення тиску газу [1]. Високий рівень іонізації знижує напругу запалювання розряду до 1 кВ і менше. Це дозволяє працювати при тисках до 10^{-2} Па і досягати високих щільностей струму (200 mA/cm^2 для плоскої мішені) та швидкостей осадження при тиску $0,1 \dots 0,5$ Па. При цьому питома потужність, що виділяється на мішені, може становити 100 Вт/cm^2 і більше.

Найбільш важливими параметрами процесу осадження, що надають сильний вплив на властивості одержуваних плівок, є: потужність розряду, тиск робочого газу, час осадження, температура попереднього нагріву лицьової та зворотної сторін підкладки, а також напруга зміщення, що подається на підкладку в процесі осадження плівок [3]. Крім того, на рівномірність конденсованої плівки по товщині істотно впливає обертання підкладки в процесі осадження.

Швидкість осадження плівок майже лінійно залежить від потужності розряду. У свою чергу, потужність розряду за постійної потужності джерела живлення залежить від тиску робочого газу. Необхідна швидкість осадження плівки в МРС може підтримуватися за рахунок таких параметрів, як струм розряду або потужність, що підводиться. Як показує практика, для забезпечення відтворюваності та стабільності процесу осадження плівок струм розряду необхідно підтримувати з похибкою не гірше 2%, а при

стабілізації процесу за потужністю розряду її слід підтримувати з похибкою 20 Вт. Відхилення робочого тиску не повинно перевищувати 5%

У момент початку осадження відбувається швидке зростання температури підкладки, що може викликати напруження в плівці та стимулювати зростання горбків. З метою усунення цього дефекту проводиться попередній нагрівання підкладки перед початком осадження до температури, що дорівнює або більшій за ту, яка встановлюється на підкладці в процесі осадження в результаті виділення енергії конденсації, кінетичної енергії атомів осаджуваного матеріалу і відбитих від мішені атомів робочого газу. Крім того, зі збільшенням температури попереднього нагрівання збільшується розмір зерна, оскільки при цьому збільшується рухливість атомів матеріалу, що осаджується. Розмір зерна може бути ще більший за допомогою додаткового нагрівання зворотної сторони підкладки. Також за допомогою останнього можна ефективно керувати температурою підкладки протягом всього процесу осадження.

За потреби перерозподілу осадженої плівки можна подавати негативне зміщення на підкладку. Це викликає бомбардування плівки, що росте, іонами робочого газу, збільшуючи рухливість осаджуваних атомів, і, отже, викликає перерозподіл плівки на підкладці [3].

1.3 Переваги та недоліки методу МРС

Порівняно з іншими розпилювальними системами МРС мають низку переваг [3]. Як уже згадувалося вище, високий ступінь іонізації робочого газу забезпечує роботу при нижчій напрузі живлення, нижчому тиску з високими швидкостями осадження (до декількох мкм/хв) та можливістю їх регулювання в широких межах. Іншими перевагами МРС є:

- універсальність процесу, що дозволяє отримувати плівки металів, сплавів, напівпровідників та діелектриків;

- збереження співвідношення основних компонентів при розпиленні речовин складного складу;
- висока чистота плівок;
- висока адгезія плівок до підкладки;
- можливість зміни структури та властивостей плівок за рахунок потенціалу зміщення на підкладці, тиску та складу газового середовища, одночасного розпилення кількох мішеней та інших способів;
- низька пористість плівок навіть за малих товщин;
- нижчий порівняно із звичайною розпилювальною системою діодного типу радіаційний та тепловий вплив на плівку;
- можливість проведення процесу у реактивному середовищі розрідженого газу, що дозволяє одержувати плівки нітридів, карбідів, оксидів та інших сполук;
- здатність низки матеріалів при високих густинах струму на мішені до саморозпилення;
- вища енергетична ефективність процесу, що визначається ставленням маси речовини, що розпорошується в одиницю часу, до потужності, що підводиться;
- можливість складання математичного опису процесу та подальше управління ним за допомогою комп'ютера;
- інверсність процесу, що дозволяє використовувати його для осадження та травлення широкого класу матеріалів;
- можливість створення ліній безперервної дії внаслідок дуже повільної зміни емісійної характеристики МРС у часі внаслідок поступової ерозії матеріалу мішені у зоні інтенсивного розпилення, а також використання кількісних співвідношень між фізичними параметрами процесу дозволяє автоматично керувати режимами осадження тонких покриттів.

Існує ряд недоліків МРС [3]. Так, у процесі нанесення покриття розігріву підкладки сприяє бомбардування вторинними електронами, відбитими від мішені атомами аргону, радіація від сконцентрованої близько мішені плазми,

а також енергія, що виділяється в процесі конденсації атомів осаджуваного матеріалу. Зокрема, для планарних МРС, що найчастіше використовуються, (з плоскою мішенню), основне теплове навантаження на підкладку (до 60%) створюється потоком вторинних електронів від мішені. Зниження цього потоку може бути досягнуто шляхом ізоляції тримача підкладок від корпусу для створення на підкладках плаваючого потенціалу, встановлення додаткової діафрагми - анода, що обмежує попадання на підкладку високоенергетичних електронів.

Істотним недоліком є також порівняно невисокий коефіцієнт використання матеріалу мішені (близько 25% для плоскої мішені) і необхідність його збільшення ускладнювати форму мішені або конструкцію магнітної системи. Плівки, що осаджуються, мають порівняно високу нерівномірність по товщині за рахунок розпилення матеріалу з вузької зони ерозії, що має форму V-подібної канавки. Поглиблення цієї канавки в міру розпилення мішені зменшує просторовий кут розпилення, внаслідок чого зменшується рівномірність плівки за товщиною. Підвищення рівномірності плівки вимагає планетарного чи зворотно-поступального переміщення підкладок, що суттєво ускладнює конструкцію внутрішньокамерного пристрою. Крім того, у міру збільшення зони ерозії зростає магнітна індукція над поверхнею мішені та зменшується напруга розряду. Внаслідок цього знижується швидкість осадження матеріалу. Для компенсації втрат швидкості осадження часом доводиться застосовувати режим підтримки потужності розряду необхідному рівні.

2. САМОУЗГОДЖЕНІ РОЗПИЛЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

2.1 Самоузгоджені розпилювальні системи на базі порожнистого катода

Фізичні основи самоузгоджених розпилювальних систем на основі порожнистого катода полягають у реалізації ефекту порожнистого катода та магнетронного ефекту. У цьому пристрої область схрещування електричного та магнітного полів забезпечують виникнення, стабілізацію та підтримку розряду, що тліє. Також вплив на розряд надає розпорошення поверхні порожнистого катода, обсяг якого поширюється розряд. Причому форма та розміри порожнього катода позначаються на щільність електронного потоку, як і потужність розпилювача та тиск робочого газу.

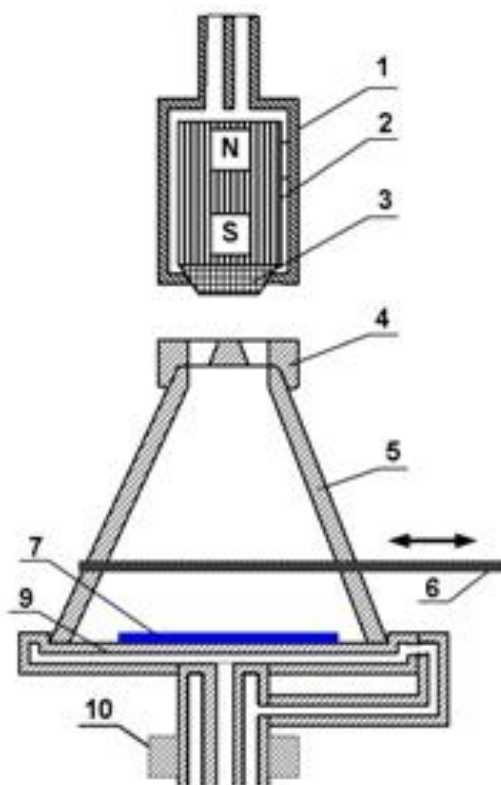


Рисунок 2.1 – Іонний розпилювач: 1-корпус анода; 2-магніт; 3-магнітопровід; 4-розпилювана частина катода; 5-корпус катода; 6-заслінка; 7-підкладка; 9-тримач підкладки; 10-ізолятор [4]

Варіант будови пристрою (рис. 2.1) використовується для конденсації в умовах тісного контакту висококонцентрованої плазми та ростової поверхні.

У такі пристрої застосовують із тиском робочого газу, що перевищує 5 Па. Іони розряду активно розпорошують верхню частину катода – 4 (рис. 2.1). Розпорошена речовина, взаємодіючи з плазмою, теж іонізується і потрапляє під дію електричного поля, яке спрямовує всередину катода. Там, внаслідок накопичення іонізованої розпорошеної речовини, виникає висококонцентрована плазма, яка своїм впливом суттєво (до 1000 °С, і більше) розігріває ростову поверхню. Але цей розігрів не перешкоджає конденсації завдяки постійному нагнітання речовини в об'єм катода.

Форма, розташування та розмір вхідних отворів у верхній частині катода обумовлені міркуваннями посилення стабільності роботи пристрою, так як сприяють розфокусуванню вхідних іонізованих потоків речовини, запобігання переходу тліючого розряду в дуговий та формуванню більш однорідної плазми.

Для забезпечення правильної роботи приладу перед початком процесу нанесення покриттів прогрівають, знегажують і прибирають заслінку. Ступінь чистоти робочого газу та його хімічний склад безпосередньо позначається на наявності домішок у конденсаті.

Цей пристрій дозволяє вирішити ряд технологічних завдань, тому що дає можливість опромінювати конденсоване покриття електричним потоком, не залучаючи додаткових джерел.

Особливий інтерес викликає той факт, що через особливості форми порожнього катода і розподілу електричного поля в ньому, механізми конденсації залежатимуть від розташування підкладки в катоді. Це з різною природою самоорганізації: під впливом польової селективності чи переважне зростання у різних кристалографічних напрямках. Перехід між польовою та структурною селективністю залежить від значення поля у ростовій поверхні, яке залежить від форми та розмірів порожнього катода та напругою, що підводиться до розпилувача. Крім цього, значення електричного поля також залежать від розмірів вхідного отвору.

Максимальна напруженість електричного поля припадає на центр розпилувача, у той час як через будову катода та його вхідного отвору

максимальний потік речовини, що осаджується, припадає на периферію. З цього випливає максимальний вплив електричного поля над центральною частиною катода, і зменшення його ближче до країв поряд із збільшенням потоку конденсованої речовини. Така зміна умов спричинить відповідні зміни у механізмах структуроутворення речовини на підкладці у тому чи іншому положенні.

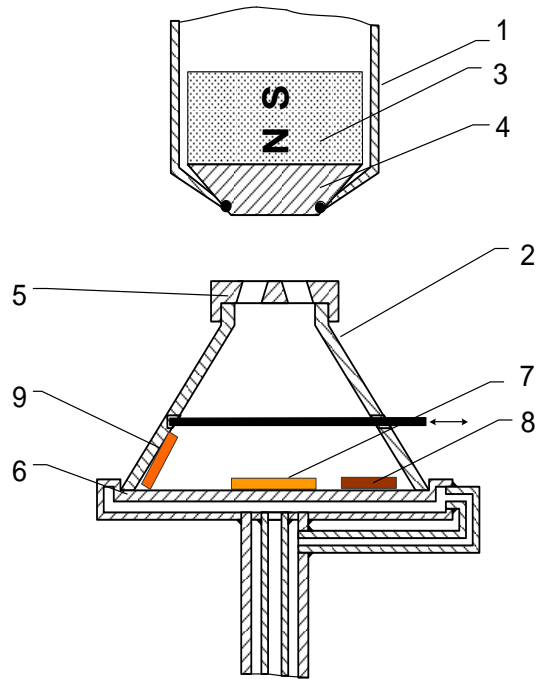


Рисунок 2.2 – Можливі положення підкладок у порожнистому катоді: 1 – анод; 2-катод; 3-магніт; 4 - магнітопровід; 5-розпилювана частина катода; 6-водоохолоджувана основа катода; 7-підкладка в положенні 1; 8 - підкладка в положенні 2; 9 – підкладка у положенні 3 [4]

Формування конденсатів на діелектричних підкладках усередині порожнистого катода має відповідну специфіку. На початковому етапі навколорівноважної конденсації на підкладках-діелектриках накопичується заряд, який стікає як мікророзрядів. У міру формування зовнішнього шару, що забезпечує ефективне стікання заряду, ця нестабільність припиняється. Необхідно вибирати матеріал покриття підкладки, враховуючи його коефіцієнт розпилення і тиск рівноважних парів, які повинні мати набагато менші значення, ніж ці характеристики конденсованих матеріалів. Це потрібно

для запобігання одержанню конденсатів із суміші осаджуваної речовини та матеріалу покриття підкладки [4]. Процес подібного змішування можна також мінімізувати, збільшивши потік, що осаджується.

Чим більший рівноважний тиск пари, коефіцієнт іонного розпилення і менше гранична енергія і температура плавлення, тим сильніша рівновага процесу конденсації. Це дозволяє ввести кореляційний коефіцієнт, що показує схильність речовини до селективних процесів:

$$\alpha = \frac{K_i}{E_{гр} \cdot T_{пл} \cdot T_p} \quad (2.1)$$

де K_i - коефіцієнт розпилення іонами Ar з енергією 200 eV;

$E_{гр}$ - гранична енергія розпилення іонами Ar;

$T_{пл}$ – температура плавлення;

T_p – температура, коли він рівноважний тиск дорівнює 10^{-2} Па.

Таблиця 2.1 - Фізичні параметри матеріалів, що розпилюються [9]

Речовина	K_i	$E_{гр}$, eV	$T_{пл}$, °C	T_p , °C	α , eV ⁻¹ · °C ⁻²
Cu	1,1	17	1084	1297	4,60
Al	0,35	13	659	1220	3,34
Ni	0,7	21	1450	1530	1,50
Ta	0,3	26	3000	3060	0,13
C	0,05	33	3700	2600	0,015

2.2 Самоузгоджені розпилювальні системи з використанням зворотних дифузійних потоків МРС

У самоузгоджених розпилювальних системах з використанням зворотних дифузійних потоків стабілізація розряду досягається через явища схрещування електричного та магнітного полів, зворотної дифузії та

зворотного розсіювання. Ці явища виникають за умов підвищених тисків робочого газу: більше 5..7 Па.

Основний наслідок цих явищ: повернення розпорошеної речовини на мішень. Причому, для атомів з масою, що перевищує масу атомів робочого газу, це повернення обумовлено явищем зворотної дифузії, тоді як для легших нарівні з явищем зворотної дифузії грає роль і явище зворотного розсіювання.

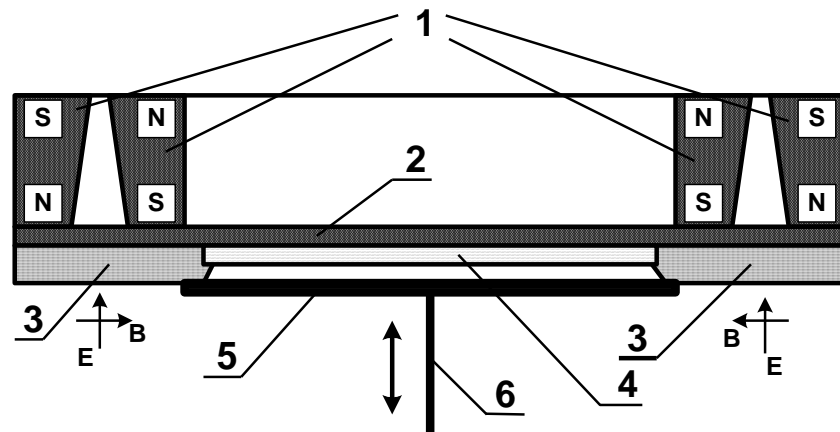


Рисунок 2.3 – Розпилювач на базі МРС: 1-магнітна система; 2-водоохолоджуваний тримач мішені; 3-розпилювана мета; 4-підкладка; 5-заслінка [4]

Спочатку відбувається розпилення мішені в областях ерозії, обумовлених перетинами електричного та магнітного, створеного магнітною системою, полів. Після проведення знегажування та глибокого очищення робочого газу. Далі переміщенням штанги вниз відкривається заслінка, і розпорошена речовина осаджується на підкладку за допомогою зворотної дифузії. Підкладка прикріплена до водоохолоджувального утримувача.

Відповідно до теорії Пеннінга-Маубса залежність від тиску середніх щільностей зворотних дифузійних потоків, що облягаються, визначається такими співвідношеннями:

а) для частинок, що осаджуються, з масою, що перевищує масу атомів робочого газу:

$$\eta = \frac{I_i K_i}{qF} \left(1 - \frac{2,3\lambda p_0(1)}{2,3\lambda p_0(1) + p_0 h - L_k(1)} \right) \quad (2.2)$$

б) для осаджуваних частинок з легших, ніж атоми робочого газу:

$$\eta = \frac{I_i K_i}{qF} \left(1 - \frac{(1/2)(1 + \exp(-p_0 h / (\lambda_\infty(1)))) 2,3\lambda p_0}{2,3\lambda p_0(1) + p_0 h} \right) \quad (2.3)$$

де I_i – струм іонів аргону, що розпоршують мішень;

q – заряд іона;

F – площа поверхні осадження зворотного дифузійного потоку;

K_i – коефіцієнт розпилення матеріалу, що не враховує вплив зворотної дифузії;

$\lambda p_0(1)$ – середня довжина вільного пробігу розпиленних атомів при тиску 1 Па та температурі 273 К;

h – відстань від мішені до підкладки;

$p_0 = 273R/T$ – наведений тиск газу;

$L_k(1)$ – середня довжина спрямованого пробігу;

$\lambda p_\infty(1)$ – середня довжина вільного пробігу розпоршених атомів при тиску 1 Па та температурі більшій за постійну Сазерленда.

3 РОЗПОДІЛ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ПОКРИТТЯХ, ОДЕРЖАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СТРИЖНЕВОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Конструктивні особливості та принцип роботи пристрою із розпилюваною мішенню у вигляді стрижня

Пристрій для розпилення декількох компонент одночасно і нанесення покриттів на внутрішню поверхню труби був розроблений на кафедрі наноелектроніки та модифікації поверхні [5]. Цей пристрій може бути використаний для нанесення на внутрішню поверхню циліндрів стійких проти спрацювання, корозійностійких та інших покриттів із металів та їх сполук [10-15].

Конструкція іонного розпилювача показана на рис. 3.1.

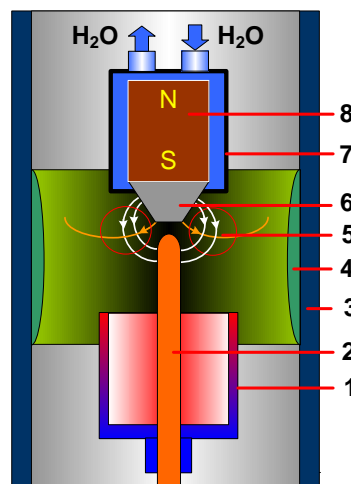


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення перетину іонного розпорозувача стрижнів всередині труби (1 – пустотілий катод; 2 – розпорозувальний стрижень; 3 – труба для нанесення покриттів; 4 – покриття на внутрішній поверхні труби; 5 – область перетину силових ліній електричних та магнітних полів; 6 – фокусуючий магнітопровід; 7 – охолоджуваний водою корпус аноду; 8 – постійний магніт) [5]

Пристрій містить співвісно розташовані катод та анод, останній з яких має корпус 7 у вигляді герметичного пустотілого циліндра, виконаного з

немагнітного матеріалу, а також водоохолоджувану магнітну систему 8, розташовану в нижній частині корпусу анода 7. При цьому для концентрації магнітного поля до торцевої частини магнітної системи співвісно їй приєднаний фокусуючий магнітопровід 6 у вигляді зрізаного конуса. Поряд з цим корпус пустотілого суцільного катода 1 має форму циліндра верхня відкрита частина якого звернена до анода, а нижня частина корпусу катода приєднана до основи, яка в свою чергу з'єднана з тримачем. При цьому розпорошувальний елемент 2 у вигляді стрижня розміщений співвісно корпусу катода в його середній частині. При реалізації тліючого розряду з підвищеним струмом важливе значення має область перетину силових ліній електричного та магнітного полів 5, що є необхідною передумовою реалізації магнетронного ефекту. Крім цього стаціонарність розряду при знижених тисках робочого газу підтримує також ефект пустотілого катода. В разі застосуванні зазначеного пристрою формування покриття на внутрішній поверхні труби відбувається завдяки іонному розпиленню частини стрижня 2, що виступає над пустотілим катодом 1, тобто знаходиться безпосередньо біля магнітопроводу. Крім того, стрижень може бути виготовлений складеним, наприклад, може складатися із декількох шайб різних матеріалів, нанизаних на одну спільну вісь. Це дозволить одержувати багатоконпонентні захисні покриття, такі, як, наприклад, на основі високоентропійних сплавів.

3.2 Математична модель для розрахунку елементного складу покриттів на внутрішній поверхні труби

У цьому розділі викладена математична модель, розвинута у [5], що описує масоперенесення розпиленних атомів у системі розпилювача, в якому розпилювальна мішень має форму складеного стрижня, а покриття на носиться на співвісну до нього трубу, а саме її внутрішню поверхню. Також наведено розрахунок елементного складу покриттів на внутрішній поверхні труби з використанням цієї моделі, проведено порівняння з експериментальними

даними. Для порівняння моделі з експериментальними даними проведено експеримент, в якому замість труби використовувались підкладки, розташовані в ряд, на однаковій відстані від стрижня. Схема розпилювача приведена на рис. 3.2, а параметри моделі – на рисунку 3.3.

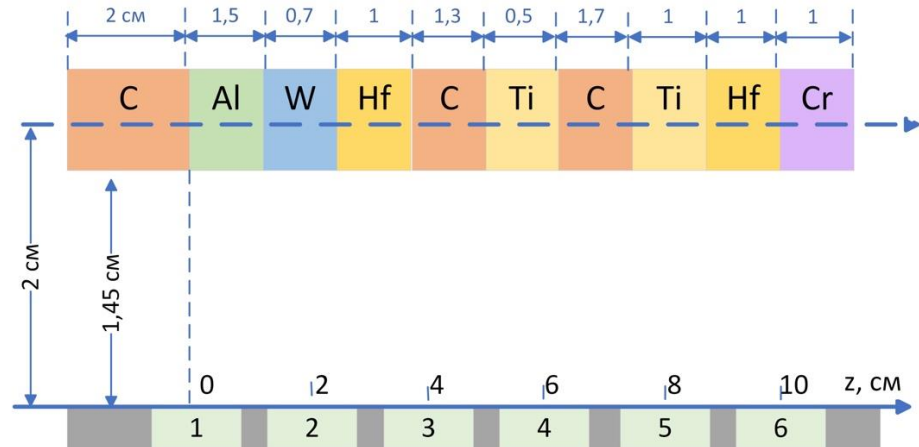


Рисунок 3.2 – Параметри розпилювача

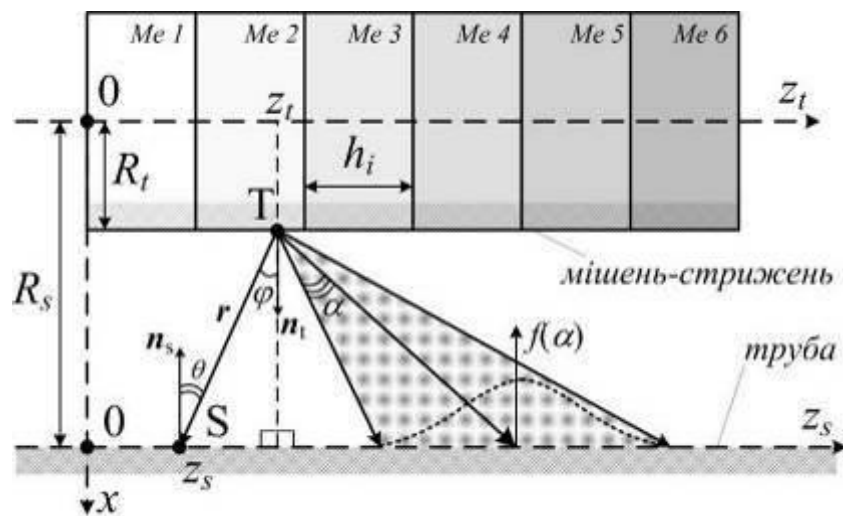


Рисунок 3.3 – Параметри моделі [5]

В експерименті відбувалось розпилення стрижня, складеного із набору шайб з таких матеріалів: C, Ti, Hf, Ta, W, Cr, Al (для алюмінію використано шайбу зі ступу ВТ6, оскільки чистий алюміній має занадто низьку температуру плавлення для даного експерименту). У табл. 3.1 наведено експериментальний розподіл хімічних елементів на підкладках 1 – 6.

Таблиця 3.1 – Експериментальний розподіл хімічних елементів на підкладках 1 – 6. Значення концентрації дані в ат. %.

	Підкл. 1	Підкл. 2	Підкл. 3	Підкл. 4	Підкл. 5	Підкл. 6
C	55,16	51,9	41,31	42,87	28,65	22,08
Ti	34,14	29,78	37,63	32,26	38,46	29,81
Hf	0,83	0,56	1,42	4,3	19,61	15,76
Ta	4,94	8,74	13,02	6,79	0,9	0
W	1,40	5,9	3,19	10,75	3,59	0,87
Cr	0,33	0,29	0,65	1,01	8,79	24,42
Al	2,59	2,35	0	0	0	0

Модель розглядає розпилення атомів з деякої точки поверхні стрижня, їх переміщення в проміжку між стрижнем та трубою (підкладками), та підсумовує кількість атомів, що потрапляють на дану точку поверхні труби (підкладок) для кожного з хімічних елементів складеного стрижня. В основі моделі лежить кутовий розподіл розпилених атомів. Добре відомо, що при іонному розпорощенні кутовий розподіл розпорощених атомів можна задовільно описати косинусоїдальним розподілом, від початку запропонованим для комірки Кнудсена [7]. Це не є точний метод опису розподілу розпилених атомів, оскільки в дійсності він залежить від енергії падаючих частинок та структури поверхні [8]. Водночас, косинусоїдальний розподіл достатньо задовільно описує розпилення у нашому випадку, а саме розпилення дрібнодисперсної полікристалічної мішені з поверхнею без переважної кристалографічної орієнтації [9].

Таким чином, цей розподіл описує кількість атомів d^2N_{sp} , розпилених з елементу поверхні dS_t за одиницю часу в межах тілесного кута $d\omega$:

$$d^2N_{sp} = N_0 \cos \varphi \frac{d\omega}{\pi} dS_t \quad (3.1)$$

де φ – кут вильоту атомів, N_0 – швидкість розпилення матеріалу (в $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$). Відразу зазначимо, що під час обчислень знайти реальну швидкість розпилення можна лише наближено, тому ми будемо вважати швидкість розпилення N_0 прямо пропорційною до коефіцієнта розпилення K матеріалу $N_0 = C \cdot K \cdot f$ (K відомі з довідників [10]). Функція f підлягатиме знаходженню за експериментальними даними і враховуватиме нерівномірний вплив плазми розряду на стрижень уздовж його товщини. Множник C також визначається експериментально та враховує вплив іонного струму, тиску робочого газу, напруги розряду.

Подальша задача – знайти молярні частки n кожного компонента складеної мішені-стрижня залежно від координати поверхні росту. Для цього необхідно знайти кількість атомів кожного компонента, що надходить на елемент циліндричної поверхні росту dS_t за одиницю часу. Так, будемо розглядати надходження розпилених атомів у довільну точку поверхні росту S від довільної точки поверхні мішені T . Потоки розпиленої речовини розглядаються в площині поданого перерізу з урахуванням деякого розсіяння на частинках робочого середовища.

У (3.1) тілесний кут $d\omega = dS_s \cdot \cos\theta / r^2$, елемент поверхні мішені $dS_t = dz_t \cdot dl_t$, елемент поверхні росту $dS_s = dz_s \cdot dl_s$, де dl_s та dl_t – дугові елементи поперечного перерізу поверхні труби та мішені відповідно. Тоді кількість атомів $dN(z_s)$, що розпилені з довільної точки T координати z_t та надходять до довільної точки S координати z_s за одиницю часу, визначається виразом

$$\frac{dN(z_s)}{dl_s dl_t} = \iint_{z_t, \varphi} \frac{N_0}{\pi r^2} f(\alpha) \cos\varphi \cos\theta d\varphi dz_t. \quad (3.2)$$

Із геометричних міркувань з рис. 3.2 отримуємо, що $\theta = \varphi$, $\cos\varphi = R_s(1 - \rho)/r$, $r^2 = R_s^2(1 - \rho)^2 + (z_s - z_t)^2$.

Реальний розпилувач працює при підвищених тисках робочого газу $P_{Ar} \sim 5 - 6$ Па для труби діаметром 4 см та діаметром стрижня 1 см. У цих умовах

виконується співвідношення $273 P_{Ar} R_s (1 - \rho)/T \gtrsim \lambda$ [1] що означає наявність відносно неінтенсивного розсіяння розпилених атомів в робочій атмосфері. Тому можна вважати, що поверхні осадження досягнуть всі розпилені атоми, зазнаючи розширення потоку за певним кутовим розподілом $f(\alpha)$ (рис. 3.2). Тоді $f(\alpha)$ в (3.2) задаватиме ту відносну частину потоку атомів, розпорошених з точки Т в напрямку φ , яка потрапить в точку S. За функцію $f(\alpha)$ приймемо функцію Гаусса, вважаючи кут α таким, що визначає кінцеву ширину потоку атомів, розпорошених з точки Т:

$$f(\alpha) = \frac{\Omega}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.3)$$

де Ω – емпіричний коефіцієнт, що підлягає визначенню за експериментальними даними для уточнення розкиду.

Це дозволяє визначити також максимальну кінцеву ширину потоку рівною 6σ . Очевидно, що дисперсія σ залежить від відстані, що пройшли атоми вздовж прямої ST (рис. 3.2). Знайти σ можна з рівняння послаблення прямого потоку частинок внаслідок процесів розсіяння [14], тобто:

$$f(\alpha = 0) = \frac{\Omega}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \exp\left[-\frac{r(\varphi)}{\lambda}\right] \quad (3.4)$$

Звідки маємо:

$$\sigma = \frac{\Omega}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[\frac{r(\varphi)}{\lambda}\right] \quad (3.5)$$

В інтегралі (3.2) кут розсіяння α виражається через координати z_s, z_t і кут φ (рис. 3.2):

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[\frac{z_s - z_t}{R_s(1-\rho)} \right] - \varphi. \quad (3.6)$$

Тоді вираз (3.2) набуває вигляду (3.7):

$$\frac{dN(z_s)}{dl_s dl_t} = \int \int_{z_t, \varphi} \frac{N_0}{\pi} \frac{\cos^2 \varphi}{R_s^2 (1-\rho)^2 + (z_s - z_t)^2} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2} - R_s \frac{1-\rho}{\lambda \cos \varphi} \right] d\varphi dz_t. \quad (3.7)$$

При інтегруванні (3.7) за координатою z_t необхідно враховувати послідовність та товщину наборних шайб. Для конкретного експерименту ці дані наведені на рис. 3.2. За кутом φ інтегрування (3.7) проводиться в межах $[-\pi/2, \pi/2]$.

3.3 Результати обчислень

Вхідними даними до моделі є такі:

- тиск робочого газу 5 Па;
- середня довжина вільного пробігу 1.2 см;
- радіус труби 2 см;
- радіус стрижня 0,55 см;
- коефіцієнти розпилення 0,2 (C), 0,6 (Ti), 0,8 (Hf), 0,3 (Ta, W), 1,3 (Cr), 0,35 (Al).

Обчислення проводилися за формулою (3.7) з використанням середовища Python 3 (Anaconda, Jupiter Notebook). Код програми наведений нижче.

```
import numpy as np
import scipy.integrate as integr
```

```

import math
from matplotlib import pyplot as pl

Rs = 2 # см, радіус труби
Rt = 0.55 # см, радіус стрижня
ro = Rt/Rs

# коефіцієнти розпилення:
КС = 0.2
КТi = 0.6
КНf = 0.8
КТa = 0.3
КW = 0.3
КСr = 1.3
КАl = 0.35

# константи
кВ = 1.38e-23 # константа Больцмана
bС = 15.9 # атомний об'єм ?
bAr = 40 # 16.2
МС = 12
МАr = 18
Тр = 3000
ра = 5 # тиск в Па
mС = МС * 1.661e-27
mAr = МАr * 1.661e-27
А1 = 1
mх = 50 # кількість точок
h = 0.05 # крок

# Обчислення довжини вільного пробігу
DCAr = 0.01 * (Тр**1.75) * math.sqrt((МС + МАr)/(МС*МАr)) / (ра *

```

```

    (bC**(1/3) + bAr**(1/3))**2) # коефіцієнт дифузії, м2/с
vC = math.sqrt(8*kB*Tp/(math.pi*mC)) # швидкість, м/с
l = 100*3*DCAr/vC # см, довжина вільного пробігу для вуглецю

```

```

# Експериментальні дані:

```

```

Conc = np.array([[55.16, 51.9, 41.31, 42.87, 28.65, 22.08], # C
                [34.14, 29.78, 37.63, 32.26, 38.46, 29.81], # Ti
                [0.83, 0.56, 1.42, 4.3, 19.61, 15.76], # Hf
                [4.94, 8.74, 13.02, 6.79, 0.9, 0.00001], # Ta
                [1.40, 5.9, 3.19, 10.75, 3.59, 0.87], # W
                [0.33, 0.29, 0.65, 1.01, 8.79, 24.42], # Cr
                [2.59, 2.35, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.00001]]) # Al
zexp = [0, 2, 4, 6, 8, 10] # координати підкладок

```

```

# Далі - основні обчислення концентрацій елементів уздовж координати

```

```

C1 = []; C2 = []; C3 = []; Conc_C = []
Ti1 = []; Ti2 = []; Conc_Ti = []
Hf1 = []; Hf2 = []; Conc_Hf = []
Ta = []; Conc_Ta = []
W = []; Conc_W = []
Cr = []; Conc_Cr = []
Al = []; Conc_Al = []
z = []; pogr = []

```

```

def alpha(x1,x2,x3): # x1 це zs, x2 це zt, x3 це phi

```

```

    return ( math.atan((x1-x2)/(Rs*(1-ro))) - x3 )

```

```

def sigma(y1): # y1 це phi

```

```

    return (Al * math.exp(Rs*(1-ro)/(l*math.cos(y1))) / math.sqrt(2*
    math.pi))

```

```

def f(zt):
    return (0.9 / ( 1 + np.exp( (zt-150*h) / (25*h) ) ) + 0.1)

# графічне подання функції f(zt), яка моделює зміну інтенсивності
розпилення уздовж стрижня
zt = np.arange(-20*h, 210*h, 2*h)
pl.plot(zt, f(zt))
pl.savefig('f.png', format='png', dpi=300)
pl.show()

def int_element(K, zt1, zt2):
    res = integr.dblquad(lambda zt, phi: f(zt) * K/math.pi *
(math.cos(phi))**2 / (Rs**2 * (1-ro)**2 + (zs-zt)**2) * math.exp ( -
0.5*(alpha(zs,zt,phi)/sigma(phi))**2 - Rs*(1-ro) / (1*math.cos(phi)) ), -math.pi/2,
+math.pi/2, lambda x: zt1, lambda x: zt2) # в цьому рядку задаються межі
інтегрування для zt
    return (res[0])

pogrC = 0; pogrTi = 0; pogrHf = 0; pogrTa = 0; pogrW = 0; pogrCr = 0;
pogrAl = 0

for i in range(mx + 1):
    zs = -1*20*h + 10 * 20*h / mx * i
    z.append(zs)
    C1.append( int_element(KC, -1*20*h, 1*20*h) )
    Al.append( int_element(KAl, 1*20*h, 1.5*20*h) )
    Ta.append( int_element(KTi, 1.5*20*h, 2.2*20*h) )
    W.append( int_element(KW, 2.2*20*h, 3*20*h) )
    Hf1.append( int_element(KTa, 3*20*h, 4*20*h) )

```

```

C2.append( int_element(KC, 4*20*h, 5.3*20*h) )
Ti1.append( int_element(KTi, 5.3*20*h, 5.8*20*h) )
C3.append( int_element(KC, 5.8*20*h, 7.5*20*h) )
Ti2.append( int_element(KTi, 7.5*20*h, 8.5*20*h) )
Hf2.append( int_element(KHf, 8.5*20*h, 9.5*20*h) )
Cr.append( int_element(KCr, 9.5*20*h, 10.5*20*h) )

```

$$\text{Sum} = C1[i] + C2[i] + C3[i] + Al[i] + Ta[i] + W[i] + Hf1[i] + Hf2[i] + Ti1[i] + Ti2[i] + Cr[i]$$

```
# концентрації
```

```

Conc_C.append((C1[i] + C2[i] + C3[i]) * 100 / Sum)
Conc_Al.append(Al[i] * 100 / Sum)
Conc_Ta.append(Hf1[i] * 100 / Sum)
Conc_W.append(W[i] * 100 / Sum)
Conc_Hf.append((Hf2[i]) * 100 / Sum)
Conc_Ti.append((Ti1[i] + Ti2[i] + Ta[i]) * 100 / Sum)
Conc_Cr.append(Cr[i] * 100 / Sum)

```

```
# похибка
```

```
if zs in zexp:
```

```

    ind = zexp.index(zs)
    pogrC = pogrC + (Conc_C[i] - Conc[0,ind])**2
    pogrTi = pogrTi + (Conc_Ti[i] - Conc[1,ind])**2
    pogrHf = pogrHf + (Conc_Hf[i] - Conc[2,ind])**2
    pogrTa = pogrTa + (Conc_Ta[i] - Conc[3,ind])**2
    pogrW = pogrW + (Conc_W[i] - Conc[4,ind])**2
    pogrCr = pogrCr + (Conc_Cr[i] - Conc[5,ind])**2
    pogrAl = pogrAl + (Conc_Al[i] - Conc[6,ind])**2

```



```

pogrC = math.sqrt(pogrC/6)
pogrTi = math.sqrt(pogrTi/6)
pogrHf = math.sqrt(pogrHf/6)
pogrTa = math.sqrt(pogrTa/6)
pogrW = math.sqrt(pogrW/6)
pogrCr = math.sqrt(pogrCr/6)
pogrAl = math.sqrt(pogrAl/6)

```

```
print(pogrC, pogrTi, pogrHf, pogrTa, pogrW, pogrCr, pogrAl) #
```

Середньоквадратична похибка моделі, обчислена для кожного елементу

```

pl.plot(z, Conc_C, 'b', label = 'C')
pl.plot(z, Conc_Ti, 'g', label = 'Ti')
pl.plot(z, Conc_Hf, 'r', label = 'Hf')
pl.plot(z, Conc_Ta, 'y', label = 'Ta')
pl.plot(z, Conc_W, 'c', label = 'W')
pl.plot(z, Conc_Cr, 'm', label = 'Cr')
pl.plot(z, Conc_Al, 'k', label = 'Al')
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 100)
pl.savefig('vse_koncentracii.png', format='png', dpi=300)
pl.show()

```

```

pl.plot(z, Conc_C, 'b', label = 'C')
pl.plot(zexp, Conc[0], 'bo') # C
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')

```

```
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('C.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_Ti, 'g', label = 'Ti')
pl.plot(zexp, Conc[1], 'gD') # Ti
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('Ti.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_Hf, 'r', label = 'Hf')
pl.plot(zexp, Conc[2], 'rv') # Hf
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('Hf.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_Ta, 'y', label = 'Ta')
pl.plot(zexp, Conc[3], 'y^') # Ta
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('Ta.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_W, 'c', label = 'W')
pl.plot(zexp, Conc[4], 'cs') # W
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('W.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_Cr, 'm', label = 'Cr')
pl.plot(zexp, Conc[5], 'mp') # Cr
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('Cr.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

```
pl.plot(z, Conc_Al, 'k', label = 'Al')
pl.plot(zexp, Conc[6], 'k*') # Al
pl.xlabel('z, см')
pl.ylabel('Концентрація, ат.-%')
pl.legend(loc = 'upper right')
pl.ylim(0, 80)
pl.savefig('Al.png', format='png', dpi=300)
pl.show()
```

Перш ніж одержати кінцеві результати розподілу елементного складу, була знайдена функція $f(\alpha)$ у такому вигляді:

$$f(\alpha) = \frac{0,9}{1 + \exp\left(\frac{z\alpha - 7,5}{1,25}\right)} + 0,1. \quad (3.8)$$

На рис. 3.4 наведено графік функції $f(\alpha)$. Така залежність відповідає максимальній концентрації плазми на верхній частині стрижня і максимальному розпиленню таких елементів як вуглець, алюміній, тантал. Відповідно хром розпилювався найслабкіше.

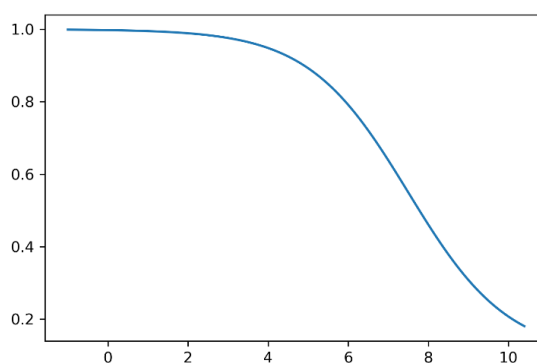


Рисунок 3.4 – Функція $f(\alpha)$ за виразом (3.8)

На рис. 3.5 наведено розподіл елементного складу уздовж всієї труби. На рис. 3.6 наведено молярні частки елементів порівняно з експериментальними даними для кожного хімічного елементу окремо.

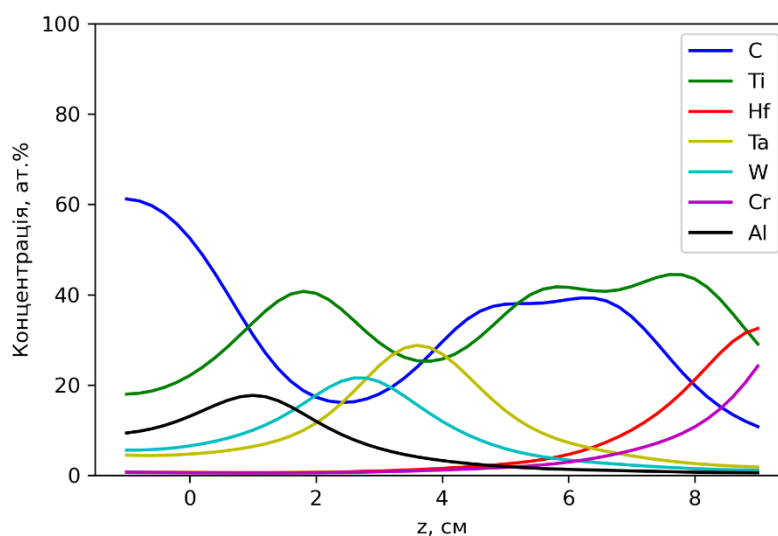


Рисунок 3.5 – Молярні частки елементів уздовж труби (координати z)

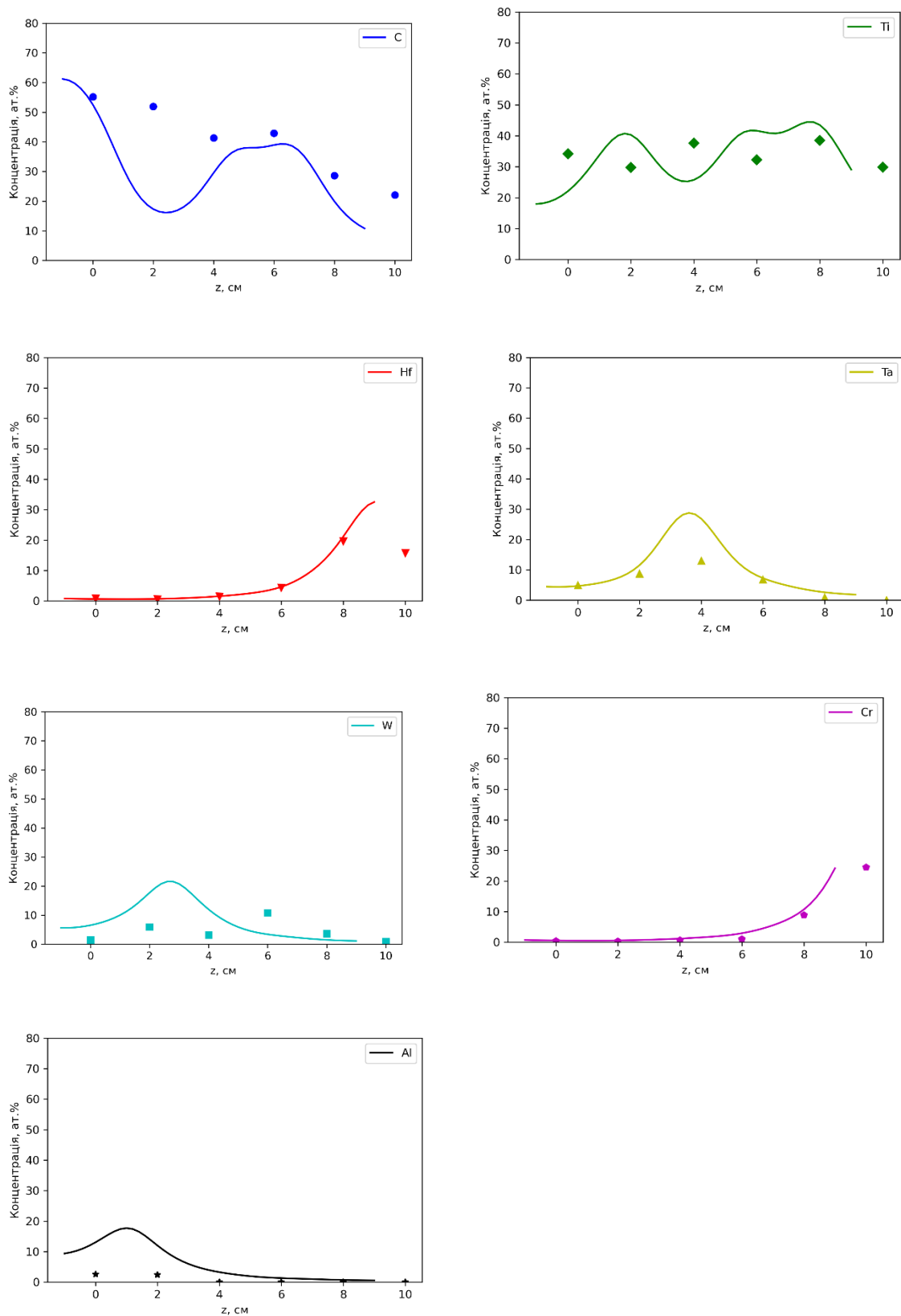


Рисунок 3.6 – Молярні частки елементів порівняно з експериментальними даними

Для оцінки степені точності моделі було обчислено середньоквадратичну похибку. Середньоквадратична похибка, яка описує віжхилення між експериментальними та розрахунковими даними, була знайдена за формулою (3.9) і складала 0.174-0.183 для різних елементів.

$$похибка = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (n_{calc} - n_{exp})^2, \quad (3.9)$$

де n_{exp} – експериментальна молярна частка елемента для даної координати труби (або підкладка за номером i), n_{calc} – розрахункова молярна частка елемента для тієї ж координати.

ВИСНОВКИ

1. Магнетронне розпилювання широко використовується в сучасних технологіях формування покриттів та тонких плівок завдяки набору переваг. Конструкції сучасних розпилювальних пристроїв вже достатньо розвинуті і відрізняються особливостями будови та взаємного розташування катодного вузлу, мішені, магнітної системи тощо. Водночас магнетронні розпилювальні системи продовжують вдосконалюватися з огляду на збільшення кола задач та вимог.

2. Самоузгоджені розпилювальні системи дозволяють проводити розпилення речовини та осаджувати її в умовах наближення до рівноваги в системі плазма-конденсат, а також обирати осадження в прямих або зворотних потоках речовини. Конструкція самоузгоджених розпилювальних систем дозволяє використовувати різну геометрію катоду. На відміну від стандартних магнетронів, самоузгоджені розпилювальні системи працюють при підвищеному тиску робочого газу порядку 10 Па.

3. Розглянута математична модель процесу масоперенесення атомів, розпилених з поверхні мішені-стрижня у магнетронному розпилювачі на основі пустотілого катода. Обчислено розподіл елементного складу на шести підкладках, розташованих уздовж внутрішньої поверхні труби, та проведено порівняння з експериментом. Обчислення проводилися в середовищі Python 3, Jupiter Notebook. Модель задовільно описує елементний розподіл порівняно з експериментальними даними, середньоквадратична похибка складає 0,174-0,183 для різних елементів. Для уточнення обчислень в моделі потрібно вдосконалити урахування нерівномірного впливу плазми на процес розпилення стрижня.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. Учебник для вузов по специальности "Конструирование и производство РЭА". - М.: Высшая школа, 1987. - 367 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. Учебное пособие для вузов по специальности "Конструирование и производство ЭВА". - М.: Высшая школа, 1986. - 320 с.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 328 с.
4. Перекрестов В.И. Самосогласованные ионные распылители. Функциональные возможности и перспективы использования /В.И. Перекрестов, Ю. А. Косминская, А. С. Корнющенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 89 – 92.
5. Космінська Ю.О. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу «Закономірності структуроутворення покриттів високоентропійних багатоеlementних систем на внутрішніх поверхнях труб малих діаметрів». – Суми, СумДУ, 2020. – 125 с.
6. Глэнг Р. Вакуумное испарение, в: Технология Тонких Пленок. Справочник. Том 1 (под ред. Л. Майссела, Р. Гленга). – Москва: Советское радио, 1977. – С. 9–174.
7. Depla D., Mahieu S. Reactive sputter deposition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
8. Венер Г.К., Андерсон Д.С. Физические механизмы испарения материалов под действием ионной бомбардировки (ионного распыления), в: Технология Тонких Пленок. Справочник. Том 1 (под ред. Л. Майссела, Р. Гленга). – Москва: Советское радио, 1977. – С. 352–404.

9. Майссел Л. Получение пленок методом ионного распыления, в: *Технология Тонких Пленок. Справочник. Том 1* (под ред. Л. Майссела, Р. Гленга). – Москва: Советское радио, 1977. – С. 405–460.

10. *High Power Impulse Magnetron Sputtering. Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications*. Ed. by D. Lundin, T. Minea, J. T. Gudmundsson. - Elsevier, 2020. - 384 pp.

11. Y. Yuan, L. Yang, Zh. Liu, Q. Chen. High power impulse magnetron sputtering and its applications // *Plasma Science and Technology*. - 2018. - V.20. - 065501 (17 pp).

12. Malinovskis P. Magnetron sputtering of binary, ternary and multicomponent thin film borides and carbides. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*. - Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis. - 2018. - 72 p.

13. W. Li, P. Liu, P. K. Liaw. Microstructures and properties of high-entropy alloy films and coatings: a review // *Materials Research Letters*. - 2018. - V.6, N4. - P. 199-229.

14. S. Kr. Padamata et al. Magnetron Sputtering High-Entropy Alloy Coatings: A Mini-Review // *Metals*. - 2022. - V. 12(2). - P. 319.

15. R. Chodun et al. The sputtering of titanium magnetron target with increased temperature in reactive atmosphere by gas injection magnetron sputtering technique // *Applied Surface Science*. - 2022. - V. 574. - P. 151597.