

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Застосування спектральних методів діагностики газоразрядної плазми в технології розпилювання

(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1

Ісаєнко І.О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна

техніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Мікро та нанoeлектроніка»

(повна назва освітньої програми)

Керівник старш. викл. Бендеберя Г.М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. Кафедри Бондаренко І.М.

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Спеціальність 153 «Мікро та наносистемна техніка»  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма «Мікро та наноелектроніка»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ісаєнку Івану Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Застосування спектральних методів діагностики газоразрядної плазми в технології розпилювання

затверджена наказом університету від 26 травня 2025 р. № 414Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Спектрометричні методи дослідження плазми газового електричного розряду 2. Особливості методів створення плазми у магнетронних розпилювальних системах 3. Дослідження технологічних умов і спектрів випромінювання плазми газового електричного розряду

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1.Спектрометричні методи дослідження плазми газового електричного розряду;

2.Особливості методів створення плазми у магнетронних розпилювальних системах;

3. Дослідження технологічних умов і спектрів випромінювання плазми газового електричного розряду;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Презентація – 12 слайдів.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів робіт	Терміни виконання етапів робіт	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	26.05	
2	Огляд спектральних характеристик	27.05	
3	Огляд конфігурацій магнітних систем	30.05	
4	Дослідження спектрів випромінювання плазми магнетронного розряду у різних технологічних режимах	02.06	
5	Оформлення пояснювальної записки	06.06	
6	Рецензування	10.06	
7	Захист	13.06	

Дата видачі завдання \_\_\_\_ 26 травня \_\_\_\_ 2025 р.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст. викладач Бендеберя Г.М

(підпис)

(посада, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 43 сторінки, 11 рисунків, 12 джерел посилання, 2 додатка

### МАГНІТРОННИЙ РОЗРЯД, ПЛАЗМА, СПЕКТР, ВИПРОМІНЮВАННЯ, МАГНІТНА СИСТЕМА

Об'єкт дослідження - спектр випромінювання магнітронного розряду.

Мета роботи – дослідження методів та вимірювання спектрів випромінювання плазми газового магнітронного розряду.

Метод - аналітичний огляд методів дослідження спектрів газового розряду, аналіз літературних джерел і інтернет ресурсів.

Актуальність: Використання магнітронного розряду є основною технологією нанесення плівок в мікроелектроніці і використання спектральних методів діагностики є інформативним і дистанційним способом контролю технологічних процесів. У сучасних умовах розвитку нанотехнологій, тонкоплівкової електроніки та функціональних покриттів, технології розпилювання (зокрема, магнетронного, іонно-плазмового тощо) відіграють ключову роль у створенні високоякісних плівок з контрольованими властивостями. Одним із критичних чинників, що визначає характеристики кінцевого матеріалу, є стан плазми в розрядному просторі.

## ABSTRACT

Explanatory note of qualification work: 43pages,11 figures, 12 references, 2 appendixes

MAGNETRON DISCHARGE, PLASMA, SPECTRUM, RADIATION,  
MAGNETIC SYSTEM

Object of study - radiation spectrum of a magnetron discharge.

Purpose - research of methods and measurement of plasma radiation spectra of gas magnetron discharge.

Methods - analytical review of methods for studying gas discharge spectra, analysis of literature and Internet resources.

Relevance: The use of magnetron discharge is the main technology for applying films in microelectronics and the use of spectral diagnostic methods is an informative and remote way to control technological processes. In the current conditions of development of nanotechnology, thin-film electronics and functional coatings, sputtering technologies (in particular, magnetron, ion-plasma, etc.) play a key role in creating high-quality films with controlled properties. One of the critical factors determining the characteristics of the final material is the state of the plasma in the discharge space.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ .....	8
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП .....	9
1 СПЕКТРОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМИ ГАЗОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ .....	10
1.1 Методи, засновані на вивченні поглинання та розсіювання випромінювання для визначення густин частинок у різних енергетичних станах.....	10
1.1.1 Емісійні методи дослідження плазми .....	11
1.1.2 Методи виміру поглинання з використанням класичних випромінювачів .....	13
1.2 Вивчення спектрів поглинання випромінювання перебудовуваних та широкосмугових лазерів .....	15
1.3 Використання спектральних методів для розрахунку концентрації збуджених атомів у плазмі газового розряду .....	18
2 ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ ПЛАЗМИ У МАГНЕТРОННИХ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ .....	20
2.1 Типи магнетронних розпилювальних систем .....	20
2.1.1 Циліндричні коаксіальні магнетронні системи .....	22
2.1.2 Магнетронні системи з планарним катодом .....	24
2.2 Різновиди магнітних систем МРС .....	24
2.2.1 МРС із збалансованим магнітним полем.....	24
2.2.2 МРС із незбалансованим магнітним полем.....	26
2.3 Особливості складу плазми магнетронного газового розряду за різних технологічних режимах. ....	31

3 ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ МАГНЕТРОННОГО РОЗРЯДУ У РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМАХ .....		34
ВИСНОВКИ.....		41
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....		42
ДОДАТОК А Відомість кваліфікаційної роботи бакалавра.....		<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>		
Додаток Б Ілюстратив.....		45

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВЧ – високочастотний

ІЧ – інфра-червоний діапазон

МРС – магнетронні розпилювальні системи

НВЧ – надвисокочастотний

НІРІМС – метод магнетронного розпилення сильноточними імпульсами

## ВСТУП

Плазма – це частково або повністю іонізований газ, де щільності позитивних і негативних зарядів близькі за величиною, а розміри області, яку вони займають, суттєво більші за відстань, на якій електричне поле окремої зарядженої частинки зникає внаслідок екранування іншими частинками, що відповідає дебаївському радіусу.

Серед методів діагностики стану плазми важливе місце посідає спектроскопія. Вона оформилася у самостійний науковий напрям, який із удосконаленням обладнання та обчислювальних засобів постійно розвивається.

Одним із завдань спектроскопії плазми в галузі технології мікроелектроніки є вивчення складу та наявності домішок у технологічному газовому середовищі, що є якісним спектральним аналізом. Для цього досліджують спектр випромінювання плазми в якомога ширшому інтервалі довжин хвиль. Вирішення такої задачі необхідне при дослідженні та оптимізації технологічних режимів роботи різних генераторів плазми в тому числі іонно-плазмових джерел, обладнання для нанесення плівок різних матеріалів та видалення шарів матеріалів методами сухого травлення.

## 1 СПЕКТРОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМИ ГАЗОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ

Плазма – це частково або повністю іонізований газ, де щільності позитивних і негативних зарядів близькі за величиною, а розміри області, яку вони займають, суттєво більші за відстань, на якій електричне поле окремої зарядженої частинки зникає внаслідок екранування іншими частинками, що відповідає дебаївському радіусу.

Серед методів діагностики стану плазми важливе місце посідає спектроскопія. Вона оформилася у самостійний науковий напрям, який із удосконаленням обладнання та обчислювальних засобів постійно розвивається.

Одним із завдань спектроскопії плазми в галузі технології мікроелектроніки є вивчення складу та наявності домішок у технологічному газовому середовищі, що є якісним спектральним аналізом. Для цього досліджують спектр випромінювання плазми в якомога ширшому інтервалі довжин хвиль. Вирішення такої задачі необхідне при дослідженні та оптимізації технологічних режимів роботи різних генераторів плазми в тому числі іонно-плазмових джерел, обладнання для нанесення плівок різних матеріалів та видалення шарів матеріалів методами сухого травлення.

### 1.1 Методи, засновані на вивченні поглинання та розсіювання випромінювання для визначення густин частинок у різних енергетичних станах

Стан плазми впливають на форму та інтенсивність випромінювання спектральної лінії, насамперед на її півширину. Якщо звернути увагу на розширення спектральних ліній випромінювання, то слід зазначити кілька факторів, що викликають цей ефект:

- доплерівське розширення за рахунок температурних ефектів;
- природне розширення лінії внаслідок згасання випромінювання;

- так званий Штарк-ефект, що враховує спільний вплив на частинку-джерело випромінювання електричних мікрополів з боку інших заряджених частинок плазми;
- так зване зеєманівське розщеплення спектральної лінії.
- Штарк-ефект у разі коли на плазму накладено зовнішнє макроскопічне електричне поле;
- внаслідок дрібномасштабних рухів плазми, що аналогічно доплерівському.

Найбільше труднощі викликає правильне опис мікроскопічних ефектів, саме штарковського розширення. Слід зазначити, що лінійний ефект Штарка з квантово-механічних уявлень [1] існує тільки для атома водню та водневих іонів ( $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$  тощо). Всім іншим атомам властивий лише квадратичний ефект Штарка.

#### 1.1.1 Емісійні методи дослідження плазми.

Основою у розвиток оптичної спектроскопії зокрема і спектроскопії плазми є емісійні методи. Ці методи експериментально не складні і полягають у вимірах інтенсивності спектрів спонтанного випромінювання.

Процеси збудження власного світіння плазми не відрізняються, зазвичай, високої селективністю навіть у нерівноважних умовах, та її емісійні спектри мають значно складну структуру, що пояснюється оптичними переходами зі збуджених станів одночасно кількох видів частинок.

Після зчитування спектра, калібрування шкали довжин хвиль та врахування спектральної чутливості детекторів виникає завдання ідентифікації ліній та їх груп щодо належності до певних частинок та їх квантових станів, відповідальних за випромінювальні переходи. При діагностиці плазми в технологіях розпилення мікроелектроніки мають справу з добре вивченими та відносно простими за структурою спектрами атомів та невеликих молекул. Оскільки енергетична структура таких частинок відома, завдання ідентифікації носить головним чином технічний характер. Однак, на практиці її вирішення потребує достатньо детальної інформації про індивідуальні особливості спектрів

частинок. Виходячи з досвіду подібних досліджень, корисним виявляється зіставлення отриманих спектрів із власними спектрами або їх фрагментами окремих частинок на вигляд. Хоча відносні інтенсивності ліній значною мірою залежать від технологічних умов у плазмі взаємне розташування сукупностей ліній та смуг спектрів, закономірності поведінки інтенсивностей часто настільки характерні, що це часто дає можливість впевненого визначення навіть за наявності великої кількості інших ліній.

Знання подібних індивідуальних оглядових спектрів дозволяє також уточнити налаштування шкали довжин хвиль і спрощує задачу ідентифікації інших фрагментів повного спектру, особливо при високій спектральній здатності.

При абсолютних вимірах інтенсивностей, зазвичай мають справу з виміром потужності випромінюваного об'єктом світла:

- спектрвимірювальний прилад дозволяє виділити повністю ізольовану спектральну лінію переходу  $u - l$ , ймовірність відповідного їй переходу відома;

- плазма є оптично тонкою;

- за умовами формування світлового потоку вхідний апертурою спектрального приладу досліджувана плазма чи її частина вважається точковим джерелом, тобто. Всі її елементи дають однаковий внесок у досліджуваний сигнал.

У цьому випадку концентрацію частинок на певному енергетичному рівні можна розрахувати, якщо світловий сигнал вимірюється в абсолютних енергетичних одиницях.

- освітлювальну оптику;

- сам спектральний прилад;

- детектор та реєструючу схему для довжини хвилі переходу.

Це здійснюється порівнянням величин сигналів від досліджуваної плазми і еталонного джерел.

### 1.1.2 Методи виміру поглинання з використанням класичних випромінювачів.

Вимірювання поглинання світла, що пройшло крізь однорідний об'єкт, дає, за певної ймовірності енергетичного переходу, абсолютну величину різниці заселеності рівнів, пов'язаних переходом  $ul$ . Це положення не пов'язане з обмеженнями за умов стаціонарності плазми і є основою різних модифікацій методу поглинання.

У разі вимірювання поглинання на тлі суцільного спектра джерело, що просвічує плазму, має суцільний спектр. Аналізуючий спектр прилад із вхідною щілиною певної ширини виділяє із суцільного спектру інтервал частот  $\Delta\nu$ , якому відповідає лінія поглинання плазми. У межах  $\Delta\nu$  інтенсивність суцільного спектра змінюється слабо і виділяється лише одна лінія, тобто  $\Delta\nu\alpha\beta > \Delta\nu$ , де  $\Delta\nu\alpha\beta$  - відстань в спектрі до найближчої сусідньої лінії поглинання.

Однак для того, щоб вимірювалося інтегральне поглинання, потрібно виконати умову  $\Delta\nu > \Delta\nu_{ul}$ , де  $\Delta\nu_{ul}$  - Напівширина поглиненої лінії. Зазвичай, ці умови можуть бути задоволені вибором відповідної ділянки спектра навіть при використанні аналізатора спектра з помірною дисперсією оптичної схеми.

Оскільки плазма випромінює світло на тому ж переході, на якому проводиться вимірювання поглинання, приймач випромінювання опромінюється одночасно плазмою та джерелом. Для того, щоб не фіксувати світло від плазми, може бути використаний прийом, коли між плазмою і джерелом, що просвічує, міститься модулятор і в системі реєстрації застосовується синхронне детектування. При цьому необхідно, щоб у діапазоні сумарних інтенсивностей характеристики приймача випромінювання та реєструючої системи були лінійними, оскільки наявність постійного підсвічування зміщує робочу точку системи.

У методі лінійного поглинання величина  $\Delta\nu$  задається не спектральним приладом, а джерелом, що просвічує, з лінійчастим спектром, який хоча б частково збігається зі спектром поглинання плазми. У такому разі спектральний прилад виділяє окремі елементи лінійного спектру джерела. Такий підхід може бути реалізований декількома способами.

В одному з них джерелом, що розвічує, є плазма, за фізичними умовами ідентична досліджуваної. У разі газорозрядних трубок такий варіант зветься методом двох трубок.

В іншому випадку одаткове джерело, що просвічує, відсутніст. Його роль виконує сама плазма. Адже, якщо плазма однорідна, то розподіленім джерелом є області, віддалені від приймача випромінювання. Відбувається самопоглинання світла.

Щоб ув'язати інтенсивності ліній випромінювання за певної оптичної щільності з коефіцієнтом поглинання, необхідно провести вимірювання при різних довжинах плазми. При використанні розрядної трубки або один з електродів виконується рухомим або влаштовується кілька пар електродів, між якими запалюється розряд.

Якщо замість джерела випромінювання за плазмою розмістити дзеркало, то уявне зображення плазми відіграє роль джерела.

Для підвищення чутливості у попередній схемі можна розмістити трубку між двома дзеркалами, одне з яких напівпрозоре (з боку реєстратора випромінювання). Вимірювання проводяться у двох режимах: при відкритому і повністю закритому дзеркалі, що відбиває.

Етот метод називається також методом атомної абсорбції і набув широкого поширення в спектральному аналізі (геологія, металургійні та хімічні виробництва, аналітика в медицині тощо). Атомно-абсорбційний спектральний комплекс орієнтовано масовий елементний аналіз. Він включає до свого складу спектральний прилад, набори джерел лінійних спектрів та атомізатор речовини (електрична піч із наскрізним оптичним каналом). Досліджувана речовина в атомізаторі знаходиться в стані термічної рівноваги і залежність концентрації атомів з поглинанням спектра джерела випромінювання попередньо калібрується. Сучасні комплекси автоматизовані та виробляються у промислових масштабах.

## 1.2 Вивчення спектрів поглинання випромінювання перебудовуваних та ширококутових лазерів

Можливості спектроскопії плазми суттєво розширилися з появою лазерів із керованою частотою генерації. Вже розроблено та реалізовано чимало методів та схем отримання лазерної генерації у широкому спектральному діапазоні.

Переваги лазерних джерел у порівнянні з традиційними у прямих вимірах поглинання. Найбільш очевидні переваги амена традиційних джерел лазерними дає при схемах прямої реєстрації зміни інтенсивності випромінювання, що проходить крізь об'єкт. У порівнянні з традиційними лазерні джерела дають помітні переваги у ряді, часто сукупних відносин. Серед них слід зазначити такі.

По-перше, у лазерах порівняно легко досягаються спектральні ширини смуг випромінювання  $\Delta\nu \leq 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ , що для оптичних систем, складених з традиційного джерела і монохроматора, представляє складне завдання У деяких випадках застосування лазерів, що перебудовуються, дозволяє взагалі відмовитися від класичних спектральних приладів. В інших випадках враховуючи модову структуру лазерного випромінювання, обмежуються застосуванням найпростіших монохроматорів для грубої фільтрації навіть у вимірах з високою спектральною роздільною здатністю.

По-друге, порівняно з класичними методами вимірювання поглинання лінійчастого спектру, використання лазерів з керованою перебудовою частоти дає можливість уніфікувати та автоматизувати вимірювання, до того ж немає необхідності підбору джерела випромінювання зі спектром, узгодженим із спектром об'єкта, що поглинає. Не потрібно враховувати поглинання власного випромінювання самим плазмовим джерелом. Як зазначалося, застосування вузькосмугового джерела саме не забезпечує істотного підвищення чутливості. Однак у лазерах мала ширина спектра поєднується з вузькою спрямованістю випромінювання, а напівпровідникових лазерах з малою апертурою, випромінювання з помітною, але дифракційної розбіжністю може бути легко виправлено коліматором. Це дозволяє застосувати багатопрхідні вимірювання, що збільшують оптичну товщину.

По-третє, велика потужність і вузька діаграма спрямованості лазерного випромінювання в багатьох випадках дозволяють не враховувати власне випромінювання плазмового об'єкта, що просвічується.

По-четверте, висока потужність випромінювання лазерів важлива при дослідженнях нестационарних об'єктів, коли спектр має бути зареєстрований короткий час при швидкому скануванні частоти. Поглинання за малий часовий інтервал можна зареєструвати, використовуючи матричні фотоприймачі, детектори із зарядним зв'язком при прийнятному відношенні сигнал/шум.

Широке розповсюдження отримала йодна лазерна спектроскопія в видимому і ІЧ діапазоні.

Може використовуватися як безперервний, і імпульсний режим роботи лазерних діодів. Лазери на основі сполук А2В6 та А3В5 працюють у ближньому ІЧ діапазоні при кімнатній температурі. Для роботи в більш довгохвильовому діапазоні призначені лазери на основі з'єднань А4В6 і вимагають для роботи нижчих температур.

Довжина хвилі перебудовується зміною струму накачування діода і стабілізацією його температури. У лазерних спектрометрах використовуються А4В6 діоди, температура підтримується в діапазоні від 60К до 90К. Для поділу лазерних мод та грубого частотного контролю використовується традиційний дифракційний монохроматор. Типовими параметрами таких приладів є:

- активна довготривала термостабілізація діода  $\sim 10^{-2}$ ;
- чутливість частоти до температури  $\sim 1 \text{ см}^{-1} \text{ К}^{-1}$ ;
- спектральна роздільна здатність  $\sim 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ .

Для підвищення спектральної роздільної здатності до  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$  використовується або додатковий оптичний канал для синхронізації електроніки, або цифровий осцилограф, що швидко діє, з програмною обробкою даних.

Слід зазначити, що для зазначеного типу спектрометра через зміну модового складу випромінювання лазерних діодів частотна перебудова є не безперервною, а шматково-безперервною. Від 1 до  $10 \text{ см}^{-1}$  Повне перекриття спектрального діапазону досягається комбінованою зміною як струму

накачування, так і робочої температури лазера.

Інтенсивність безперервного випромінювання в основному залежить від концентрації заряджених частинок і певною мірою від температури електронів (у видимій області спектра).

Багато актуальних завдань фізики плазми пов'язані з необхідністю досягнення високих щільностей енергії, наприклад, для різних технологічних додатків, а саме: накачування оптичних квантових генераторів, імпульсний фотоліз, імпульсні магнетронні розпилювальні системи. При цьому стан плазми має суттєво нестаціонарний характер. Типові часи тривалості різних фізичних процесів у подібній плазмі знаходяться в діапазоні від мілісекунд до мікросекунд. Це значно ускладнить контроль різних фізичних величин і вимагає, як правило, осцилографування сигналів з різних вимірювальних датчиків.

Зазвичай завдання створення значних щільностей енергії пов'язані з моніторингом великих значень струмів, напруг і тисків, інтенсивних світлових потоків тощо. п. Тому методи контролю нестаціонарної плазми за таких умов мають забезпечуватися низкою специфічних підходів. З іншого боку, сама плазма в умовах, коли виділення енергії в ній значно, має низку специфічних властивостей та особливостей, пов'язаних з високою температурою елементів плазми та високим ступенем іонізації (рис. 1.1).

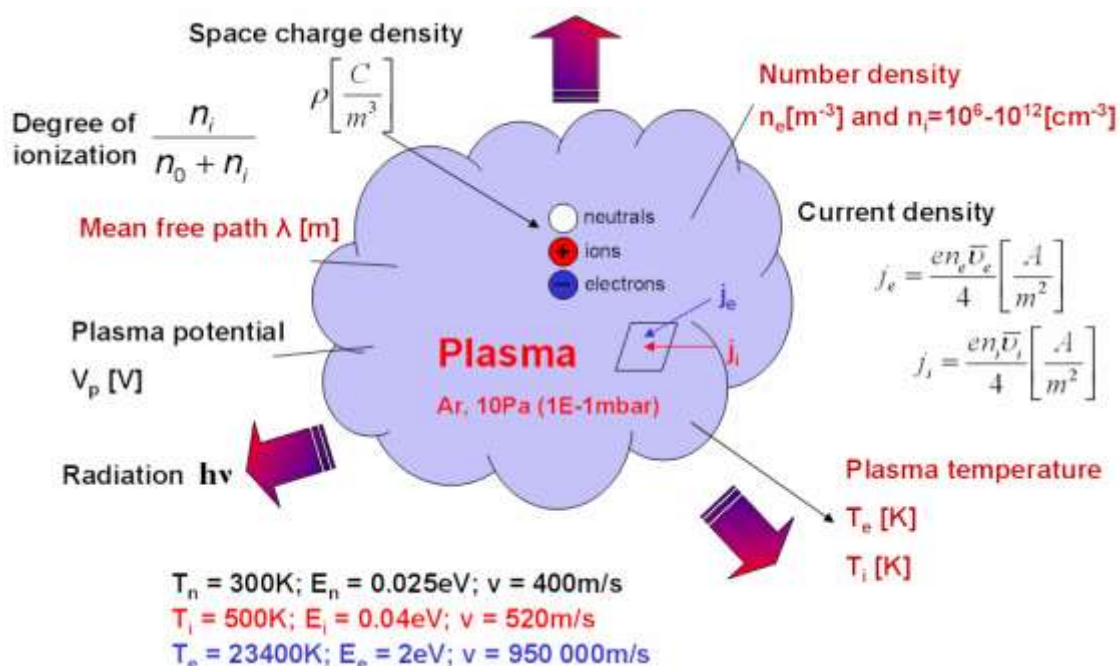


Рисунок 1.1 – Параметри плазми

### 1.3 Використання спектральних методів для розрахунку концентрації збуджених атомів у плазмі газового розряду

На процес розвитку газового розряду поряд із зарядженими частинками впливають також збуджені атоми та молекули. У низькотемпературній плазмі основний процес утворення іонів та збуджених молекул визначається співудареннями першого роду між молекулами газу та електронами з кінетичною енергією  $E \gg WKP$ , де  $WKP = W_i, W_n$  ( $W_i$ -енергія іонізації,  $W_n$ -енергія збудження  $n$ -го рівня атома). При досить велику концентрацію збуджених атомів і молекул у плазмі на швидкість заповнення збуджених станів та утворення іонів впливають як прямі процеси, так і ступінчасті. Іншими словами, іонізація або збудження на більш високий енергетичний рівень при зіткненнях з збудженими молекулами.

Причому швидкість ступінчастих процесів за певних умов може бути порівнянною або перевищувати швидкість прямих. Ступінчасті процеси збудження можуть викликати електрони з меншими енергіями ( $E \geq W_i - W_n$  або  $E \geq W_n - W_m$ , де  $W_m < W_n$ ). При максвелівському або близькому до нього розподілі електронів за енергіями кількість електронів з енергіями  $E \geq W_i - W_m$  завжди більша, ніж електронів з енергією  $E \geq W_i$ . Крім того, ефективні перерізи

взаємодії ступінчастих процесів набагато більші, ніж ефективні перерізи прямих процесів. У газовому розряді, особливо в сумішах газів і пар, присутність одних збуджених молекул може призвести до збудження або іонізації інших молекул в результаті обміну енергією при зіткненнях другого роду.

Концентрація збуджених молекул визначається декількома параметрами газового розряду та властивостями самої молекули у конкретному енергетичному стані:

- температурою;
- тиском газу чи пари;
- концентрацією та функцією розподілу електронів за енергіями;
- розмірами розрядного проміжку;
- ефективним часом життя молекули на даному енергетичному рівні;
- ефективним перетином збудження даного рівня і т.д.

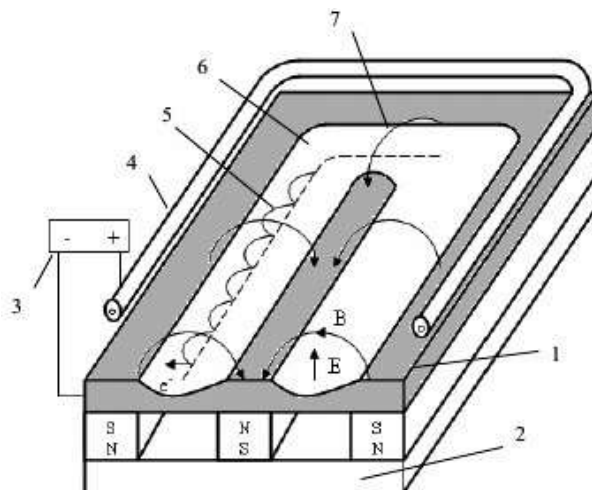
Зазвичай, у позитивному стовпі газового розряду концентрація збуджених молекул буває більшою на рівнях, які знаходяться ближче до основного стану, особливо на резонансних і метастабільних.

## 2 ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ СТВОРЕННЯ ПЛАЗМИ У МАГНЕТРОННИХ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

### 2.1 Типи магнетронних розпилювальних систем

У магнетронних розпилювальних системах розпилення матеріалу відбувається під впливом бомбардування поверхні катода-мішені іонами робочого газу, що утворюються в плазмі аномального розряду, що тліє.

Вторинні електрони, що емітуються з мішені при взаємодії іонів газу з електронними оболонками приповерхневих атомів мішені, захоплюються магнітним полем і роблять складний рух по замкнутим циклоїдальним траєкторіям в схрещених електричному і магнітному полях (рис. 2.1).



- 1 - катод-мішень; 2 – магнітна система; 3 – джерело живлення;  
 4 – анод; 5 – траєкторія руху електронів;  
 6 – зона ерозії мішені; 7 – силова лінія індукції магнітного поля

Рисунок 2.1 - Схема ортогональної магнетронної розпилювальної системи з плоским катодом

Висока щільність іонного струму і велика питома потужність, що розсіюється на мішені, досягаються за рахунок локалізації плазми біля поверхні катода. Щільність струму на два порядки вища, ніж у звичайних діодних системах катодного розпилення.

Зниження робочого тиску з одночасним збільшенням швидкості розпилення дозволяє значно підвищити чистоту плівок і позбавити їх від сторонніх домішок. Локалізація електронів у магнітній пастці поблизу мішені перешкоджає бомбардування ними підкладок, це знижує неконтрольоване зростання температури підкладки і знижує щільність радіаційних дефектів у плівках, що ростуть.

Основними перевагами магнетронних розпилювальних систем (МРС) є високі швидкості осадження матеріалів на підкладки та можливість отримання рівномірних по товщині плівок на підкладках великої площі.

Типові робочі параметри промислових магнетронних розпилювальних систем наведено у таблиці 2.1

Таблиця 2.1. – Типові параметри виробничого процесу нанесення покриттів методом магнетронного розпилення

Тиск робочого газу, Па	10-2-1
Робоча напруга,	300–700
Питома потужність на мішені, Вт/см <sup>2</sup>	≈100
Щільність іонного струму, мА/см <sup>2</sup>	200
Швидкість осадження плівок, нм/хв.	до 3600
Коефіцієнт використання матеріалу мішені, %	до 80
Однорідність по товщині нанесеної плівки, %	±1,2 і менше
Максимальні розміри підкладок, м	до 3,2 х 6

Усі магнетронні розпилювальні системи можна поділити на кілька типів. За конструкцією мішені можна виділити планарні, циліндричні, конічні.

За ступенем впливу іонів на підкладку їх ділять на збалансовані та незбалансовані.

За положенням магнітної системи щодо мішені вони можуть бути зі стаціонарною або магнітною системою, що переміщається.

За способом живлення розрядного проміжку можуть бути підключені до джерела постійного, імпульсного, змінного або високочастотного струму.

У промисловості серед систем нанесення плівок, заснованих на методі розпилення МРС набули найбільшого поширення.

Незважаючи на прогрес у розвитку магнетронних розпилювальних систем за час, що пройшов з часу їх винаходу та впровадження у виробництво, ще існує ряд завдань, що вимагають свого рішення для підвищення ефективності напилювального обладнання та зниження собівартості виробів, отриманих при його використанні.

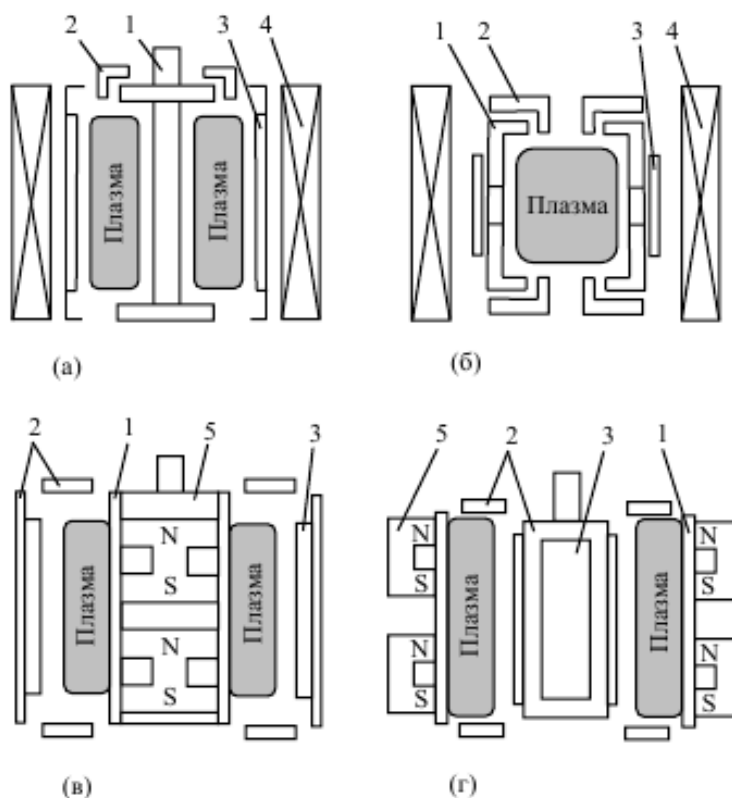
#### 2.1.1 Циліндричні коаксіальні магнетронні системи.

Спочатку для розпилення різних матеріалів у схрещених електричному та магнітному полях головним чином застосовувалися циліндричні коаксіальні конфігурації МРС нормального та інверсного типу.

На рисунку 2.2 наведено схематичні конструкції різних варіантів таких систем. Вони магнітне поле створюється або зовнішнім соленоїдом і розподілено у просторі між коаксіальними катодом і анодом, на якому закріплені підкладки, або системою постійних магнітів, які створюють локалізоване аркове магнітне поле.

У першому випадку (рис. 2.2 а б) величина магнітної індукції вибирається такою, що вона була достатньою для замикання в циклоїдальну траєкторію руху електрона поблизу поверхні катода (такий вплив магнітного поля називають замагнічуванням електронів), але недостатня для замагнічування іонів.

При запаленні газового розряду формується плазма, яка є так званою область негативного світіння тліючого розряду. У цій галузі відбуваються головним чином процеси іонізації, збудження, генерація фотонів рахунок зіткнення вторинних електронів, емітованих катодом з молекулами газу.



1 - катод-мішень; 2 – анод; 3 – підкладка; 4 – соленоїд; 5 – постійні магніти

Рисунок 2.2 – Циліндричні коаксіальні МРС

Під час бомбардування іонами газу катода-мішені відбувається процес розпилення матеріалу мішені та емісія вторинних електронів, які необхідні для самопідтримання розряду. Вторинні електрони прискорюються полем прикатодної області в бік анода, але завдяки закручує на них індукції магнітного поля запобігається бомбардування ними підкладки, а також відхід їх на анод по коротких траєкторіях.

За рахунок того, що електрони в схрещених полях рухаються замкненою циклоїдою вони багаторазово іонізують атоми газу. Магнетронний розряд характеризується високою щільністю струму при низькому тиску робочого газу та високою швидкістю розпилення матеріалу мішені.

Основним недоліком цього МРС є догляд електронів вздовж силових ліній магнітного поля в торцевій області електродів, де магнітна пастка відсутня. Це призводить до нерівномірного розпилення мішені вздовж утворює циліндра катода. Щоб позбутися цього недоліку, конструкцію МРС ускладнюють, застосовуючи на торцях катода відбивачі у вигляді дисків і плоских кілець, які

призводять до коливальних траєкторій електронів у плазмі розряду вздовж силових ліній магнітного поля в торцевих областях. тобто збільшують їхню траєкторію.

Проблему поліпшення рівномірності розпилення мішені вирішують використанням довгих соленоїдів, що формують однорідне магнітне поле, або спеціальними магнітопроводами. Ці заходи ускладнюють конструкцію, збільшують габарити, вагу, проте не вирішують завдання досягнення абсолютної рівномірності розпилення катода через догляд іонів на торці МРС.

Для усунення недоліків, властивих МРС із зовнішніми соленоїдами замість них для формування магнітного поля використовувалися постійні магніти (рис. 2.2, г), що суттєво спростило конструкцію розпилювальної системи. Постійні магніти створюють локалізоване поблизу поверхні катода поле з силовими лініями як арок. При цьому плазма розташовується біля катода, створюючи області магнітних тунелів, в яких напруженість поля має найбільшу величину. Аркова форма магнітного поля не дає можливості електронам йти на торці магнетронної системи. МРС такої конструкції забезпечують хорошу однорідність товщини плівок, що напиляються, хоча катод розпорошується нерівномірно.

### 2.1.2 Магнетронні системи з планарним катодом.

Подальший розвиток МРС пов'язане зі спрощенням конструкції розпилювачів переходом до систем з планарними та конічними катодами. Вони створювали поперечне магнітне полі з прямими силовими лініями.

У таких системах розподіл магнітного поля неоднорідно по азимуту ще й траєкторії поперечного дрейфу заряджених частинок незамкнені, тому вони йдуть на краї електродів і не беруть участь у процесах іонізації. Це ускладнює підтримку стабільного розряду за низьких тисків робочого газу.

Однак такі МРС простіше в обслуговуванні та технологія виготовлення мишей для них також простіше.

## 2.2 Різновиди магнітних систем МРС

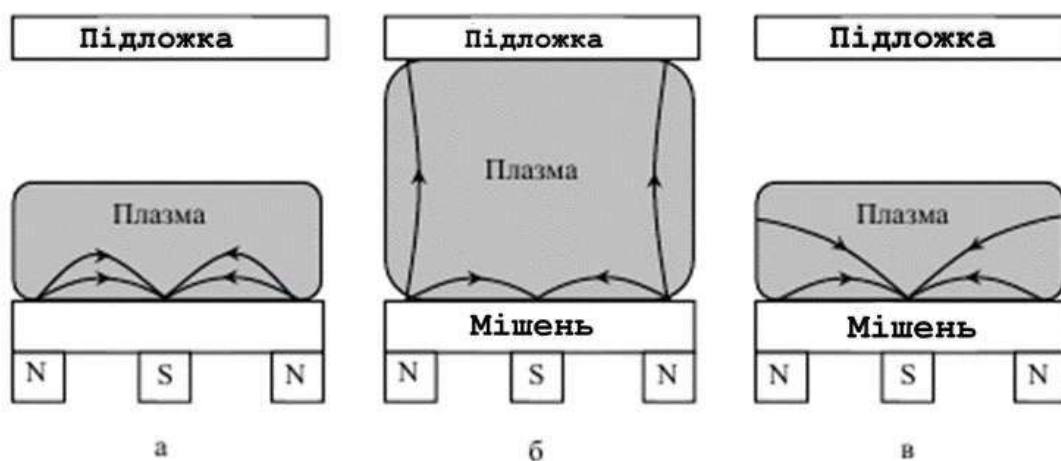
2.2.1 МРС із збалансованим магнітним полем. Подальший розвиток МРС призвело до створення систем, у яких магнітна система зі зворотного боку від

мішені доповнена магнітопроводом, що призводить до концентрації силових ліній магнітного поля із замкнутою арочною формою над поверхнею мищени. Це призводить до підвищення ефективності розпилення, оскільки у такому магнітному полі підтримується магнетронний розряд із замкнутим дрейфом електронів, тобто. вони не залишають прикатодну область беруть участь у процесах іонізації.

Замість електромагнітних котушок почали використовувати постійні магніти, що спростило конструкцію МРС.

МРС з таким розподілом магнітного поля (рис. 2.3 а), в якому силові лінії двічі проходять крізь катод від одного магнітного полюса до іншого, утворюючи петлю-арку поблизу поверхні катода, були названі збалансованими.

У таких МРС висота плазмової області становить від 3 до 6 см і притиснута до мішені. Підкладка розміщується за межами цієї області, щоб не впливати на стабільність розряду. У МРС зі збалансованою магнітною системою до неї доходить незначна кількість заряджених частинок, а переважно атоми з матеріалу мішені, що утворюють плівку.



а – збалансована магнітна система; б - незбалансована з вертикальної складової поля, спрямованої до підкладки; в – незбалансована із розсіюванням магнітного поля вздовж підкладки

Рисунок 2.3 - МРС з планарною мішенню та різними змінами магнітного поля

У збалансованих магнітних системах лотність струму іонів (в основному  $Ar^+$ ), спрямованих до підкладки, менше  $1 \text{ mA/cm}^2$ . При напрузі зміщення ( $U_{см}$ ) до  $-100$  такої величини недостатньо для проведення процесу іонного очищення поверхні підкладки і істотного впливу на структуру плівки. При збільшенні  $U_{см}$  зростають внутрішні механічні напруги в плівці, виникають дефекти в кристалічній структурі та підвищується концентрація інертного газу плівці. З цих причин МРС зі збалансованою магнітною системою набули широкого поширення в технологіях нанесення покриттів на не стійкі до температури і кінетичних впливів поверхні та структури.

### 2.2.2 МРС із незбалансованим магнітним полем.

Нанесення функціональних плівок зі спеціальними властивостями в машинобудуванні (підвищена твердість і зносостійкість) на плоскі підкладки та на вироби складної форми (інструмент для металообробки, хірургічний інструмент тощо) вимагає або мінімальної відстані між підкладкою та плазмовою областю, або підвищення щільності.

Істотно підвищити щільність іонного струму до підкладки (понад  $2 \text{ mA/cm}^2$ ) можна в МРС з об'ємним магнітним полем.

Для цього були створені МРС з незбалансованим магнітним полем, в якому частина силових ліній спрямована у бік підкладки.

У 1-му типі незбалансованої конфігурації магнітного поля силові лінії магнітного поля спрямовані вертикально до підкладки.

У такій МРС магнітне поле розподілене у поверхні мішені, а й у просторі між мішенню і підкладкою. Це дає можливість збільшити щільність іонного струму і таким чином управляти властивостями плівок, що осаджуються, додаючи їй енергію іонним бомбардуванням.

Розподіл поля такого типу показано на рис. 2.3 б де перерізи полюсів не рівноцінні: кільцевий зовнішній полюс системи створює більший магнітний потік, ніж внутрішній полюс меншого перерізу. Таким чином, магнітний потік від зовнішнього полюса в повному обсязі замикається на внутрішній полюс.

У системі 1-го типу створюються вертикальні переферійні силові лінії, спрямовані до підкладки, що збільшує потік заряджених частинок і плазми в цілому на неї.

У збалансованій МРС можна створити аналогічне поле, якщо навколо магнітної системи розмістити додаткову електромагнітну котушку з магнітним потоком, спрямованим однаково з магнітним потоком зовнішнього полюса магнітної системи.

У незбалансованих МРС плазма газового розряду мігрує вздовж силових ліній магнітного поля до підкладки, а це підвищує концентрацію заряджених частинок поблизу її поверхні. До такого результату також призводить іонізація газу у просторі між мішенню та підкладкою.

Таким чином, щільність іонного струму до підкладки може збільшитись до  $10 \text{ mA/cm}^2$  навіть без додаткової напруги зміщення на підкладці.

Як недолік слід зазначити, що розподіл концентрації заряджених частинок по поверхні підкладки відповідає розподілу магнітного поля і може бути неоднорідним, якщо підкладка нерухома щодо МРС

Для підвищення однорідності розподіленої обсягом технологічної камери плазми застосовують многополюсну магнітну систему. Сильне магнітне поле створюється лише поблизу стінок камери, усередині камери та в області розміщення підкладок поле слабке (рис. 2.4).

Джерелом плазми у такій системі є магнетрон, а зовні камера оточена додатковими постійними магнітами. Поле додаткових магнітів перешкоджає руху плазми до стін камери і виконує роль магнітної пастки для заряджених частинок плазми, але не перешкоджає вирівнюванню їх концентрації у внутрішньому просторі.



Рисунок 2.4 - MPC із магнітною ізоляцією стінок вакуумної камери

Експерименти з MPC з магнітною ізоляцією стінок показали, що щільність іонного струму до підкладки може бути величиною більше  $2 \text{ mA/cm}^2$  навіть при  $U_{\text{см}} = -60 \text{ В}$ . У таких системах підкладки можуть розташовуватися від мішені на відстань до 20 см без ослаблення форми іонного струму, що важливо для отримання покриттів на виробах складної. Неоднорідність плазми може становити приблизно 10% при робочому тиску Ar 0,5 Па.

Розглянуті типи незбалансованих MPC та властивості покриттів, створених за їх допомогою, дозволяють осаджувати плівки на поверхні великої площі та вироби складної форми. Зокрема, використовуючи їх, були отримані якісні покриття з нітриду титану, оксидів алюмінію, цирконію, ітрію і т.д.

Незбалансовані MPC з розсіюванням магнітного поля у бік від підкладки (2-й тип незбалансованої MPC) застосовують у випадках створення пористих покриттів з розвиненою поверхнею для хімічно активних плівок, каталізу, оптичних поглинаючих покриттів тощо. У цих системах внутрішній полюс створює більший магнітний потік, ніж зовнішній (рис.2.3 в).

При цьому частина силових ліній не замикаються через ціль на зовнішній полюс, а йдуть у бік від підкладки, до стін, що перешкоджає міграції плазми до підкладки і значно знижує концентрацію іонів поблизу неї.

У цьому випадку щільність струму до підкладки значно менша, ніж  $1 \text{ mA/cm}^2$ .

Вплив іонів на зростаючу плівку в другому типі незбалансованої MPC мінімально. Однак, утруднюється запалювання та стабільна підтримка розряду при низьких тисках через дифузію електронів до стінок камери.

Для керування потоком заряджених частинок до підкладки застосовують так зване магнітне зміщення. Для цього за підкладкою поміщають додатковий постійний магніт або електромагніт з полем, що збігається з полем магнетрону. Потік плазми при цьому фокусується біля підкладки. Відбувається збільшення плаваючого потенціалу та іонного струму до підкладки. При протилежному напрямку поля відбувається розфокусування плазми, знижується потенціал плавання і іонний потік.

Таким чином, магнітне усунення дає можливість керувати процесом нанесення плівок, не змінюючи режиму роботи магнетрону.

Описані MPC з незбалансованими магнітними системами розпорошують одну мету, що викликає просторову неоднорідність потоку розпиленого матеріалу.

Для підвищення однорідності потоку матеріалу використовують MPC з двома та більше магнетронами.

Найбільшого поширення набули системи з двома магнетронами, як найпростіші.

Магнетрони можуть функціонувати як незалежні модулі, і узгоджено.

Два магнетрони, розташовані поруч або навпроти один одного, синхронізовані по живленню. Там подається знакозмінна напруга, у якому кожен із магнетронів виконує по черзі роль катода і анода, але магнітні поля цих магнетронів незалежні.

Магнітне зміщення використовується в MPC з двома незбалансованими магнетронами у разі, коли вони мають протилежну полярність магнітних систем. Вони знаходяться над підкладкою, під якою знаходиться додаткова котушка магнітного зміщення. Зміною напрямку струму котушки можна регулювати

інтенсивність іонного бомбардування для кожного магнетрона та отримувати багат шарову структуру покриття. При цьому щільність іонного струму до підкладки досягає  $6 \text{ mA/cm}^2$ , а співвідношення потоку іонів до потоку атомів, що осаджуються  $\sim 20$  до 1.

У мікроелектроніці для отримання плівок високої чистоти, вільних від атомів газу, рівномірного заповнення глибоких канавок та отворів із субмікронними розмірами, необхідно, щоб процес відбувався при зниженому тиску робочого газу.

Знижений робочий тиск застосовують також у тих випадках, коли необхідно використовувати ефекти іонного бомбардування при осадженні плівок і при цьому треба зависити концентрацію іонів у плазмі біля підкладки, відповідно підвищити коефіцієнт іонізації газу та розпиленого матеріалу.

У таких випадках використовуються додаткові пристрої для іонізації газу.

Найпростіший з них полягає у застосуванні допоміжного підігрівного катода-емітуючого електрони у простір між мішенню та підкладкою.

Однак, оскільки розжарені катоди серед реакційних газів втрачають емісію, до того ж нагрівають підкладки своїм тепловим випромінюванням, бажано використовувати для іонізації газу перш за все ВЧ і НВЧ пристрою.

Найбільшого поширення набули магнетронні системи з індукційною плазмою, що складаються з ВЧ генератора з індуктором, що охоплює простір між мішенню магнетрону та підкладкою (рис. 2.5). Частота живлення індуктора становить одиниці-десятки мегагерц, зазвичай  $13,56 \text{ МГц}$

В системах такого типу досягається високий ступінь іонізації газів та розпилених частинок матеріалу, і суттєво знижується робочий тиск плазмоутворюючого газу. У МРС з індукційним іонізатором використовують як немодульоване ВЧ, і імпульсне чи низкочастотне напруга на мета магнетрону і підкладку.

Застосування імпульсної модуляції дозволяє:

- знизити теплове навантаження на підкладку;
- підвищити рівномірність розподілу газу в системі;

- підняти електронну температуру у плазмі індукційного розряду;
- збільшити іонний струм на підкладку.

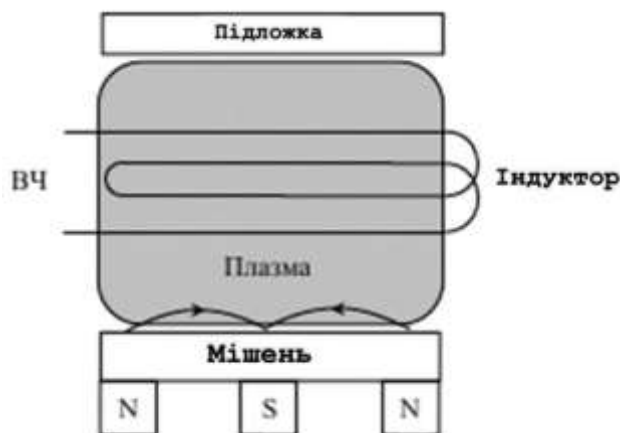


Рисунок 2.5 - МРС із додатковою ВЧ іонізацією

НВЧ розряд з електронним циклотронним резонансом також використовується для додаткової іонізації газів МРС, тому може підтримуватися при досить низьких тисках ( $<0,1$  Па), тому він також використовується для додаткової іонізації газів МРС.

2.3 Особливості складу плазми магнетронного газового розряду за різних технологічних режимах

У магнетронному розряді для збільшення щільності плазми використовуються схрещені електричне та магнітне поля, тому стан плазми, її елементний склад залежать від:

- величини та просторового розподілу магнітного поля;
- сили струму та потужності розряду;
- тиску робочого газу.

Наприклад, на рис.2.6 показано, як іонний склад плазми магнетронного розряду при розпиленні міді в атмосфері Ar при різних струмах розряду. Збільшення кількості іонів розпилюваного матеріалу в розрядному проміжку дає

можливість в межах регулювати властивості одержуваних плівок.

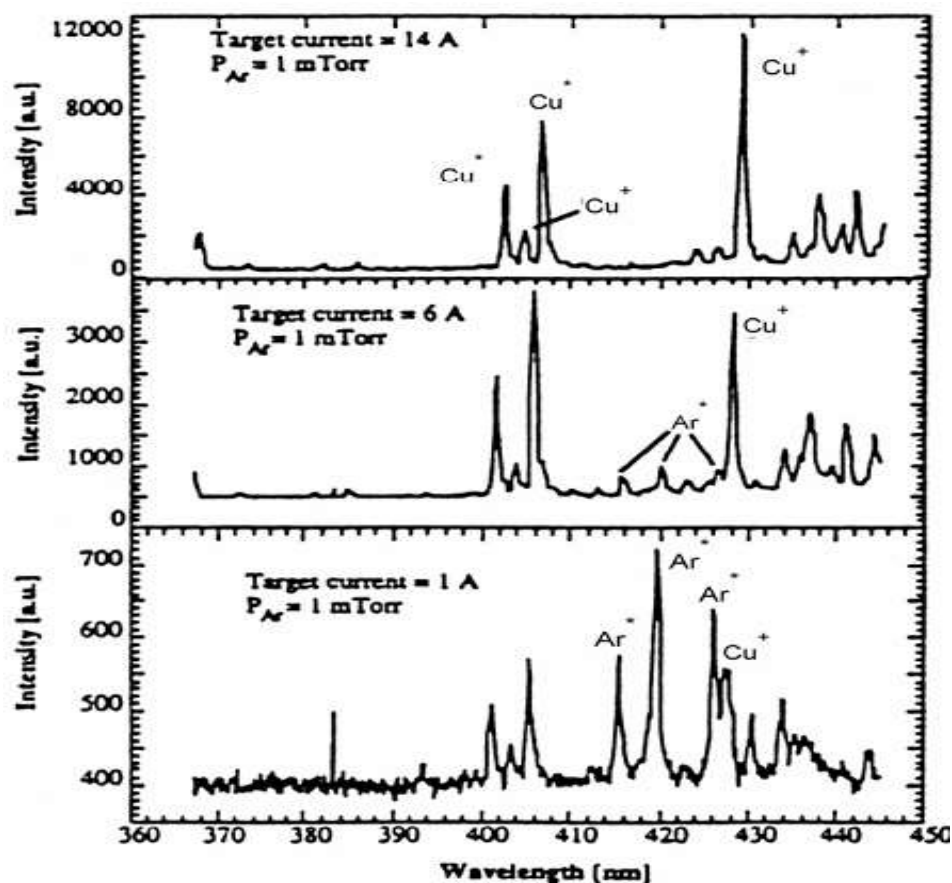


Рисунок 2.6 - Іонний склад плазми магнетронного розряду при розпиленні міді в атмосфері аргону при різних струмах розряду

Багато властивостей плівок залежать від швидкості їх осадження. Використовуючи імпульсне живлення МРС, можна збільшити швидкість розпилення без перегріву мішені або підкладки, підтримуючи постійну середню потужність розряду. Деякі матеріали мішеней чутливі до перегріву, це знижує їх ефективне розпилення на постійному струмі розряду на постійному струмі. Імпульсний режим розпилення дозволяє подолати це обмеження. Деякі характеристики магнетронного розряду залежить від інтервалу часу дії імпульсу струму. Так, у перші кілька десятків мікросекунд середня енергія електронів у розряді вище рівноважного значення, тому при живленні короткими імпульсами рівень іонізації робочого газу вищий, ніж при роботі на постійному струмі.

При граничних потужностях, що використовуються на катоді методом магнетронного розпилення сильноточними імпульсами (HIPIMS), плазма поблизу мішені досягає дуже високих щільностей  $10^{13} \dots 10^{14}$  іонів/см<sup>3</sup>, тоді як щільність плазми в традиційному розряді постійного струму становить  $10^{10}$  іонів/см<sup>3</sup>.

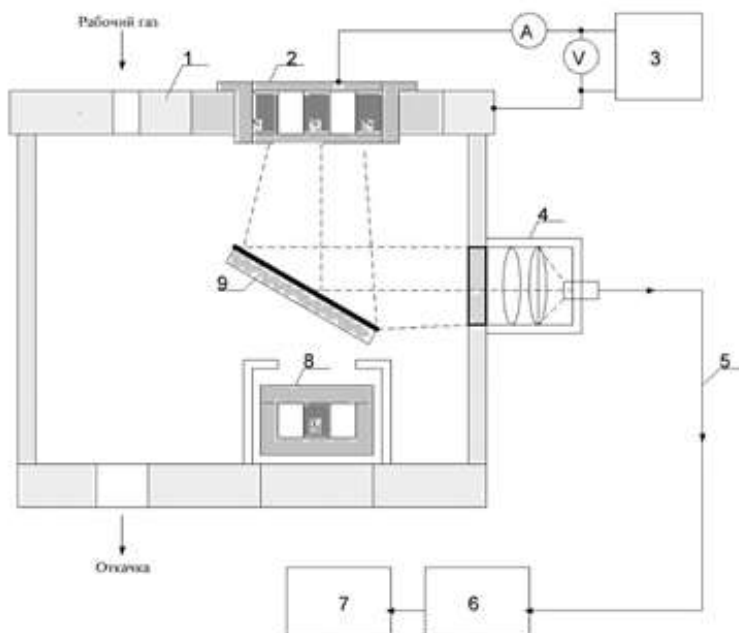
### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ МАГНЕТРОННОГО РОЗРЯДУ У РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМАХ

Дослідження проводилися на вакуумній технологічній установці типу ВУП-7, яка має у своєму складі модуль із трьома малопотужними магнетронами. Було виготовлено додатковий ковпак для вакуумної камери, де на верхній кришці встановлені три більш потужні магнетрони типу МП-3 з мішенню з міді діаметром 80 мм. Розташовані знизу камери базові магнетрони не демонтувалися і таким чином створювали конструкцію розпилювальної системи з трьома парами магнетронів, розташованих один навпроти іншого. Додатковий магнетрон призначений для розпилення міді в атмосфері аргону. Наявність магнітної системи базового магнетрону вносить незбалансованість в магнітне поле розпилюючого магнетрону, розширює область плазмоутворення і може збільшити ступінь іонізації розпиляного матеріалу мішені. При подачі негативного зміщення на підкладку це дозволяє управляти структурою плівки. Процес нанесення плівки на підкладку у цих дослідженнях не вивчався. Досліджувався спектр випромінювання плазми при розпилюванні мідної мішені та вольт-амперні характеристики розряду при трьох конфігураціях магнітного поля:

- при зустрічному розташуванні полюсов магнітних систем магнетронів;
- при послідовному розташуванні;
- при збалансованому магнітному полі розпилювального магнетрона, коли магнітна система базового магнетрону закорочувалася магнітним екраном.

Вимірювались спектри випромінювання розряду і його відповідні вольт-амперні характеристики.

Структурну схему вимірювання наведено на рис 3.1. Вимірювання проводилися при різних тисках робочого газу. В процесі досліджень спектр випромінювання плазми знімався в різних точках ВАХ розряду.



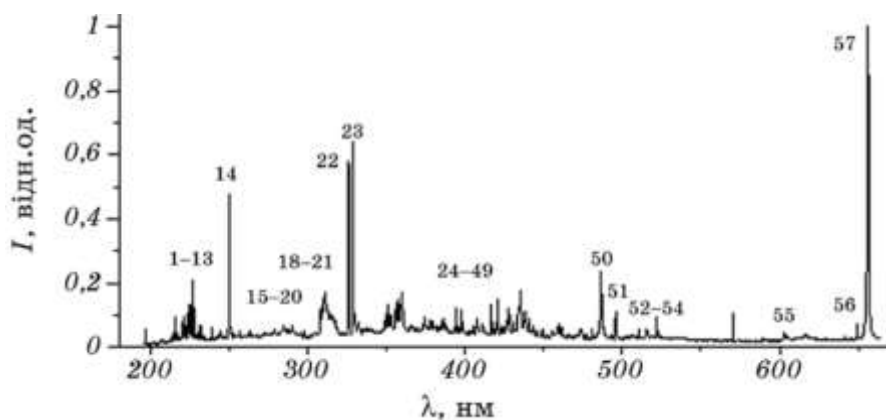
1 – вакуумна камера; 2 – магнетрон МП-3; 3 – БЖ магнетрона; 4 – оптична система; 5 – оптоволокну; 6 – спектрофотометр; 7 – ноутбук; 8 – базовий магнетрон; 9 – дзеркало

Рисунок 3.1 – Схема дослідження спектрів випромінювання плазми та вольт-амперних характеристик розряду

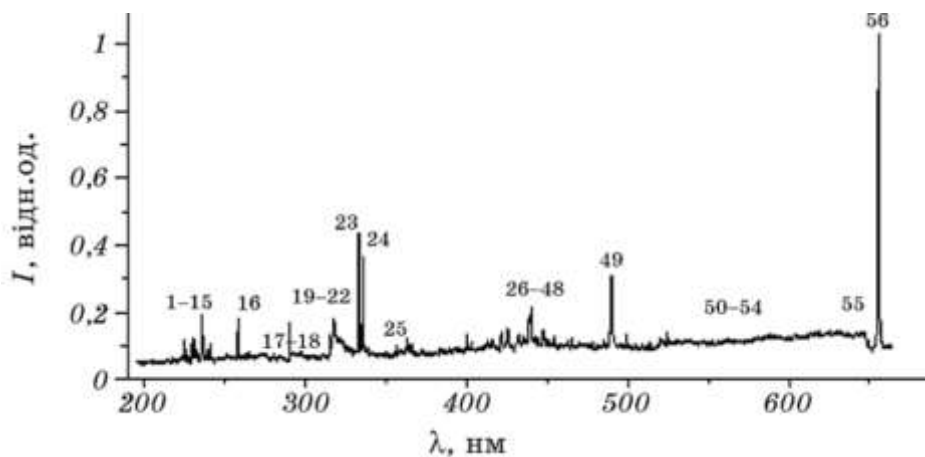
Для збільшення оптичного сигналу від плазми, по-перше, випромінювання фокусувалося на торці оптоволокна спектрофотометра лінзовою системою. По-друге, в камері між магнетронами було встановлене нахилене під кутом 45 градусів дзеркало для відбиття випромінювання плазми розпилюючого магнетрону на вхід вимірювальної оптичної системи. Перед вимірюваннями дзеркало запилювалося міддю для отримання стабільного коефіцієнту відбиття у процесі спектральних вимірювань.

У виміряних спектрах аналізувалися співвідношення інтенсивностей ліній елементів плазми магнетронного розряду, що характеризують кількість іонів аргону та міді при різних розподілах магнітного поля. Для визначення відповідності ліній випромінювання різним елементам плазми використовувалися спектри іншого типу розряду, але з тими самими елементами:

розряд в аргоні між мідними контактами. Принаймні в них присутні всі лінії елементів що представляють інтерес (рис. 3.2)



а



б

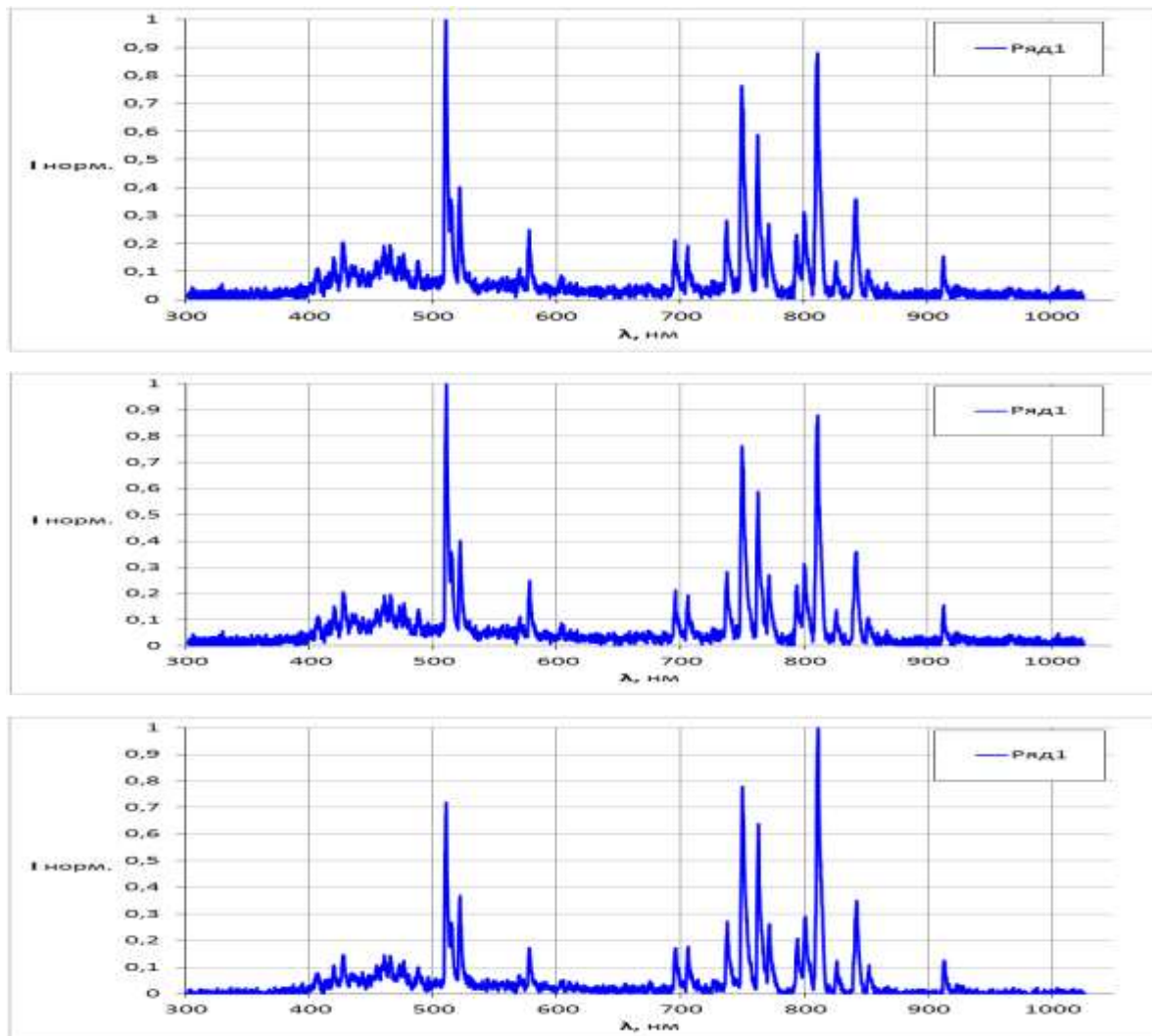
Рисунок 3.2 – Спектр випромінювання розряду між мідними електродами за міжелектродних відстаней: а -  $d = 2$  мм; б -  $7$  мм ( $p_{Ar} = 6,7$  кПа) [1]

У таблиці 3.1 наведено відповідність між спектральними лініями, показаними на рис. 3.2, довжиною хвилі та елементом плазми для ідентифікації отриманих у дослідженнях спектрів випромінювання розряду. Спектральний діапазон використаного в досліді спектрофотометра LR1 починається з 300 нм, тому частина ліній у таблиці відсутня.

Таблиця 3.1 – спектральні лінії випромінювання елементів плазми газозового розряду (згідно рис.3.2) [2]

номер лінії	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\lambda$ , нм	310,4 0	311,6 7	313,6 0	315,9 8	324,7 5	327,3 9	354,8 9	367,6 9	360,6 5	373,7 8
елемент	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Cu	Cu	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	Ar
номер лінії	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
$\lambda$ , нм	377,0 5	378,6 3	385,0 5	386,8 5	387,5 2	394,3 0	397,9 3	402,2 6	405,3 9	407,9 5
елемент	ArII	Ar	Ar	Ar	Ar	N <sub>2</sub>	Ar	Cu	Ar	Ar
номер лінії p	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
$\lambda$ , нм	411,2 8	415,8 5	420,0 6	425,9 3	427,8 1	433,3 5	435,5 0	441,6 7	442,3 8	459,6 0
елемент	Ar	Ar	Ar	Ar	N <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	Ar
номер лінії	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
$\lambda$ , нм	460,9 5	470,2 3	487,6 2	495,6 7	511,8 2	516,2 2	521,8 2	570,0 2	653,8 1	656,2 9+ 659,6 1
елемент	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Cu	Cu	Ar	H <sub><math>\alpha</math></sub> Ar <sup>+</sup>

Отримані в дослідженнях спектри при різних розподілах магнітного поля наведено на рис.3.3. Спектри нормовані відносно максимального значення у кожному вимірюванні.



: а - збалансований магнетрон; б - зустрічне включення; в - послідовне включення

Рисунок 3.3 – Спектри випромінювання розряду за різних розподілів магнітного поля

З різних шумів спектрограм видно, що максимальні значення інтенсивностей, одже й потужність розряду, відповідає випадку послідовного розташування полюсів магнітних систем. Це цілком підтверджує вигляд ВАХ, де

однаковій для різних випадків розподілу магнітного поля напрузі розряду відповідає значно більший струм.

Для з'ясування причини впливу розподілу магнітного поля і відповідно складу плазми на ВАХ розряду було знято спектри випромінювання газового розряду.

Найвищими лініями спектрів є лінії на довжині хвилі 512 нм (Ar), 522 нм (Cu), 745 нм, 760 нм, 815 нм (останні три не ідентифіковані). Співвідношення їх висот однакові у випадках збалансованої і зустрічної магнітних систем, у випадку послідовного розташування магнітних систем зменшується висота лінії 512 нм (аргон), а лінія 815 нм стає найбільшою у спектрі. У другому розділі цієї роботи показано, що зі збільшенням струму розряду щільність плазми зростає (збільшується кількість збуджених і іонізованих часток), що призводить до зростання величини окремих ліній. Можливо ця лінія відповідає появі іонів більшої зарядності і саме це призводить до збільшення струму.

Щільність струму можна збільшити або керуванням потужності джерела живлення, або стисканням перерізу розряду. Послідовна конфігурація магнітного поля створює «магнітну пастку» для заряджених часток, що не дає їм можливості вийти з розряду. Таким чином вплив розподілу магнітного поля тягне за собою збільшення щільності струму розряду.

ВАХ, що відповідають різним конфігураціям магнітних систем, наведені в таблиці 3.2 і показані на рисунку 3.4

Представлені результати вимірювання ВАХ демонструють, що додаткові магнітні системи базових магнетронів, підвищують потужність розряду при однаковій напрузі на робочому магнетроні. Послідовне включення магнітних систем призводить до збільшення потужності у півтори рази порівняно з вихідною збалансованою системою. Оскільки в процесі магнетронного наплення змінені швидкості зростання товщини плівки пропорційна зміні струму розряду, слід очікувати, що при такому взаємному розташуванні магнітних систем швидкість осадження плівок зросте в 1.5 рази.

Таблиця 3.2 – ВАХ розряду при різних конфігураціях магнітних систем магнетронів

Струм, ма	Напруга розряду,					
	Послідовні поля		Зустрічні поля		Магнітний екран	
	P = 2,3 Па	P = 3,5 Па	P = 2,3 Па	P = 3,5 Па	P = 2,3 Па	P = 3,5 Па
100	320	310	350	325	360	340
150	350	340	380	360	390	370
200	370	360	390	375	410	390
250	390	370	410	390	430	410
300	400	380	430	400	440	420

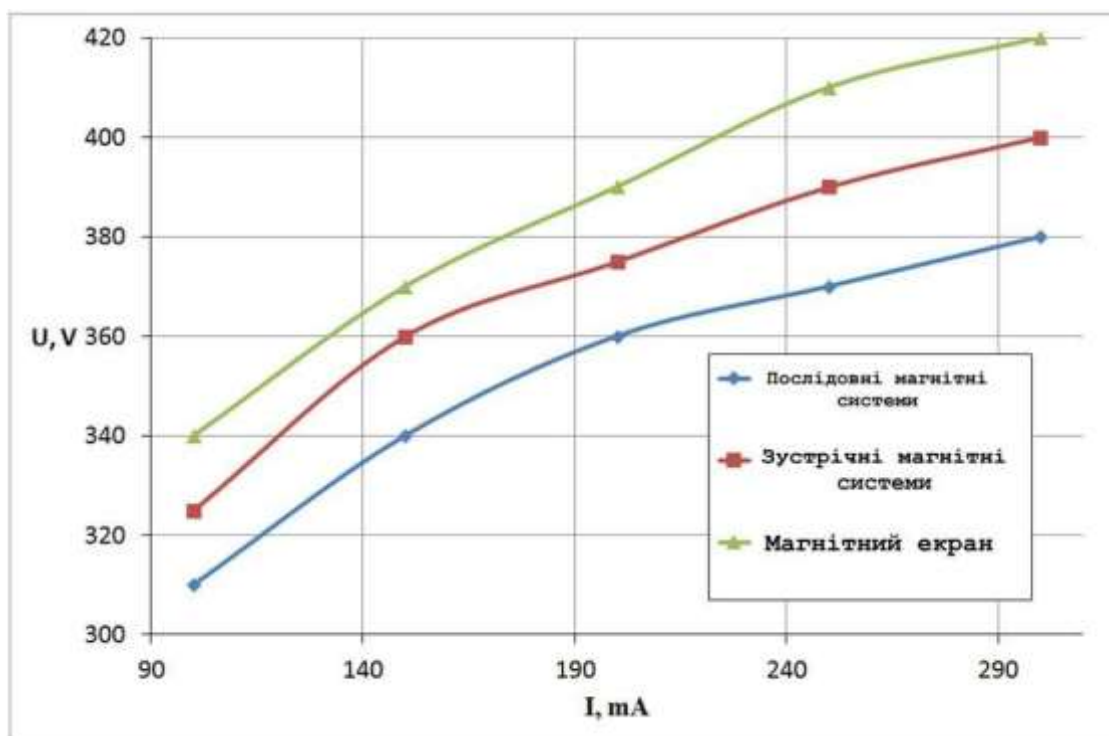


Рисунок 3.4 – ВАХ розрядів для різних розподілів магнітних полів при тиску 3,5 Па

## ВИСНОВКИ

У поданій роботі розглянуті спектральні методи діагностики плазми та зокрема газового електричного розряду, та представлена схема спектрометричної діагностики процесу магнетронного розпилення в технологічній установці ВУП 7.

У роботі проведено аналіз технологічних параметрів магнетронних розпилювальних систем, технологічних особливостей магнітних систем МРС, що використовуються для підвищення щільності плазми.

Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень спектрів випромінювання плазми газового електричного розряду в різних варіантах включення магнітних систем магнетронів вакуумної установки ВУП-7 та визначено кращі варіанти для поліпшення технологічних параметрів МРС. При послідовному включенні магнітних систем магнетронів за інших рівних умов швидкість нанесення плівки може бути збільшена в 1,5 рази.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. О. К. Шуайбов, А. О. Малініна, Р. В. Грицак, О. М. Малінін, Ю. Ю. Білак, З. Т. Гомокі, М. І. Ватрала. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ ПЕРЕНАПРУЖЕНОГО РОЗРЯДУ. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/article/v43/i12/MFiNT.43.1683.pdf> (дата звернення 26.05.2025)
2. О. К. Шуайбов, А. О. Малініна, Р. В. Грицак, О. М. Малінін, Ю. Ю. Білак, З. Т. Гомокі, М. І. Ватрала. ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ ПЕРЕНАПРУЖЕНОГО РОЗРЯДУ. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/article/v43/i12/MFiNT.43.1683.pdf> (дата звернення 26.05.2025)
3. С. Vitelaru, D. Lundin, N. Brenning, T. Minea / Plasma reactivity in high power impulse magnetron sputtering through oxygen kinetics // Applied Physics Letters. 2013, vol. (№) 103. P. 104105–104109. URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/103/10/104105> (дата звернення 26.05.2025)
4. Understanding the discharge current behavior in reactive high power impulse magnetron sputtering of oxides / M. Aiempnakit, A. Aijaz, D. Lundin et al. // J. Appl. Phys. 2013, vol. (№) 113. P. 133302–133310. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4795595> (дата звернення 26.05.2025)
5. On sheath energization and Ohmic heating in sputtering magnetrons / С. Huo1, D. Lundin, M. A. Raadu et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2013, vol. (№) 22. P. 45005–45012. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/22/4/045005> (дата звернення 26.05.2025)
6. N. Brenning, D. Lundin Alfvén's critical ionization velocity observed in high power impulse magnetron sputtering discharges // Phys. Plasmas. 2012, vol. (№) 19. P. 93505–93510. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4751863> (дата звернення 26.05.2025)

7. A. Aijaz, D. Lundin, P. Larsson, U. Helmersson / Dual-magnetron open field sputtering system for sideways deposition of thin films // Surface & Coatings Technology. 2010, vol. (№) 204. P. 2165–2169. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897210001220> (дата звернення 26.05.2025)
8. Recent advances in Modulated Pulsed Power Magnetron sputtering for surface engineering / J. Lin, W. D. Sproul, J. J. Moore et al. // JOM. 2011, vol. (№) 63. P. 48–58. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-011-0051-7> (дата звернення 26.05.2025)
9. On the film density using high power impulse magnetron sputtering / M. Samuelsson, D. Lundin, J. Jensen et al. // Surface & Coatings Technology. 2010, vol. (№) 205. P. 591–596. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897210011085> (дата звернення 26.05.2025)
10. Ion energy and mass distributions of the plasma during modulated pulse power magnetron sputtering / J. Lin, J.J. Moore, W.D. Sproul et al. // Surface & Coatings Technology. 2009, vol. (№) 203. P. 3676–3685. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209004875> (дата звернення 26.05.2025)
11. A. Anders Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering // Surface & Coatings Technology. 2011, vol. (№) 205. P. S1–S9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897210010491> (дата звернення 26.05.2025)
12. On the electron energy in the high power impulse magnetron sputtering discharge / J. T. Gudmundsson, P. Sigurjonsson, P. Larsson et al. // J. Appl. Phys. 2009, vol. (№) 105. P. 123302–123306. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3140601> (дата звернення 26.05.2025)