

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

кафедра фізичної електроніки

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри _____ Анатолій ВЕКЛИЧ

«_19_» червня 2023 р.

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему:

**«СПЕКТРОСКОПІЯ ПЛАЗМИ МАГНЕТРОННОГО РОЗРЯДУ З
ДОМІШКАМИ ПАРІВ МЕТАЛІВ »**

Виконала:

студентка 4-го курсу

денної форми навчання

спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Прикладна фізика, наноелектроніка та комп'ютерні технології»

Єханурова Тетяна Дмитрівна

Науковий керівник:

д.ф.-м.н., проф. Веклич Анатолій Миколайович

ас. Мурманцев Олександр Олександрович

Рецензент:

д.ф.-м.н., проф. Іванісік Анатолій Іванович

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри фізичної електроніки
від «15» червня 2023 р., протокол № 32.

Завідувач кафедри фізичної електроніки,

доктор фіз.-мат. наук, професор

Веклич Анатолій Миколайович

РЕФЕРАТ

Робота вміщує 19 стор., 13 рис., 1 таб., 5 джерел

СПЕКТРОСКОПІЯ, ПЛАЗМА, МАГНЕТРОННИЙ РОЗРЯД, МЕТАЛ,
МІДЬ, ТЕМПЕРАТУРА, КОНЦЕНТРАЦІЯ, ДІАГРАМА БОЛЬЦМАНА,
ЕФЕКТ ШТАРКА, ФУНКЦІЯ ФОЙГТА.

Під час роботи над цією практикою, було розглянуто більш детально плазму магнетронного розряду, магнетронне розпорощення та проаналізовано спектри. Ми отримали значення електронної температури, концентрацію електронів, та їх залежності від значень тиску, побудувавши діаграми Больцмана. Також було показано залежність Температури та концентрації від струму а тиску.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Огляд літератури	4
1.1. Застосування у медицині	4
1.2. Застосування у текстильній промисловості	6
1.3. “Діагностика плазми методом оптичної емісійної спектроскопії на аргоні та порівняння з томсонівським розсіянням”	9
2. Опис експериментальної установки	10
2.1. Формули	11
3. Результати експерименту	12
Висновки	18
Перелік посилань	19

ВСТУП

Розвиток і використання плазми магнетронного розряду зростають з кожним роком. Магнетронне розпилення - це плазмова технологія, в якій атоми інертного газу (зазвичай аргону) іонізуються та прискорюються в результаті різниці потенціалів між негативно зміщеним (з негативним потенціалом) катодом і анодом [1].

Таке розпилення дає можливість створювати та досліджувати різноманітні наноматеріали. Що відповідно дає можливість, наприклад, покращувати властивості поверхонь.

Останнім часом магнетронний розряд все частіше використовують як джерело кластерів - частинок, що складаються з невеликої кількості зв'язаних атомів. Отримані кластери можна використовувати для осадження тонких плівок або створення нових наноструктурних матеріалів. Утворення кластерів відбувається в перенасичених парах атомів металу. Ефективність цього процесу залежить від параметрів плазми, зокрема від концентрацій і температур заряджених частинок[1].

Знання властивостей електронів у плазмі (щільність і температура електронів, а також розподіл їх енергії та швидкості) є важливими для розуміння властивостей розряду. [2]

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Для огляду мною були обрані статті, які роз'яснюють процес та, на мою думку, гарно описують актуальність та доречність застосування плазми магнетронного розряду у різних сферах науки та промисловості. Також розгляд третьої статті дає краще розуміння процесу діагностики плазми методом оптичної емісії.

1.1. Оптична спектроскопія для характеристики процесу напилення[]

Дана стаття варта уваги, адже вона включає в себе огляд різних методів оптичної спектроскопії, які представляють певний інтерес для визначення характеристик магнетронного розряду. В ній я більше брала до розгляду узагальнену інформацію, для покращення розуміння актуальності та доречності оптичної спектроскопії .

Автор обговорює різні методи оптичної спектроскопії, включаючи оптичну емісійну спектроскопію (OES) і спектроскопію лазерного пробою (LIBS), підкреслюючи їх можливості в аналізі випромінювання плазми та елементного складу розпиленних матеріалів.

Ефективне магнетронне напилення є вирішальним технологічним рішенням для сучасної промисловості покриттів. Через це процеси напилення вимагають глибокої характеристики для розуміння їх фундаментальних властивостей і фізичної поведінки, які важливі для подальшого вдосконалення процесу. Оскільки ключовим моментом будь-якого процесу напилення є транспортування матеріалу з однієї поверхні (катода) на іншу (плівку), правильне визначення основних параметрів плазми, таких як середня енергія та потік розпиленних і реактивних частинок, їх температура, велике значення має щільність числа, розподіл швидкостей, а також щільність і енергія електронів плазми.

Основним предметом діагностики є дослідження основних параметрів розряду. У випадку магнетронного напилення діагностика є складним завданням, оскільки громіздкі та/або інтрузивні діагностичні інструменти, такі як Ленгмюр і іонні зонди, датчики тепла, а також головки мас-спектрометрів часто можуть зазнавати впливу плазми (наприклад,

магнітного поля у випадку зондів Ленгмюра) або самі по собі збурювати плазму, що впливає на чистоту експерименту.

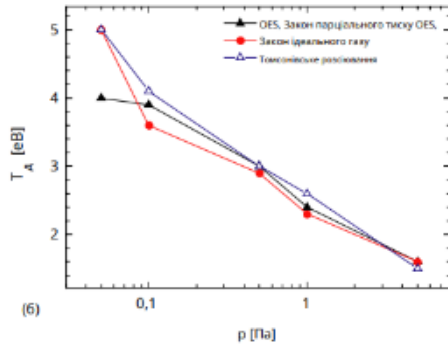
У статті розглянуто різні методи дослідження плазми, а саме:

1. Пасивні оптичні методи
 - a. Оптична емісійна спектроскопія
 - b. Інтерферометрія
2. Активні оптичні методи
 - a. Атомно-абсорбційна спектроскопія
 - b. Лазерно-індукована флуоресценція

Оптичні методи діагностики традиційно поділяються на пасивні та активні як було згадано вище. Перші використовують світло, спонтанно випромінюване атомами та/або молекулами, які зазвичай збуджуються електронами плазми, тоді як останні покладаються на зовнішні джерела світла. Обидві групи мають свої переваги та недоліки, і обидві широко використовувалися для характеристики магнетронного розряду протягом попередніх десятиліть

1.2. Діагностика плазми методом оптичної емісійної спектроскопії на аргоні та порівняння за Томсонівським розсіюванням

Ця стаття була розглянута мною через схожість з моєю роботою, можна порівнювати результати адже автор досліджує ті самі залежності що мають місце у моїй роботі. Як приклад цього можна взяти графік залежності температури від тиску.



Хоча й досліди які у своїй роботі проводить Крінтеа значно детальніші та складніші за ті що проводитиму я при виконанні даної роботи, їх варто розглянути для більш широкого розуміння процесу обробки даних та виведення різноманітних залежностей. Автори досліджують такі параметри як відносний внесок кінетичних процесів у заселення метастабільних рівнів, рівні резонансу та депопуляції метастабільних та резонансних станів.

З приводу схожості методів дослідження Крінтеа виявлено ідеальний збіг параметрів плазми, отриманих за допомогою OES і TS. Однак це досягається лише врахуванням збіднення густини нейтрального газу тиском електронів. Відхилення спостерігаються при найменшому тиску $P=0.05$ Па, коли температура електронів значно занижена. Це пояснюється переходом дифузійного режиму, передбаченого в моделі, до втрати метастабілей від вільного падіння.

1.3. Застосування у медицині [3]

У даній статті розглядається модифікація властивостей поверхні медичних імплантатів за допомогою напилення наноплівок. Це дає змогу покращити їх хімічні, біологічні та фізичні властивості.

Біокерамічне покриття покращує біосумісність, остеointegraцію, підвищують стійкість до корозії та мікробів, також використовуються для поступової та контрольованої доставки медикаментів.

Існують різні типи нанесення таких покриттів:

- Електрохімічне осадження

- Електрофоретичне осадження
- Радіочастотне магнетронне напилення
- Плазмове електролітичне окиснення

Ми більш детально будемо розглядати нанесення покриттів радіочастотним магнетронним напиленням. Найчастіше для імплантатів обирають різноманітні сплави Ті, але для покращення біологічних характеристик до нього додають біокерамічне покриття. РЧ магнетронне розпилення має унікальну здатність наносити біокерамічні шари для отримання композитних покриттів за один крок, а також їх можна використовувати як наступний етап після будь-якої іншої техніки покриття.

У недавніх дослідженнях було використано магнетронне розпилення для отримання різних кристалічних фаз TiO_2 на титанових підкладках (CrTi). Осадження TiO_2 на титанових підкладках за допомогою рч магнетронного напилення дало шар товщиною 312-338 нм, що не має впливу на адаптацію протеза, оскільки розрив 150 нм задовольняє затвержені клінічні межі.

За допомогою РЧ магнетронного розпилення також наносять багатошарові плівки, нанесений тришарове ($HAp/Al_2O_3/TiO_2$) тонкоплівкове покриття на підкладках зі сплаву Ті. Наявність тимчасового Al_2O_3/TiO_2 шари сприяють покращенню адгезії покриття HAp до основи. Як наслідок, шари HAp займали важливе місце в біосумісності поверхні, тоді як проміжні Al_2O_3/TiO_2 шари були використані для покращення адгезії покриття HAp до підкладки разом із схильністю підкладки до корозії. Підвищена пористість пов'язана з посиленою остеointegraцією, дозволяючи кістці вросати в покриття, що призводить до механічного блокування (як показано на малюнку 8). За допомогою радіочастотного магнетронного розпилення ефективно створено стовпчасті покриття ГК на підкладці UNS S31254 (MS). Покриття HA , виготовлені на SS254 магнетронним напиленням, дали покращені характеристики поверхні, адгезію, а також біосумісність покриттів HA , врожайність. Розроблений шар добре підходить для можливого застосування ортопедичних імплантатів завдяки підвищеній біоактивності, що сприяє кращій остеointegraції (рис. 1).

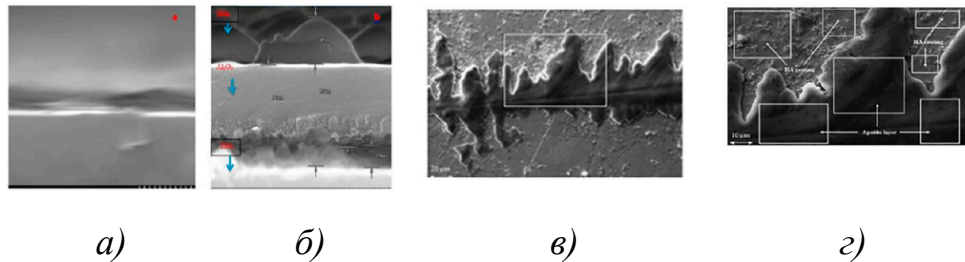


рис.1 || SEM зображення поперечного перерізу а) - оригінальних сплавів Ti-6Al-4V та б) - тришарової тонкої плівки (HAp/Al₂O₃/TiO₂). в), г) - SEM мікрофотографії зразка, покритого HA, після випробування зануренням при а) 1000x та б) 2500x. [1]

Автор дійшов до висновку що магнетронне розпилення є одним з кращих методів для налаштування поверхні імплантату з відносно високою термічною, механічною та хімічною стабільністю. Нанесене покриття через магнетронне напилення може забезпечити кращу зносостійкість і стійкість до корозії порівняно з іншими аналогами. Справжньою проблемою в процесі нанесення покриття є створення поверхні з хорошою адгезією, міцністю, змочуваністю, хімічною структурою, топографією поверхні, зносостійкістю, електрохімічною стабільністю, антибактеріальними властивостями та незначною цитотоксичністю. Для будь-якого процесу нанесення покриття досить складно виконати всі вимоги.

1.4. Застосування у текстильній промисловості [4]

Протягом останніх 15 років дослідження тканин з покриттям методом магнетронного розпилення були в основному зосереджені на електромагнітному екрануванні, стійкості до бактерій, гідрофільних і гідрофобних властивостях, структурному кольорі тощо. Цей метод має перевагу через те, що він дає змогу контролювати товщину плівки, має гарну чистоту, високу швидкість за достатньо низьких температур, сприятливу адгезію, доволі екологічний та простий в експлуатації.

Застосування тканин покритих наноплівкою дуже широке.

Наприклад:

1. Нанесення металевих плівок наділяє тканини та волокна антибактеріальними, антистатичними, анти-ультрафіолетовими властивостями, електропровідністю та електромагнітним екрануванням тощо. Металізовані тканини можна використовувати для медичних матеріалів,

матеріалів проти прослуховування, декоративних матеріалів, матеріалів, що відбивають радари, військових наметів тощо.

2. Осадження оксиду металу на поверхні тканин може надати їм антибактеріальні та антистатичні властивості, покращити чутливість до газу, стійкість до ультрафіолету, електромагнітне екранування, електропровідність.
3. Полімерні наноплівки надають тканинам такі властивості як уф та водонепроникність.
4. Також існують варіанти наплення багат шарових наноплівок, це дає змогу комбінувати та підсилювати необхідні характеристики.

В статті розглянуто кожен з прикладів більш детально. Але для теми моєї роботи доречніше більш детально розглянути доречність використання наплення металевих плівок, із матеріалів статті до уваги взято наноплівки з Cu, Ag, Ti, Al.

Тканини з мідним покриттям мають відмінне електромагнітне екранування, електропровідність, стійкість до ультрафіолету та антибактеріальні властивості. Проте таке покриття діє лише на декілька видів бактерій таких як золотистий стафілокок та кишкова паличка.

Що до властивості електромагнітного екранування то, чим менша пористість тканини, тим кращий ефект електромагнітного екранування. Щоб зменшити пористість тканини, бавовняну тканину з великою пористістю спочатку покривали полівініловим спиртом, потім Cu або Ti наплювали на оброблені тканинні підкладки відповідно. Схема виготовлення бавовняної тканини, просоченої ПВС, методом прокладки та наплення наведена на рис.2. Результати показали, що електропровідність і властивості електромагнітного екранування були покращені, а ефективність електромагнітного екранування зразків із покриттям Cu досягає 30 дБ у діапазоні частот від 300 кГц до 1,8 ГГц.

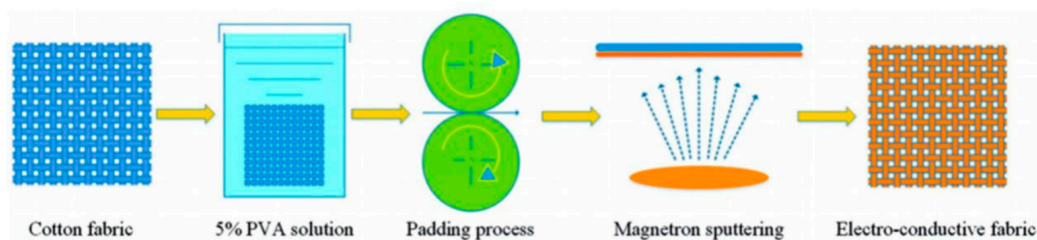


рис 2. || Схема приготування бавовняної тканини, просоченої ПВС, методом прокладки та наплення. [2]

Коли плівка Cu, нанесена на тканину, досягає певної товщини, вона також починає краще працювати в аспектах інфрачервоного та ультрафіолетового екранування. Плівка Cu товщиною 200 нм була нанесена на бавовняну тканину за технологією магнетронного напилення. Було виявлено, що зразки тканини з покриттям Cu мали коефіцієнт відбиття інфрачервоного випромінювання 20–30%, коефіцієнт випромінювання інфрачервоного випромінювання близько 0,7 і значення UPF 273. Таким чином, зразки тканини з покриттям Cu забезпечують чудовий захист від ультрафіолетового випромінювання та гарне інфрачервоне екранування, що робить їх перспективними матеріалами для текстильних виробів із захистом від сонячного світла.

Квадратний опір наноплівок Ag, нанесених магнетронним напиленням, може досягати порядків $10^{-2} \Omega$, ефективність екранування досягає 60–80 дБ. Таким чином, тканина з плівковим покриттям Ag може надати текстилю відмінні властивості електромагнітного екранування та електропровідності. Ag також широко використовується для виготовлення антибактеріальних тканин. Перед розпиленням попередня обробка низькотемпературною плазмою може ефективно покращити адгезію плівок.

Тканини із титановим покриттям характеризуються легкою вагою, високою міцністю та біологічною сумісністю. Крім того, добре відомо, що метал Ti не викликає алергічної реакції на шкірі людини.

Метал Al має сприятливі фізико-хімічні властивості, такі як стійкість до корозії, теплопровідність та електропровідність тощо.

Властивості решти типів плівок та найпоширеніші матеріали гарно описано у таб. 1:

1	Cu, Ag, Ti, Al, Ni, TiO ₂ , ZnO, WO ₃ , BzO ₅ , Al ₂ O ₃ , ITO, AZO тощо.	Електромагнітне екранування, антистатичні, провідні властивості	Ефективність електромагнітного екранування, заряд поверхнева щільність, електропровідність, питомий опір, квадратний опір
2	Cu, Ag, Ti, Al, Ni, Pt, TiO ₂ , ZnO, MgO, ITO, AZO, PTFE тощо.	Анти-УФ, анти-ІЧ властивості	значення UPF (фактор захисту від ультрафіолету), інфрачервона відбивна здатність
3	Cu, Ag, Zn, Ti, TiO ₂ , Pt, ZnO, MgO, CuO, латунь тощо.	Антибактеріальна властивість	Бактеріостатична швидкість
4	Ni, Al, TiO ₂ , PTFE, TiN, SiO ₂ і т.д.	Гідрофобний і гідрофільний властивості	Статичний контактний кут, поверхнева вільна енергія
5	TiO ₂ , ZnO, MgO, SnO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ і т.д.	Адсорбований газ або газова чутливість властивості	Питомий опір, електропровідність
6	Ti, Al, TiO ₂ , WO ₃ , SiO ₂ , SnO ₂ , TiN та ін.	Структурний колірний ефект	Коефіцієнт відбивання, пропускання, показник заломлення
7	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , LaB ₆ і т.д.	Термостійкість або тепло	Термостабільність, Теплоізоляція коефіцієнт, Теплопровідність
8	Cu, Ag, Pt	Покращена стійкість до фарбування	Світлостійкість, стійкість до прання

Таб.1 || Загальні матеріали та функції мішеней, а також характерні методи магнетронного напилення тканин з покриттям. [2]

1.5. “Діагностика плазми методом оптичної емісійної спектроскопії на аргоні та порівняння з томсонівським розсіянням” [3]

Дослідження, описані в цій статті, зосереджені переважно на порівнянні діагностики, томсонівського розсіяння (ТР) та оптичної емісійної спектроскопії (ОЕС) і лише меншою мірою на вивченні фізики розряду нейтральної петлі(РНЛ). Тим не менш, отримані результати дають цікаве уявлення про основні параметри. Зокрема, за допомогою моделі зіткнення - випромінювання (МЗВ) можна отримати досить глибоке розуміння кінетики електроннонейтрального збудження та механізму іонізації.

Техніка емісійної спектроскопії базується на вимірюванні певних співвідношень ліній в аргоні та МЗВ, із включенням метастабільного транспорту. Дослідження проводяться в планарному індуктивно пов'язаному РНП у широкому діапазоні тисків, $p = 0.05 \text{ Па} - 5 \text{ Па}$. Цей розряд є новим слабко намагніченим джерелом радіочастотної (РЧ) плазми, запропонованим для плазмового перероблення. РНП працює в чистому аргоні з частотою $f = 13.56 \text{ МГц}$ і потужністю $P = 1 \text{ кВт}$ і 2 кВт .

Спектри випромінювання НП записуються в широкому діапазоні довжин хвиль $400 - 900 \text{ нм}$ і охоплюють усі експериментальні умови, розглянуті в дослідженні (застосована радіочастотна потужність $P = 1 \text{ кВт}$, $1,5 \text{ кВт}$ і 2 кВт при частоті $f = 13.56 \text{ МГц}$, тиск аргону $p = 0.05 \text{ Па}$, $0,1 \text{ Па}$, $0,5 \text{ Па}$, 1 Па і 5 Па). Спектри в основному складаються з нейтральних ліній аргону в червоній/ближній інфрачервоній області спектру $690 - 900 \text{ нм}$. Випромінювання між 400 нм і 650 нм включає спектральні лінії однократно іонізованих атомів Ar . Їх інтенсивність низька порівняно з лініями, що випромінюються в червоній/ближній інфрачервоній області, і ними можна знехтувати, оскільки їхній внесок у загальну потужність випромінювання низький. При підвищенні тиску цей викид зменшується. Однак у видимій частині спектру ці лінії призводять до значного переходу кольору розряду від червоного до синього при зниженні тиску.

2. Опис експериментальної установки [4]

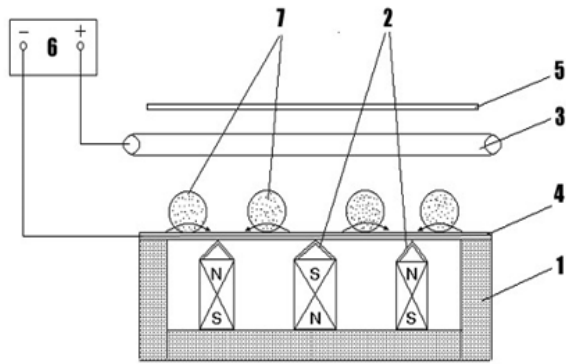


Рис.3 || Поперечний переріз системи магнетронного напилення [4]

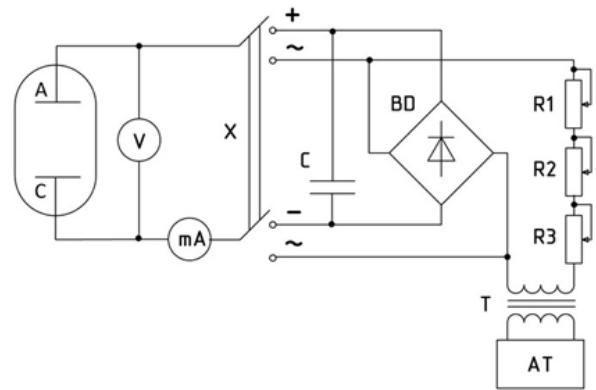


Рис.4 || Принципова схема блоку живлення. [4]

Усі дослідження проводились за допомогою системи магнетронного розпилення (рис. 3), побудованої на основі 72 мм планарного масляно охолоджуваного катода (1) з двома зонами ерозії, що визначаються вбудованими постійними самарій-кобальтовими магнітами (2) і масло охолоджуванним анодом (3) з мідної трубки, розташованим на відстані 15 мм від катода. Катод і анод були встановлені в камері промислової вакуумної установки «ВУП-5». Металеві мішені (4) Cu і Ni розміщувалися на поверхні катода і грали роль джерел матеріалів для розпилення. Також був спеціальний металевий екран (5) для зменшення розпилення на скляні стінки камери.

Блок живлення (6) магнетронного розряду (7) здійснювалося зовнішньою установкою (рис. 4), що складалася з регульованого трансформатора напруги (АТ), підвищувального трансформатора напруги (Т), комплекту змінних баластних резисторів (R1 - R2 - R3), випрямна схема (BD-C) і перемикач режимів змінного/постійного струму (X). Існували також міліамперметр (mA) і вольтметр (V) для контролю струму розряду і падіння напруги відповідно.

Магнетронний розряд досліджувався в атмосфері аргону (Ar) при тисках 1×10^{-1} , 5×10^{-3} , 1×10^{-2} Torr в режимі постійного струму. Тиск залишкових газів у вакуумній камері підтримувався на рівні приблизно 5×10^{-5} Torr насосною системою вакуумної установки, яка складалася з резервного вакуумного насоса та масляно-дифузійного насоса, і контролювалася іонізацією та термодинамічними манометрами, останні також використовувалися для контролю тиску Ar під час досліджень. Ar вводили у вакуумну камеру за допомогою редукційного клапана та впускного голчастого клапана.

Дослідження емісії під час роботи магнетронного розряду проводили методом оптичної емісійної спектроскопії. Спектрометр Solar LS SDH-IV використовували для реєстрації спектрів випромінювання плазми мідь/аргон. Температури заселення енергетичних рівнів металів і атомів аргону проводили методом графіків Больцмана на основі спектральних ліній металу та аргону.

2.1. Формули

Для визначення температури можна скористатися

$$\ln\left(\frac{I_i \lambda_i}{A_i g_i}\right) = -\frac{E_i}{k_B T} \quad (1)$$

де I_i , λ_i , A_i , g_i та E_i – інтенсивність випромінювання відповідної спектральної лінії, її довжина хвилі, ймовірність переходу на верхній рівень, статистична вага та енергія верхнього рівня відповідно. k_B - стала Больцмана, T – температура.

Електронна концентрація: такої плазми визначали за FWHM (повна ширина на половині максимуму) спектральної лінії $H\alpha$, розширеної за лінійним ефектом Штарка. Залежність концентрації електронів від FWHM для цієї лінії виражається так [6]:

$$N_e [m^{-3}] = 10^{23} \times \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{HM}}}{0,346}\right), \quad (2)$$

де w_s - ширина Штарка спектральної лінії.

3. Результати експерименту

Було знято емісійні спектри випромінювання плазми магнетронного розряду між нікелевими катодами (рис.5)

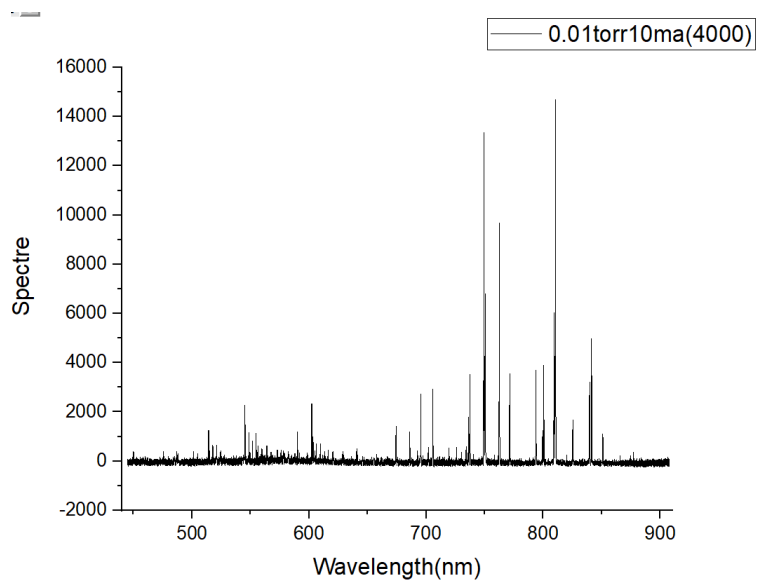


Рис.5 || Спектр плазми магнетронного розряду в умовах тиску 0.01 Torr і струму 10 мА

Аби визначити до якого елемента відноситься яка спектральна лінія була використана база NIST [5]. Отримані звідти дані, наклали на наш спектр.

Отримали такий результат як на рис.6.

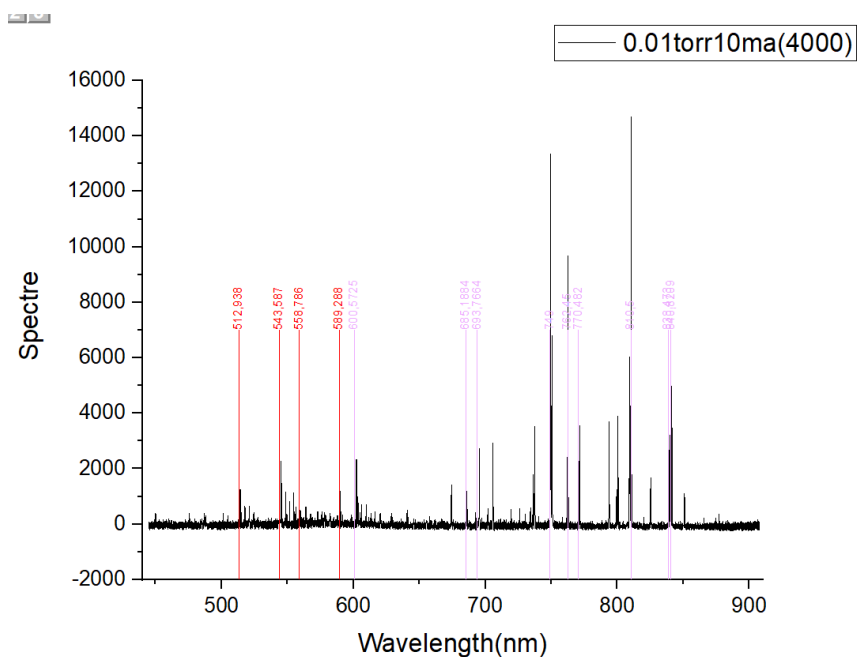


Рис.6 || Спектральні лінії (фіолетовий - Ar I, червоний Ni I)

Після цього ми апроксимували основні лінії нікелю функцією Фойгта. Значення гаусової ширини брали за апаратну функцію спектрометра, а лоренцівську ширину приймали за ширину штарківського розширення.

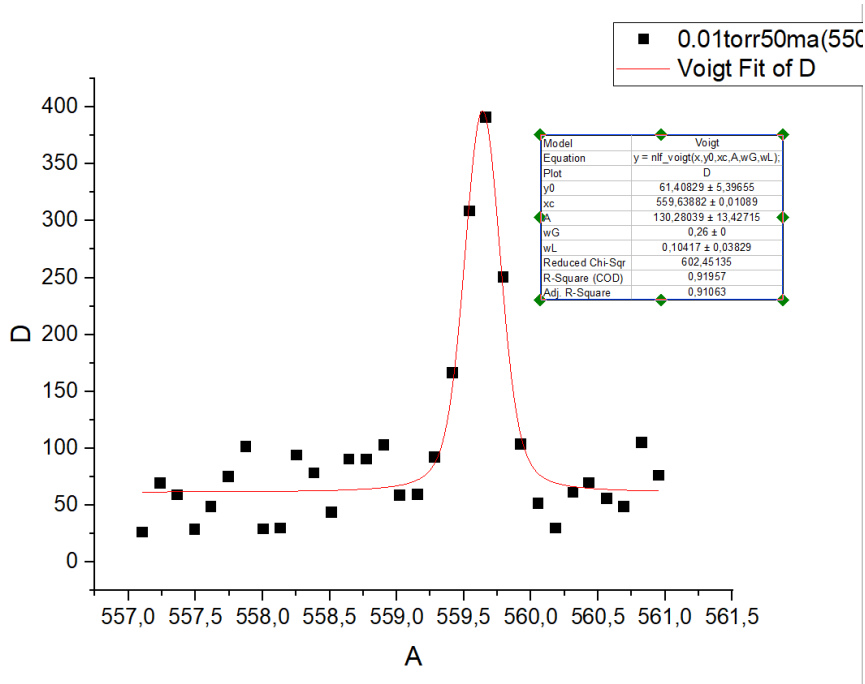


Рис.7 || Приклад апроксимації функцією Фойгта спектральної лінії, що відповідає довжині хвилі 559 нм. У випадку тиску 0.01 Torr та при струмі 50 мА.

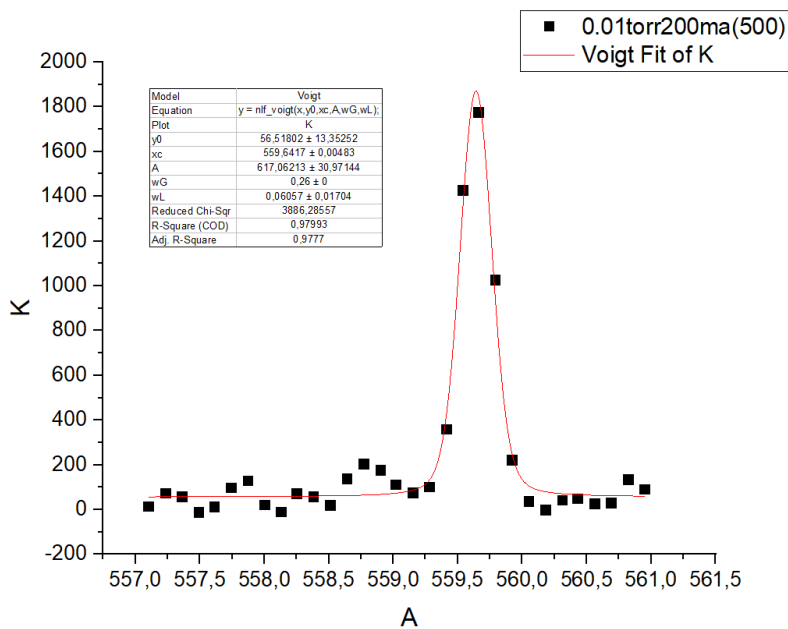


Рис.8 || Апроксимація функцією Фойгта спектральної лінії, що відповідає довжині хвилі 559 нм. У випадку тиску 0.01 Torr та при струмі 200 мА.

Де λ , w_G , w_L , N_e , I – довжина хвилі, нм, гаусова ширина спектральної лінії, нм, лоренцівська ширина спектральної лінії, нм, електронна концентрація, m^{-3} , та інтенсивність випромінювання плазми, ум.од, відповідно. Аналогічні апроксимації було зроблено для решти спектральних ліній нікелю.

Після цього за допомогою метода діаграм Больцмана знаходимо температуру. Температуру визначаємо за допомогою лінійної апроксимації (рис.9).

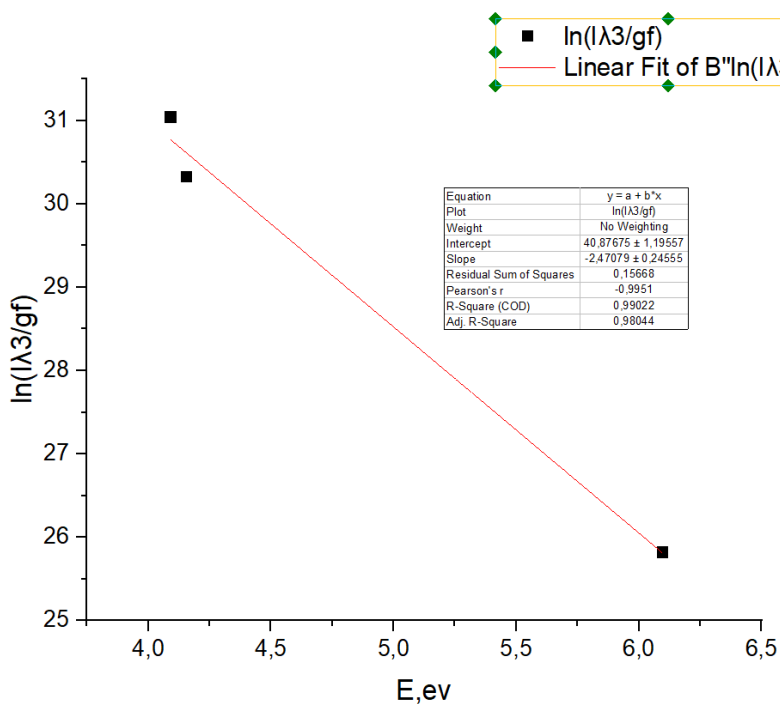


Рис.9 || Діаграма Больцмана

Аналогічно робимо і для спектрів з іншими значеннями тиску та струму.

Та будемо залежність температури від тиску

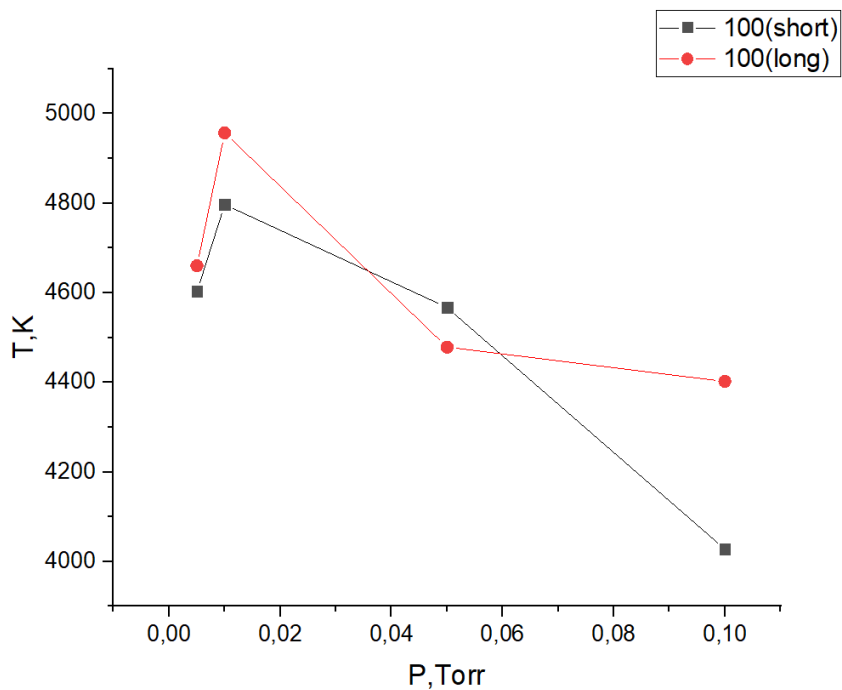


Рис.10 || Залежність температури нікелю від тиску для випадку сталого струму 100 мА. Червоний - довга витримка, чорний - коротка.

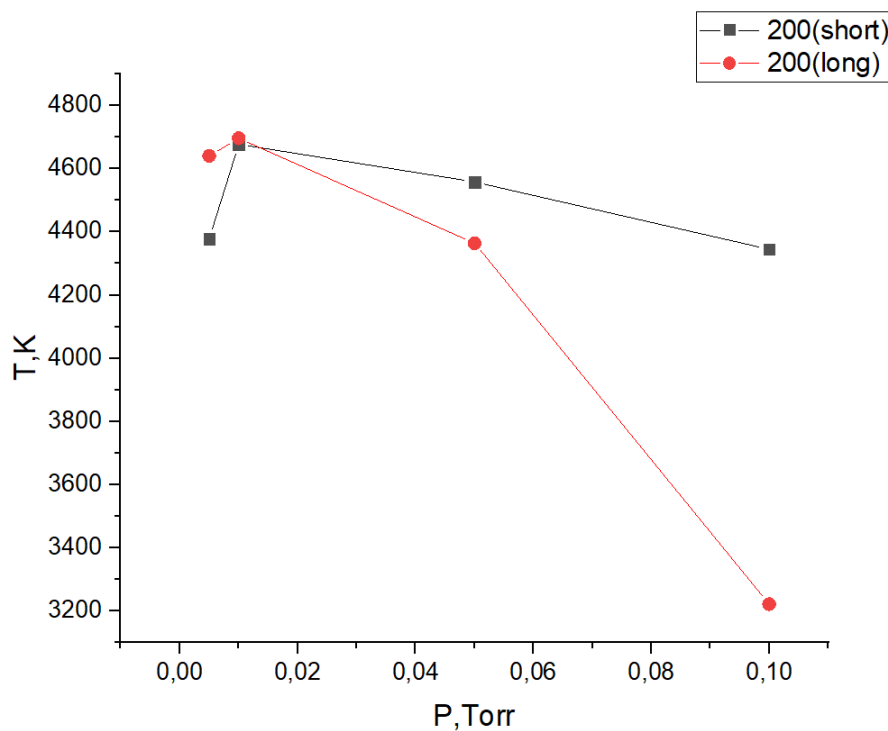


Рис.11 || Залежність температури нікелю від тиску для випадку сталого струму 200 мА. Червоний - довга витримка, чорний - коротка.

Також ми розглянули випадки коли тиск лишався той самий але зміниться сила струму.

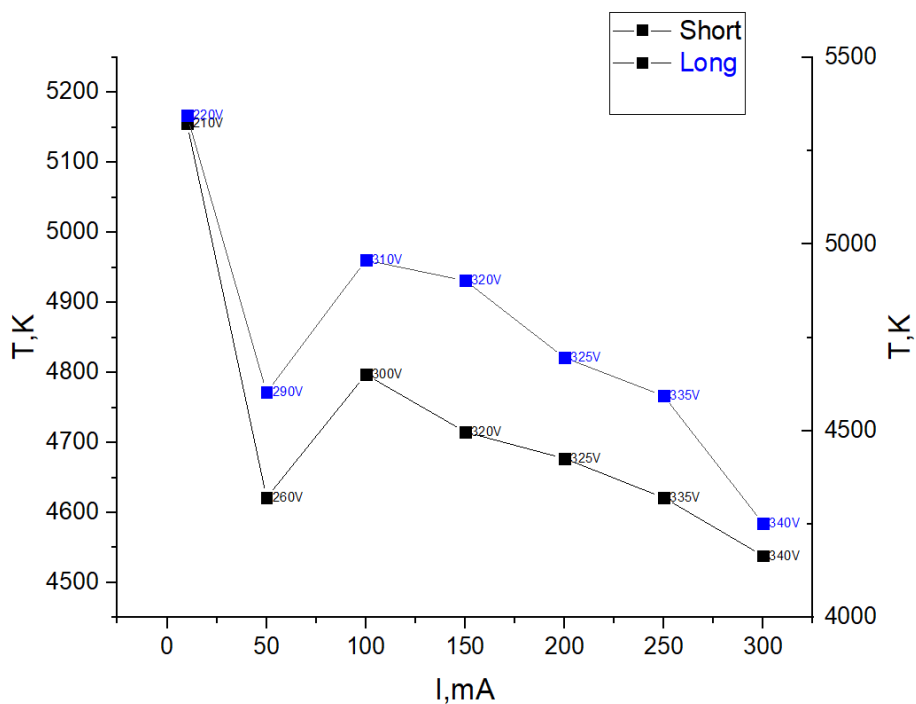
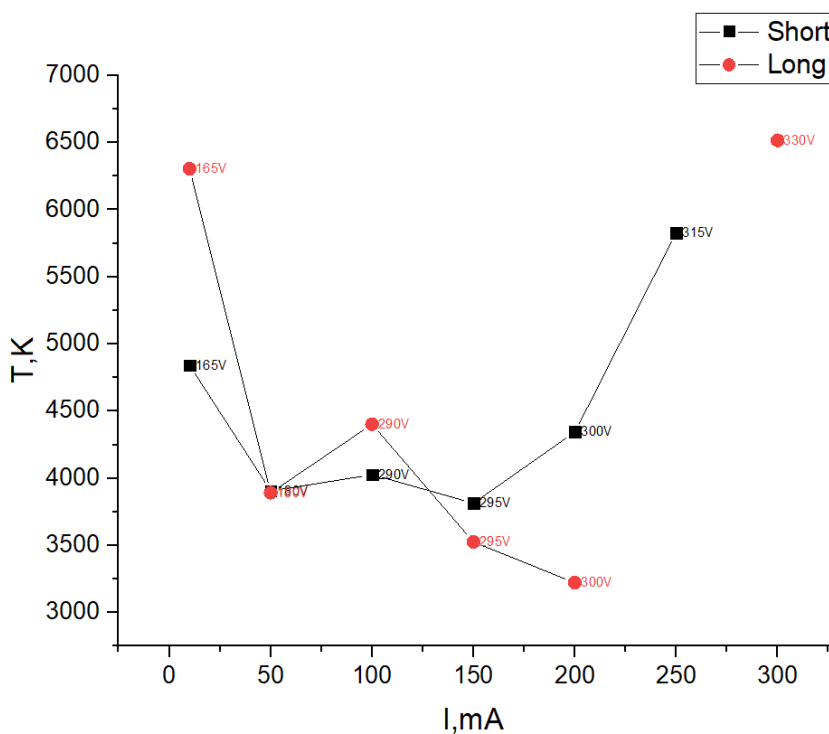


Рис.12 || Залежність температури нікелю від струму для випадку 0,01 Torr.
Синій колір це довга витримка, чорний - коротка



*Рис.13 || Залежність температури нікелю від струму для випадку 0,1 Torr.
Червоний колір це довга витримка, чорний - коротка*

Але варто зазначити, що значення похибок доволі значні, тому треба бути більш уважними при аналізі результатів у висновках.

Висновок

Під час виконання моєї бакалаврської роботи я опанувала метод оптичної емісійної спектроскопії і з'ясувала для себе, як залежить температура заселеності рівня електрона в плазмі магнетронного розряду від таких параметрів, як тиск аргону і вхідний струм

Із розглянутої літератури можна зробити висновок про високу актуальність магнетронного наплення та спектроскопії, що загалом їх використання стає все ширшим та більш різноманітним у плані різних сфер діяльності людини.

Що до результатів експерименту, то отримані залежності доволі не однозначні, але проглядаються тенденції: у випадку сталого струму, те, що температура зменшується. При сталому тиску і змінному струмі - температура спадає для першого розглянутого випадку і трохи зростає для другого, на мою думку це можна враховувати як відхилення через похибку і вважати що температура, загалом не змінюється.

Перелік джерел

[1] Murmantsev O.O. Optical emission spectroscopy of magnetron discharge with metal vapours admixtures / O.O. Murmantsev, A.M. Veklich, O.Yu.

Kravchenko, O.M. Kostyukevych // XVII International scientific conference “Electronics and Applied Physics”. - 2021. - P.69-70.

[2] Crintea D.L. Plasma diagnostics by optical emission spectroscopy on argon and comparison with Thomson scattering / D.L.Crintea, U.Czarnetzki, S.Iordanova, I.Koleva, D.Luggenholscher // IOP Publishing Ltd. - 2009. - P. 1-12.

[3] Akhtar M. The Improvement in Surface Properties of Metallic Implant via Magnetron Sputtering: Recent Progress and Remaining Challenges / M.Akhtar, S.Ah.Uzair, M.Rizwan, M.A.Ur Rehman // Frontiers in Materials. - 2022. - P.1-19.

[4] Tan X. Recent Progress in Magnetron Sputtering Technology Used on Fabrics / X.Tan, J.Liu, J.Niu, J.Liu, J.Tian // MDPI. - 2018. - P. 1-15.

[5] Atomic Spectra Database (version 5.2) / A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team (2014) // Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. Atomic Spectra Database | NIST