

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

НАВЧАНЬО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол № _____ засідання кафедри

Від “_____” _____ 20__р.

**КОЛОРИМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЗЕРКАЛ БРЕГГА З
МІКШОЩІЛНОЮ НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ**

Випускна кваліфікація робота бакалавр

Студента спеціальності 105

Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології»

Сергійчук Станіслав

Науковий керівник

доцент Інституту високих технологій

Іван Іванов

Оцінка захисту роботи _____

Київ – 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ	7
1.1 Опис колориметричного аналізу та його застосування	7
1.2 Опис Брегівських дзеркал з мікрощілиною та їх властивостей	10
1.3 Опис процесу пропускання та відбивання світла	13
1.4 Опис програмних засобів які використовуються для моделювання досліджуваного фізичного процесу	16
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1 Опис побудови моделі дзеркал Брегга з мікрощілинами	21
2.2 Опис моделювання процесу пропускання та відбивання світла	22
2.3 Опис моделювання процесу отримання колориметричних даних	26
2.4 Опис методів для побудови залежностей	28
2.5 Визначення параметрів для зразків пори яких заповнених аналітами....	32
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
3.1 Отримання та аналіз спектральних результатів без аналізу	35
3.1.1 Дані колориметричного аналізу	44
3.2 Результати дослідження зразку з етанолом	46
3.2.1 Дані колориметричного аналізу зразку з етанолом	54
3.3 Результати дослідження зразку з метанолом	55
3.3.1 Дані колориметричного аналізу зразку з метанолом	61
3.4 Результати дослідження зразку з водою	63
3.4.1 Дані колориметричного аналізу зразку з водою	68
ВИСНОВОК	71

Вступ

В сучасному світі існує ціла низка наукових та науково-технічних досліджень які людина може вивчати. Ніколи не було секретом те, що людина здатна отримати певні результати досліджень якогось явища чи матеріалу не проводячи цих досліджень. Одним з найкращих варіантів дослідити якесь явище чи властивість це спроектувати такий процес за допомогою методів моделювання. Саме такий метод дасть нам змогу провести бажане дослідження не збираючи дорогої та важкої у проектуванні установки, до того ж не виходячи з будинку. Саме метод моделювання ми отримаємо бажаний та точний результат який ми зможемо обробити та зробити якісні висновки на рахунок дослідження яке ми провели.

Отже, в даній роботі ми будемо розглядати та досліджувати Брегівські дзеркала з мікрощілинами за допомогою колориметричного аналізу. Брегівські дзеркала - це оптичні елементи, які використовуються для аналізу спектрів випромінювання. Вони базуються на явищі дифракції Бреґга, яке відбувається, коли світло падає на кристалічну решітку з певним кутом і довжиною хвилі. Якщо кут падіння світла відповідає куту Бреґга, тоді спостерігається конструктивна інтерференція, і світло відбивається назад з кристалу. Колориметричний аналіз дзеркал Бреґга є дуже важливим інструментом у наукових дослідженнях і виробництві.

Він використовується в багатьох галузях, включаючи фотоніку, біомедичні технології, астрофізику тощо. Наприклад, колориметрія використовується для аналізу кольору продуктів харчування, косметики та інших речовин, а також для забезпечення правильної кольорової гамми в області друку та телебачення.

Колориметричний аналіз Брегівських дзеркал з мікрощілинами є досить актуальною темою у науці та технології. Основні причини цього - потужний розвиток оптичних технологій, розвиток електроніки та росту потреб споживачів у якісній та точній інформації про кольори.

Однією з головних галузей, де застосовується колориметрія, є фотоніка. У цій галузі, використання Брегівських дзеркал з мікрощілинами дозволяє здійснювати точні вимірювання довжин хвиль світла з високою роздільною здатністю, що дає можливість вирішувати різноманітні задачі фотоніки, такі як виготовлення фотонних кристалів, оптичних вимірювачів та інших пристроїв.

По-перше, колориметричний аналіз дзеркал Брега з мікрощілинами використовується в біомедичних технологіях. У цій галузі колориметрія дозволяє визначити колірні характеристики тканин, шкіри та інших біологічних матеріалів, що важливо для діагностики та лікування різних захворювань. По-друге, цей аналіз дуже важливий у виробництві. Наприклад, він використовується для контролю якості продуктів харчування, текстилю, поліграфії та інших промислових товарів.

По-третє, колориметричний аналіз Брегівських дзеркал з мікрощілинами дозволяє отримувати більш точну та детальну інформацію про кольори, що має важливе значення для наукових досліджень та розробки нових матеріалів та технологій.

Також, колориметричний аналіз є актуальним з точки зору екології та енергозбереження. Застосування цих дзеркал дозволяє зменшити споживання енергії в різних галузях, таких як електроніка, оптика, фотоніка тощо.

Отже, можна зробити висновок, що колориметричний аналіз дзеркал Брега з мікрощілинами є важливим інструментом у технічній науці та має широкий спектр застосувань у різних галузях. Це дає можливість розвивати

нові технології та виробництва, які можуть позитивно вплинути на подальший технологічний розвиток.

Загалом, актуальність теми колориметричного аналізу Брегівських дзеркал з мікрощілинами полягає в їхньому широкому застосуванні в різних галузях науки та технології, що відкриває нові можливості для розвитку економіки, науки та екології.

В даній роботі ми будемо розглядати дослідження Брегівських дзеркал з мікро тріщиною, а саме ми змоделюємо цей процес за допомогою мови програмування Python та доступних для цієї мови бібліотек та модулів, після підключення яких ми зможемо провести проектування та моделювання потрібних для моделювання процесів.

Метою дослідження Брегівських дзеркал з мікрощілинами за допомогою колориметричного аналізу методом комп'ютерного моделювання є отримання детальної інформації про їхні колірні властивості та можливості їхнього використання у різноманітних оптичних системах також навчитися рахувати спектри пропускання і відбиття багат шарових структур де кожен шар має різний показник заломлення тобто різну поруватість.

Дослідження дзеркал Брега методом колориметричного аналізу має на меті дослідити властивості багат шарових структур з мікрощілинами, що застосовуються в Брегівських дзеркалах. Основним завданням є розробка методу колориметричного аналізу та комп'ютерного моделювання для вивчення властивостей дзеркал з мікрощілинами.

Застосування колориметричного аналізу дозволяє вимірювати кольорові характеристики світла, що відбивається або проходить через багат шарову структуру. Дослідження Брегівських дзеркал з мікрощілинами за допомогою методу колориметричного аналізу дозволяє встановити залежність

відбивання та пропускання світла від розташування та параметрів мікрощілин, які входять до складу дзеркала.

Окрім того, застосування методу комп'ютерного моделювання дозволяє отримати більш детальну інформацію про властивості дзеркала та побудувати моделі багат шарових структур з мікрощілинами з різними параметрами. В результаті дослідження можна отримати нові знання про властивості дзеркал з мікрощілинами та використовувати ці знання для покращення їхніх характеристик у різних галузях, таких як оптичні технології, сонячна енергетика та інші.

1 Теоретичний аналіз

В даному розділі ми детально розберемо фізичні явища та процеси які відбуваються при дослідженні Брегівських дзеркал з мікрощілинами на основі поруватого кремнію за допомогою колориметричного аналізу.

1.1 Опис колориметричного аналізу та його застосування

Колориметричний аналіз - це фізико-хімічний метод кількісного визначення концентрації речовини, яка здатна поглинати світло або ультрафіолетові промені за певної довжини хвилі, або здатна утворювати такі сполуки. Метод базується на вимірюванні оптичної густини розчинів за допомогою спеціальних приладів- електричних фотоколориметрів та спектрофотометрів, або на візуальному порівнянні інтенсивності забарвлення досліджуваного розчину з еталонними розчинами. В основі колориметрії лежить закон Бугера-Ламберта-Бера, згідно з яким інтенсивність забарвлення пропорційна концентрації забарвленої речовини в розчині і товщиною його шару. Цей метод базується на візуальному порівнянні кольору розчину, що досліджують, з серії стандартних розчинів з відомою концентрацією. При цьому забарвлений розчин поглинає суцільне випромінювання немонохроматичної видимої ділянки спектру.

В колориметрії існує три основні конфігурації вимірювання: випромінювання, пропускання та відбивання.

Випромінювання є найпростішою конфігурацією з трьох і зазвичай використовується в колориметрії для освітлення та відображення. Для цих програм використовуються дві стандартні конфігурації вимірювання, залежно від того, чи є ціль вимір окремої точки або загальної освітленості.

Для вимірювання різних точок використовується конфігурація, яка зазвичай називається «точковим виміром». У цій конфігурації

колориметрична лінза з'єднується зі спектрометром через оптоволоконний патч-корд. Колориметрична лінза дозволяє обмежити поле зору певними точками, і, якщо спектрометр відкалібрований за енергетичною освітленістю, значення X і Y можна розрахувати, застосувавши дані функції стандартного колориметричного спостерігача. Колориметрична лінза зазвичай використовується для відкаліброваних за кольором дисплеїв та моніторів, що використовуються графічними дизайнерами, щоб гарантувати, що зображення на моніторах точно відображає зображення в його кінцевому вигляді під час друку. І навпаки, якщо має на меті виміряти загальну освітленість, що падає на об'єкт, то замість використання лінзи, що колімує, необхідний косинусний коректор. Це дозволяє збирати світло в полі зору 180° (2π). Така геометрія дозволяє аналізувати загальну освітленість, забезпечуючи точність вимірювання кольоровості в місці, що цікавить. Ця конфігурація відома як «спектральна опроміненість» і зазвичай використовується у виробництві комерційного та театрального освітлення, де правильне освітлення необхідне передачі бажаного естетичного вигляду.

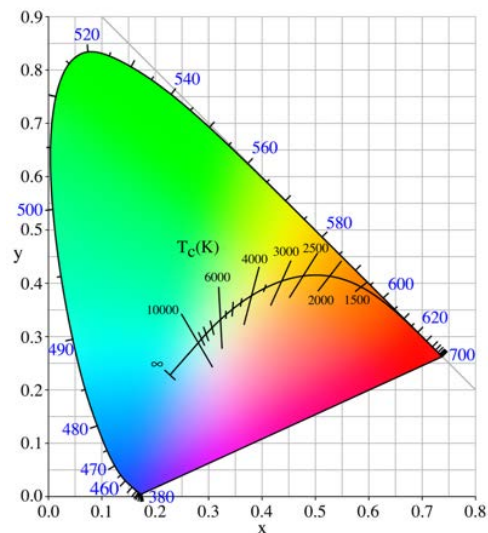


Рис 2.1. Діаграма кольоровості кольорного простору CIE 1931

Колориметричний аналіз використовується в багатьох галузях, включаючи хімію, фотографію, дизайн, медицину, інженерію тощо. Одним із основних застосувань колориметричного аналізу є вимірювання кольору світла, відбитого або пропущеного певними матеріалами, такими як тканини, фарби, пластик, скло тощо.

Наприклад, колориметричний аналіз може допомогти визначити якість і кольоровість чорнила, що використовується під час друку. Його також можна використовувати для визначення колірної температури світла, що використовується в студійній фотографії, або для забезпечення належного освітлення в операційній.

Багато аналітичних та індустріальних програм, особливо в області тестування продуктів харчування, виробництва пластику або скла вимагають колориметричного тестування напівпрозорих об'єктів. Для цих типів колориметричних додатків дуже важливо використовувати високостабільне широкосмугове джерело світла, такий як AvaLight-NA, Avantes, який може бути з'єднаний оптоволоконом, або з тримачем кювети для рідких зразків, з регульованим тримачем лінз, що колориметрують, для більших об'єктів, таких як прозорий пластик або окуляри. Потім минуле світло може бути зібраний спектрометром, наприклад, AvaSpec-ULS2048CL-EVO від Avantes або спектрометром із вбудованим термоелектричним охолодженням AvaSpec-ULS2048x64TEC-EVO, Avantes для більш поглинаючих об'єктів, щоб значно зменшити темновий шум на детекторі, що дозволяє значно збільшити.

Також, колориметричний аналіз є важливим інструментом в фізиці та інших науках, де вивчається світло і його взаємодія з різними матеріалами та структурами. Основні області застосування колориметрії в фізиці включають:

- Фотометрія: вимірювання світлових потоків і яскравості джерел світла та інших об'єктів.
- Спектроскопія: вивчення взаємодії світла з речовинами за допомогою розбиття світла на різні спектральні складові та аналізу цих компонентів.
- Колориметрія поверхонь: визначення колірної гамми матеріалів та оцінка їхнього відтворення кольору в різних умовах.
- Дослідження кристалів та багат шарових структур: визначення оптичних властивостей кристалів, дослідження спектрів пропускання та відбивання багат шарових структур.

Ці області застосування колориметрії є лише декількома з численних можливостей використання цього методу в фізиці.

У дослідженні Брегівських дзеркал колориметричний аналіз може використовуватися для вимірювання кольорового спектру світла, що відбивається або проходить крізь мікрощілини, що складаються з багатьох шарів матеріалів з різними показниками заломлення. За допомогою цього методу можна отримати важливу інформацію про структуру та властивості дзеркал Бреґга, що може бути корисною для подальшого дослідження та розробки нових оптичних приладів і технологій.

1.2 Опис Брегівських дзеркал з мікрощілиною та їх властивостей

Брегівські дзеркала (також звані розподіленими брегівськими відбивачами) є структурою, яка складається з послідовності шарів двох різних оптичних матеріалів, що чергуються. Найбільше часто використовується конструкція у вигляді чвертьхвильового дзеркала, де товщина кожного оптичного шару відповідає чверті довжини хвилі, для якої

розроблено дзеркало. Остання умова працює для нормальних кутів падіння (90 град). Для великих кутів падіння необхідні товстіші шари.

Принцип дії брегівського дзеркала можна пояснити тим, що на кожній межі між двома прозорими матеріалами з різними коефіцієнтами заломлення відбувається Френелівське відбиття. Для довжини хвилі, на яку розробляється дзеркало, різниця довжини оптичного шляху для променів, що відбилися в кожному наступному шарі, відрізняється на половину довжини хвилі, до того ж контраст коефіцієнта відображення має різний знак. Тому всі відбиті від поверхонь хвилі інтерферують, у результаті з'являється чіткий відбиток. Відбивна здатність, що досягається, залежить від кількості парних шарів і від показника заломлення, що відрізняється між матеріалами шарів. Ширина лінії відображення залежить головним чином від контрасту.

Тонкі Брегівські дзеркала є структурою, що складається з послідовності оптичних матеріалів, що чергуються, з різним показником заломлення. Товщина кожного оптичного шару відповідає чверті центральної довжини хвилі брегівського дзеркала:

$tH = \lambda/(4nH)$ – товщина шару з великим показником заломлення nH ,

$tL = \lambda/(4nL)$ – товщина шару з меншим показником заломлення nL .

На межі між шарами з різними показниками заломлення падаючий пучок відбивається. Відбиті частини мають зрушення по фазі в 180 градусів в тому випадку, якщо світло перейшло з шару з меншим показником заломлення в шар з великим коефіцієнтом. Відносна різниця фаз всіх відбитих променів або нульова, або кратна повному обороту 360 градусів (тоді спостерігається явище інтерференції). Через часткове відображення інтенсивність падаючого випромінювання під час переходу через шар падає. Водночас інтенсивність відбитого випромінювання зростає, якщо поглинання середовища незначне.

Брегівські дзеркала з мікрощілиною - це оптичні елементи, які використовуються в спектроскопії та інших дослідженнях в області оптики. Вони складаються з двох скляних, або як в нашому випадку кремнієвих, пластин, між якими розташована тонка шарова мікрощілина, яка представляє з себе плівку з отворами розміром порядку довжини світлової хвилі. При проходженні світла через мікрощілину відбувається інтерференція, яка залежить від розмірів та форми отворів, а також від кута падіння світла. Брегівські дзеркала з мікрощілиною можуть бути виготовлені з різних матеріалів (наприклад з кремнієвих пластин які мають різну поруватість, відповідно і різні властивості пропускання та відбивання хвиль) та для різних діапазонів довжин хвиль. Вони використовуються для дослідження спектрів світла, зокрема для розкладання його на колірні складові (спектральний розклад) і вимірювання спектрального складу світла.

Отже, Брегівські дзеркала з мікрощілиною, які мають різну поруватість, є багат шаровими структурами, в яких кожен шар має різний показник пропускання світла. Такі пластини з поруватого кремнію складаються з кількох тонких шарів матеріалів з різними показниками заломлення світла, що дозволяє їм відбивати світло з високою ефективністю. Показник пропускання світла визначається відношенням швидкості світла у вакуумі до швидкості світла у матеріалі. У багат шаровій структурі Брегівського дзеркала з мікрощілиною, яка має різну поруватість, кожен шар матеріалу має свій власний показник пропускання світла, який залежить від його товщини і складу. Ці дзеркала використовуються в різних застосуваннях, включаючи фотоніку, лазерну технологію, оптичні фільтри, дисплеї та сенсори. Вони є важливими компонентами відбиваючих поверхонь, що забезпечують максимальний відбиток світла у багатьох оптичних системах. Також Брегівські дзеркала з мікрощілиною можуть

використовуватися в оптичних інтерферометрах для вимірювання довжини світлових хвиль, а також для реєстрації та аналізу інтерференційних зображень.

Брегівські дзеркала з мікрощілинами, які мають різну поруватість, мають дуже цікаві оптичні властивості. Залежно від поруватості шарів можуть спостерігатися явища, такі як інтерференція, дифракція, відбивання, пропускання світла під певним кутом, та інші. Основною властивістю таких дзеркал є їхня здатність до дифракції світла від мікрощілин, що викликає інтерференцію між хвильовими фронтами світла, відбитого від різних шарів мікрощілини. Це призводить до утворення кольорових смуг, що спостерігаються при дивленні на таке дзеркало. Ці кольорові смуги можуть залежати від кута падіння світла на дзеркало, товщини та поруватості шарів мікрощілин. Іншою важливою властивістю є залежність кольору від напрямку світла. Для одних довільно вибраних напрямків світла можуть спостерігатися різні кольори, які залежать від характеристик мікрощілин, таких як поруватість та розмір. Це може бути корисно для визначення параметрів тонких шарів матеріалів, наприклад, у дослідженні тонких плівок в електроніці та оптиці.

Загалом, Брегівські дзеркала з мікрощілинами є цікавим об'єктом досліджень в області оптики та матеріалознавства, а їхні властивості можуть бути використані в різних застосуваннях, від кристалооптики та мікроелектроніки до фотоніки та оптичних сенсорів.

1.3 Опис процесу пропускання та відбивання світла

Світло може бути розглянуте як електромагнітна хвильова характеристика, яка зазвичай описується за допомогою частоти, довжини хвилі та амплітуди. Коли світло проходить через середовище з показником

заломлення, довжина хвилі світла змінюється, а швидкість світла зменшується, що може призводити до зміни напрямку поширення світла.

Якщо світло проходить через тонкий шар речовини, такий як плівка на склі або металевий шар, він може відбиватися та проходити через цей шар одночасно. Це процес називається інтерференцією та може бути описаний за допомогою законів фізики.

У випадку Брегівських дзеркал з мікрощілиною, коли світло проходить крізь ряд тонких шарів різних матеріалів з різними показниками заломлення, відбувається процес інтерференції світла, що призводить до утворення кольорових смуг на спектрі відбитого світла. Властивості цих кольорів залежать від поруватості кожного шару та загальної конфігурації дзеркала. Коли світло проходить через різні шари матеріалів, воно може взаємодіяти з кожним шаром і відображатися, пропускатися або поглинатися. Ці процеси залежать від властивостей матеріалів і можуть бути описані різними фізичними законами, такими як закон Френеля та закон Бугера. Якщо на поверхні різних шарів є мікрощілини, то це може призвести до ефекту інтерференції. Інтерференція - це явище, коли дві частинки хвилі взаємодіють між собою і можуть посилювати або знижувати одна одну. Процес пропускання світла відбувається у три етапи: пропускання крізь перше дзеркало, відбиття від мікрощілини та пропускання крізь друге дзеркало. Світло, яке потрапляє на перше дзеркало, частково відбивається, а частково пропускається. Частина пропущеного світла потрапляє на мікрощілину, де відбувається дифракція. Після цього частинка світла відбивається від мікрощілини, а частинка пропускається далі. На виході другого дзеркала світло розділяється на декілька пучків з різним кутом виходу, що відповідає різним кольорам спектру. В результаті цього може відбуватися посилення або приглушення деяких довжин хвиль.

Отже, пропускання світла в Брегівських дзеркалах з мікрощілиною залежить від декількох факторів, таких як поруватість кожного шару, кут падіння світла, довжина хвилі світла та геометрія мікрощілини. Ці фактори взаємодіють між собою та визначають кінцевий кольоровий відтінок, який спостерігається на виході з дзеркала.

В Брегівських дзеркалах з мікрощілиною, які мають різну поруватість, процес відбивання світла відбувається на межі різних середовищ з різними показниками заломлення. Світло, яке падає на дзеркало, проникає крізь перший шар, потім через другий, третій і т.д., доки не досягне базового шару. Кожен шар має свій показник заломлення та опорний профіль, що визначається поруватістю його поверхні. На межі двох середовищ з різними показниками заломлення світло відбивається частково, а частково пропускається. Якщо товщина шару відповідає цілому кратному півхвилі, то світло, яке відбивається від межі двох середовищ, іде в тому ж напрямку, що і приходить на дзеркало. Цей ефект називається інтерференцією. Якщо товщина шару не відповідає цілому кратному півхвилі, то світло, яке відбивається від межі двох середовищ, зміщується в інший напрямок, тобто відбивається під іншим кутом, ніж падає на дзеркало. Цей ефект називається дисперсією.

При взаємодії світла з мікрощілинами, що є поруватими, відбувається явище дифракції, яке також впливає на відбивання та пропускання світла. Дифракція спричиняє поширення світла в різні напрямки, що формує дифракційні максимуми та мінімуми. При відбиванні світла від Брегівських дзеркал з мікрощілиною, вхідний промінь світла зустрічається з першим шаром матеріалу, який має певну оптичну щільність та товщину. Якщо оптична щільність матеріалу першого шару вища, ніж оптична щільність середовища, звідки світло приходить, то відбувається повне відбивання

променя на межі цих середовищ. Якщо оптична щільність матеріалу першого шару нижча, ніж оптична щільність середовища, звідки світло приходить, то промінь частково пройде через перший шар. При проходженні через різні шари матеріалу світло знову може відбитись на межі шарів з різними оптичними щільностями, і тоді відбувається інтерференція хвиль. Інтерференція відбувається через те, що проміні світла, які проходять через різні шари, можуть бути зсунуті відносно один до одного на деяку фазу, залежно від довжини хвилі та товщини кожного шару матеріалу.

Таким чином, в результаті інтерференції світла на межах шарів матеріалу утворюються різні кольори в залежності від товщини та оптичної щільності кожного шару. Колір, який ми бачимо, залежить від фазової різниці між хвилями світла, що відбивається від різних місць дзеркала. Оскільки товщина та оптична щільність кожного шару можуть бути різними, то відбивання та інтерференція хвиль будуть відбуватися по-різному.

1.4 Опис програмних засобів які використовуються для моделювання досліджуваного фізичного процесу.

В даній роботі ми розглядаємо оптичні явища та процеси, а саме відбивання та пропускання світла для моделювання яких ми використовуємо мову програмування Python. Ця мова програмування дає великий спектр можливостей для моделювання фізичних процесів, обробки фізичних даних, обрахунку та побудови залежностей на основі отриманих результатів. Моделювання процесів, які необхідні для проведення колориметричного аналізу Брегівських дзеркал з мікрощілинами на основі поруватого кремнію, як і багато інших досліджень, можливі завдяки великою кількістю бібліотек та модулів які ми можемо підключити до середовища Python.

Одною з основних бібліотек яка необхідна для проведення нашого дослідження можна вважати PyLlama. Ця бібліотека надає інструменти для моделювання та аналізу процесів пропускання та відбивання світла. Також бібліотека PyLlama надає розширені можливості для моделювання процесів пропускання та відбивання світла. Завдяки ній, ми можемо створювати складні структури з різними шарами матеріалів і контролювати їх властивості, такі як показник заломлення, абсорбція та розсіювання світла. За допомогою PyLlama ми можемо розраховувати пропускання та відбивання світла через створені структури, враховуючи кут падіння, довжину хвилі та поляризацію світла. Також вона дозволяє виконувати спектральний аналіз, визначаючи спектральні характеристики світла та використовувати вбудовані оптичні пропатори для моделювання поширення світла через структури з різними матеріалами. Бібліотека надає можливість візуалізувати результати моделювання, побудувавши графіки та діаграми, що відображають пропускання, відбивання та спектральні характеристики світла. В загальному PyLlama є потужним інструментом для дослідження оптичних властивостей та процесів, пов'язаних з пропусканням та відбиванням світла.

Також досить важливою бібліотекою, яка NumPy. Бібліотека NumPy (Numerical Python) є однією з основних бібліотек для наукових обчислень та роботи з числовими даними у мові програмування Python. Вона надає широкі можливості для ефективної роботи з багатовимірними масивами, матрицями та векторами. По-перше, NumPy надає об'єкт, який представляє багатовимірний масив значень одного типу даних. Це дозволяє здійснювати швидкі обчислення та маніпулювання з даними. По-друге, NumPy дозволяє виконувати

елементарні операції (додавання, віднімання, множення, ділення і т. д.) над масивами без необхідності використання циклів. Це сприяє покращенню продуктивності та скороченню коду. По-третє, NumPy надає потужні засоби для доступу до елементів масивів за допомогою індексів та зрізів. Це дозволяє швидко та зручно маніпулювати даними. NumPy містить велику колекцію математичних функцій, які можуть бути застосовані до масивів, таких як тригонометрія, логарифми, експоненціальні та інші функції. Також одним з основних переваг цієї бібліотеки є те, що NumPy добре інтегрується з іншими бібліотеками для наукових обчислень, такими як pandas та matplotlib, які ми також використовуємо при моделюванні та дослідженні, що дозволяє створювати потужні інструменти для аналізу даних та візуалізації.

Важливою для виконання нашого процесу також є бібліотека SymPy. Бібліотека SymPy (Symbolic Python) є однією з основних бібліотек для символічних обчислень у мові програмування Python. Вона надає широкі можливості для символічної математики, включаючи символічні обчислення, алгебраїчні маніпуляції, символічну диференціацію, інтегрування, розв'язання рівнянь, роботу з символічними виразами та символічними функціями. Основні можливості бібліотеки SymPy включають символічні об'єкти, алгебраїчні маніпуляції, символічну диференціацію та інтегрування, розв'язання рівнянь, символічну геометрію та візуалізацію. Ці можливості роблять бібліотеку SymPy потужним інструментом для символічних обчислень, математичного моделювання, фізики, інженерії та наукових досліджень.

Бібліотека matplotlib.pyplot є частиною пакету matplotlib і надає функції для візуалізації даних та створення графіків у мові

програмування Python. Вона має широкі можливості для створення різних типів графіків, налаштування їх вигляду та додавання елементів до графіків, таких як легенди, мітки, заголовки, сітки та інші. Бібліотека дозволяє створювати графіки різних типів, включаючи лінійні графіки, стовпчикові графіки, кругові діаграми, розсіювальні діаграми, гістограми та багато інших, контролювати різні аспекти вигляду графіків, такі як колір, тип та штриховку ліній, тип та розмір маркерів, шрифти та розміри тексту, колір тла та інші параметри. Можна додавати легенди, мітки осей, заголовки графіків, сітки та інші елементи для поліпшення зрозумілості та вигляду графіків. Також створювати графіки, які містять декілька підзображень (субплотів), що дає можливість відображати кілька графіків одночасно та порівнювати дані.

Також для побудови графіків залежностей ми використали бібліотеку pandas. Бібліотека Pandas є надзвичайно потужним інструментом для обробки та аналізу даних в мові програмування Python. Вона надає високорівневі структури даних, такі як DataFrame, які спрощують маніпулювання, фільтрацію, групування та агрегацію даних. DataFrame дозволяє легко працювати з рядками і стовпцями даних, забезпечує зручне індексування і можливості для виконання різноманітних операцій. Pandas також надає розширені можливості для завантаження і збереження даних з різних форматів, включаючи CSV, Excel, SQL, JSON та інші. Вона також підтримує інтеграцію з базами даних і здатна виконувати запити до них за допомогою SQL-подібного синтаксису. Крім того, Pandas надає функції для обробки відсутніх значень, вирівнювання даних, обчислення статистичних метрик, злиття і з'єднання даних, агрегації, сортування, індексування та інших

операцій. Вона також підтримує маніпулювання даними шляхом додавання, оновлення та видалення стовпців і рядків. Крім основних функціональних можливостей, pandas надає розширені можливості для візуалізації даних за допомогою інтеграції з іншими бібліотеками, такими як matplotlib і seaborn. Вона також підтримує роботу з даними часу, включаючи індексування за датою та виконання операцій з часовими рядами.

2 Методика дослідження

Як було зазначено в попередньому розділі, під час моделювання колориметричного аналізу дзеркал Брегга з мікрощілинами на основі поруватого кремнію ми використали певні бібліотеки. В даному розділі ми розглянемо та опишемо метод моделювання які були використані, а саме: опис побудови зразку (Брегівських дзеркал з мікрощілинами на основі поруватого кремнію), опис моделювання процесу пропускання та відбивання світла, визначення колориметричних даних та опис методів для побудови залежностей.

2.1 Опис побудови моделі дзеркал Брегга з мікрощілинами.

Отже, наша модель являє собою структуру, яка складається з двошарових шарів поруватого кремнію, які мають різну товщину, відповідно різні коефіцієнти заломлення та відбивання для кожного шару. В нашому випадку, значення товщини шару буде змінюватися не на пряму, а в залежності від значення довжини хвилі якому відповідає щілина між шарами поруватого кремнію з різними показниками заломлення та самими показника заломлення для кожного з цього шарів.

```
for WL0 in range(450, 751, 50):  
    # Задання значень для показників заломлення nH та  
    nL.  
    nH = nH = int(input("Введіть значення nH: "))  
    nL = nL = int(input("Введіть значення nL: "))  
  
    # Визначення значень діелектричної проникності.  
    epsH = nH * nH  
    epsL = nL * nL
```

```

# Матриці викорисдля моделювання оптичних структур,
де різні шари мають різні значення діелектричної
проникності.
eps_a = np.array([[epsH, 0, 0], [0, epsH, 0], [0,
0, epsH]])
eps_b = np.array([[epsL, 0, 0], [0, epsL, 0], [0,
0, epsL]])

# Визначення товщини шарів.
thick_a = WL0 / (4 * nH)
thick_b = WL0 / (4 * nL)

# Показники заломлення для точок входу та виходу
світла.
# Показник заломлення повітря.
n_entry = 1
# Показник заломлення кремнію
n_exit = 3.4

theta_in_rad = 0
N = 10

```

Даний фрагмент коду відповідає за створення циклу, який змінює значення для довжини хвилі яка відповідає положенню щілини у видимому діапазоні (від 450 нанометрів до 750 нанометрів з кроком 50 нанометрів) та обрахунку значень товщини шарів поруватого кремнію в залежності від довжин хвиль які відповідають положенню щілин.

2.2 Опис моделювання процесу пропускання та відбивання світла

Наступний фрагмент коду відповідає за підготовку необхідних значень для обчислення коефіцієнта відбиття та пропускання для кожної довжини хвилі.

```

# Створення порожньої змінної яка відповідає за
значення коефіцієнтів відбиття та пропускання
reflection_s_to_p = []

```

```

# Створення значень довжин хвиль
wl_nm_list = range(400, 800)

# Половина кількості двошарових шарівСтворення
Nbi = 5

# Створення списків які містять повторення шарів
EpsStack01 = [eps_a, eps_b] * Nbi
EpsStack02 = [eps_a]
EpsStack03 = [eps_b, eps_a] * Nbi
EpsAll = EpsStack01 + EpsStack02 + EpsStack03

# Створення списків які містять значення товщин шарів
Thick01 = [thick_a, thick_b] * Nbi
Thick02 = [thick_a * 2]
Thick03 = [thick_b, thick_a] * Nbi
ThickAll = Thick01 + Thick02 + Thick03

```

Отже, в даному фрагменті ми автоматично заповнюємо списки, які будуть використовуватися в циклі, який обчислить коефіцієнти відбиття для кожного зразку в залежності від довжини хвилі яка відповідає положенню щілини та товщини відповідно.

```

# Розрахунок коефіцієнта відбиття для кожної довжини хвилі
for wl_nm in wl_nm_list:

    my_stack_model = pyllama.StackModel([eps_a, eps_b,
eps_a, eps_b, eps_a, eps_b, eps_a, eps_b,
eps_a, eps_b, eps_a, eps_b, eps_a, eps_b,
eps_a, eps_b],

                                         [thick_a, thick_b,
thick_a, thick_b, thick_a, thick_b,
thick_a*2, thick_b, thick_a, thick_b, thick_a, thick_b,
thick_a, thick_b, thick_a, thick_b, thick_a, thick_b],
                                         n_entry,
                                         n_exit,

```

```

        wl_nm,
        theta_in_rad,
        1)

    # Збереження значення коефіцієнту відбиття до
    списку
    J_refl_lin, _ = my_stack_model.get_refl_trans()

    reflection_s_to_p.append(J_refl_lin[0, 0])

```

Але, для визначення колориметричних параметрів – домінантної довжини хвилі та показника ідеальності нам потрібно отримати залежності коефіцієнтів пропускання від довжин хвилі які відповідають положенням щілин.

Тому ми можемо записати новий код, який виведе потрібні, для обрахунку колориметричних параметрів, залежності та результати.

```

or wl_nm in wl_nm_list:
    my_stack_model = pyllama.StackModel(EpsAll,
    ThickAll, n_entry, n_exit, wl_nm, theta_in_rad, 1)

    # Розрахунок коефіцієнта пропускання.
    J_refl_lin, J_trans_lin =
    my_stack_model.get_refl_trans()
    transmission_s_to_p.append(1 - J_refl_lin[0, 0])

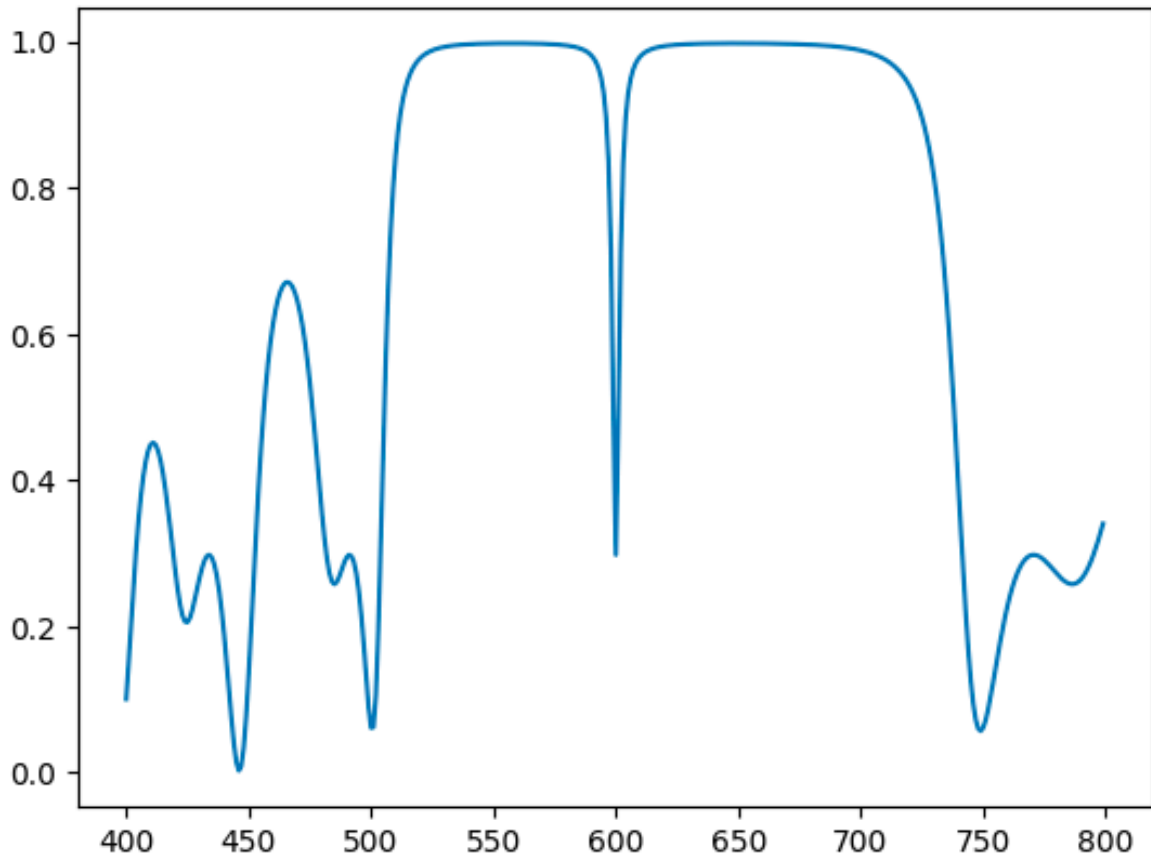
```

Цей цикл розраховує коефіцієнт пропускання на основі вже відомого коефіцієнта відбиття за формулою:

$$T = 1 - R$$

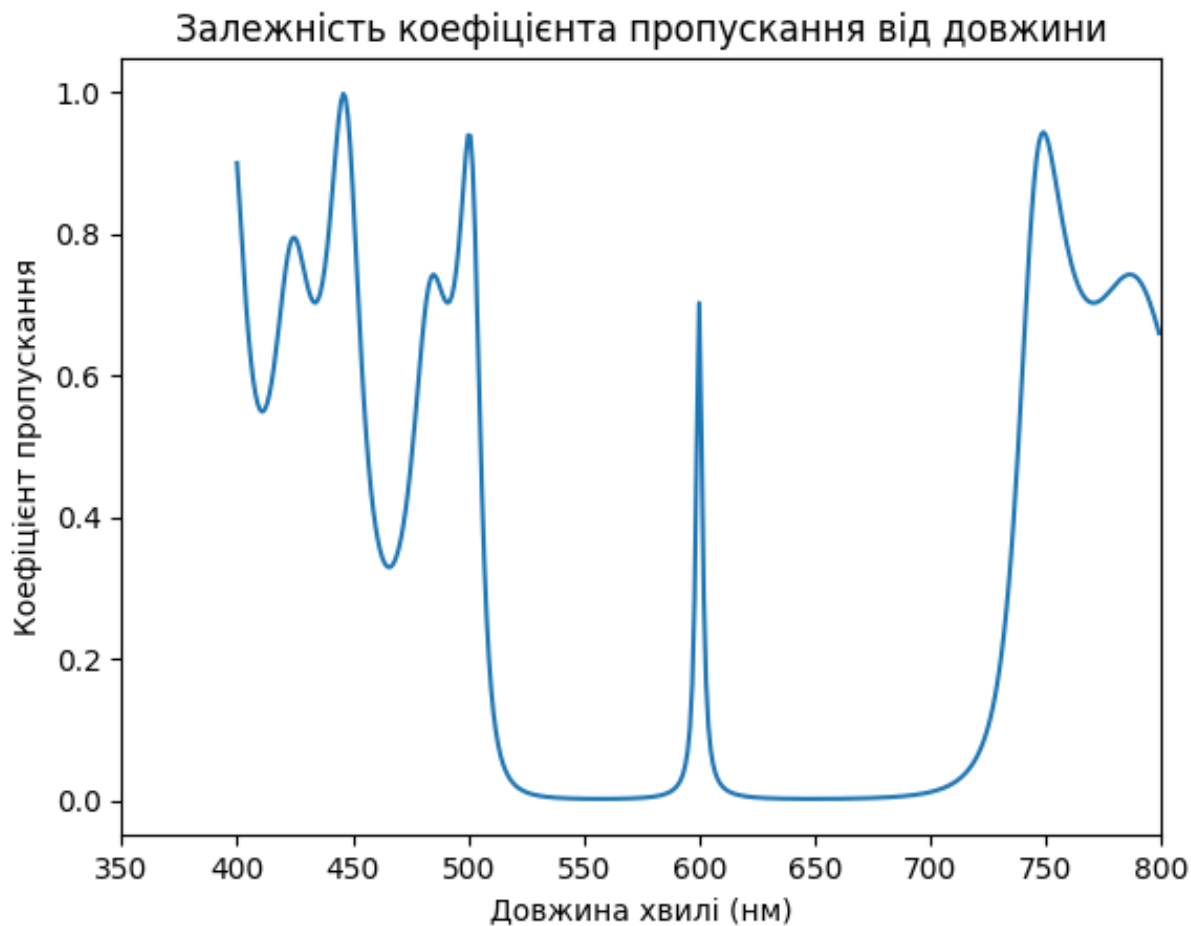
де **R**- це коефіцієнт відбивання, **T** – коефіцієнт відбиття.

Відповідно і зміниться вигляд графіків залежностей, якщо в залежності коефіцієнта відбивання від довжини хвилі, на рисунку довжина хвилі в залежності від положення щілини мала вигляд «щілини»,



то у випадку залежності залежності коефіцієнта пропускання від довжини хвилі положення щілини відобразиться у вигляді піку.

(Дані залежності представлені для наглядного порівняння зміни виду графіків, при змінні залежностей, так як, в подальшому будуть використовуватися лише залежності коефіцієнтів пропускання від довжин хвилі, а саме для обчислення колориметричних показників)



2.3 Опис моделювання процесу отримання колориметричних даних.

В даному фрагменті коду ми розраховуємо колориметричні параметри нашої структури, а саме домінуючу довжину хвилі для діапазону довжин хвиль від 400 до 800 нанометрів та показник ідеальності.

Тобто, ми створюємо масиви в які будемо вносити наші данні, далі виконується пошук індексу максимального значення у масиві `spectrum` за допомогою `np.argmax` та за допомогою цього індексу визначається відповідна довжина хвилі з масиву.

Отримана доміантна довжина хвилі записується у нову змінну. Далі для визначення показника ідеальності створюється підмасив R, який містить перші 16 значень зі спектрального масиву spectrum.

Застосовується формула для розрахунку показника ідеальності, та індексації масиву R. Отриманий показник ідеальності записується у нову змінну.

Обрахунки доміантної довжини хвилі та показника ідеальності виконуються для всіх зразків з різною товщиною шарів за допомогою циклу та записуються в нові списки, які виводять значення колориметричних параметрів на екран.

```
# Обчислення колориметричних параметрів
wavelengths = np.array(range(400, 800))
spectrum = np.array(reflection_s_to_p)

# Розрахунок доміантної довжини хвилі
dominant_wavelength =
wavelengths[np.argmax(spectrum)]
dominant_wavelengths.append(dominant_wavelength)

# Розрахунок показника ідеальності (CRI)
R = spectrum[:16]
color_rendering_index = np.sum(R[:,2] * R[1::2])/8
color_rendering_indices.append(color_rendering_index)
ax.set_xlim(400, 750)
ax.set_xlabel('Довжина хвилі (нм)')
ax.set_ylabel('Коефіцієнт пропускання')
ax.set_title('Залежність коефіцієнта пропускання
від довжини хвилі')
ax.legend()

# Виведення результатів
for i in range(len(dominant_wavelengths)):
    print(f"Доміантна довжина хвилі ( $\lambda_c = \{450 + i * 50\}$  нм): {dominant_wavelengths[i]}")
```

```
print(f"Показник ідеальності (CRI) ( $\lambda_c = \{450 + i * 50\}$  нм) : {np.real(color_rendering_indices[i])}")
```

Наступний фрагмент коду розраховує та відображає у вигляді таблиці значення висоти маленького піку щілини та напівширини щілини

```
# Створення порожніх змінних для зберігання висоти
# маленького піку-щілини та напівширини щілини
peak_height = 0
slit_width = 0

slit_width = np.sqrt(2 * thick_a * WL0 / nH)

# Обчислення висоти маленького піку-щілини
peak_height = np.sin(np.pi * slit_width / WL0) /
(np.pi * slit_width / WL0)

# Збереження обчислених параметрів
peak_heights.append(peak_height)
slit_widths.append(slit_width)
```

В даному випадку обчислення значень відбувається за допомогою вручну прописаних формул для напівширини та маленького піку щілини :

$$W = \sqrt{\frac{\sqrt{2a\lambda}}{nH}} \text{ та } H = \sin\left(\frac{\pi W}{\lambda}\right) / \left(\frac{\pi W}{\lambda}\right)$$

де a – товщина щілини, λ – довжина хвилі, nH – показник заломлення,

W – ширина щілини, H – висота маленького піку щілини.

2.4 Опис методів для побудови залежностей.

Одним з найважливіших аспектів майже в кожній роботі пов'язаною з моделюванням фізичних процес є отримання правильного відображення залежностей певних величин та показників. В нашому випадку

відображення та оброблення отриманих результатів в наслідок моделювання експерименту є виведення графічних залежностей.

```
plt.xlim(350, 800)

# Додавання підписів осей та заголовка графіка
plt.xlabel('Довжина хвилі (нм)')
plt.ylabel('Коефіцієнт пропускання')
plt.title('Залежність коефіцієнта пропускання від
довжини хвилі')

# Відображення графіка
plt.plot(wl_nm_list, reflection_s_to_p)
plt.show()
# Виведення графіка
plt.show()
```

Дана частина коду виводить на екран графіки залежності Коефіцієнту пропускання від довжини хвилі для всіх значень положення щілини.

Але для більш загальної відображення картини отриманих результатів нам потрібно отримати всі ці залежності на одному полотні.

```
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Створення полотна для графіків зі збільшеним розміром
fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Цикл для побудови графіків
for WL0 in range(450, 751, 50):
    # Залишається код для обчислення коефіцієнта пропускання та
    колориметричних параметрів

    # Обчислення амплітуди
    amplitude = np.max(reflection_s_to_p)

    # Додавання точки до 3D графіка
    ax.plot(wl_nm_list, np.full_like(wl_nm_list, WL0),
reflection_s_to_p)

# Налаштування осей
```

```

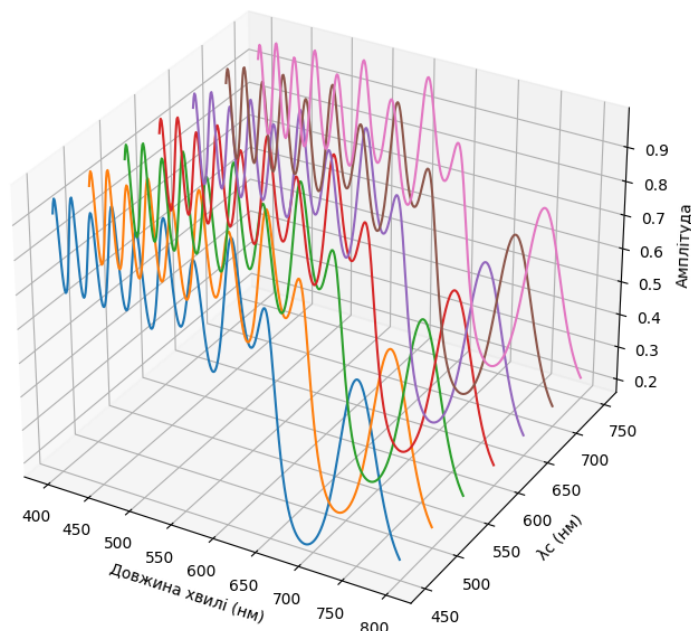
ax.set_title('Залежність амплітуди від довжини хвилі та  $\lambda c$  при показниках заломлення [nL=3 nH=2] ')
ax.set_xlabel('Довжина хвилі (нм)')
ax.set_ylabel('λc (нм)')
ax.set_zlabel('Амплітуда')

# Виведення графіка
plt.show()

```

Саме ця частина коду буде 3D графік залежності амплітуди від довжини хвилі та довжини хвилі яка відповідає положенню щілини, що дає нам відображення загально карти зміни результатів вимірювання при зміні положення щілини.

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λc при показниках заломлення [nL=2 nH=2.4]



(Дана залежність представлена лише для візуального відображення роботи представленого фрагменту програми.)

Наступний фрагмент коду представляє собою виведення графіків які відображають ключову залежність нашого дослідження.

```
import pandas as pd
```

```

# Створення DataFrame з даними графіків
data = {
    'Положення щілини': range(450, WL0 + 1, 50),
    'Висота маленького піку-щілини': peak_heights,
    'Напівширина щілини': slit_widths
}

df = pd.DataFrame(data)

# Виведення таблиці
print(df)

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Введення даних
x1 = (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750)
x2 = (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750)
x3 = (450, 500, 550, 600, 650, 700, 750)
y1 = (0.854501, 0.868450, 0.879960, 0.889620, 0.897841,
0.904923, 0.911088)
y2 = (0.871409, 0.883802, 0.894017, 0.902582, 0.909867,
0.916138, 0.921594 )
y3 = (0.690861, 0.718887, 0.742276, 0.762085, 0.779075,
0.793807, 0.806700)

# Створення полотна для графіків
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 6))

# Побудова першого графіка
ax.plot(x1, y1, marker='o', label='[nL=3 nH=2]')

# Побудова другого графіка
ax.plot(x2, y2, marker='o', label='[nL=3.2 nH=2.8]')

# Побудова третього графіка
ax.plot(x3, y3, marker='o', label='[nL=2 nH=2.4]')

# Налаштування відображення графіків
ax.set_xlabel('λс')

```

```
ax.set_ylabel('Висота маленького піку-щілини')
ax.set_title('Залежність положення щілини від висоти
маленького піку-щілини')
ax.legend()
```

Представлений фрагмент програми відображає залежності висоти маленького піку щілини від значень довжини хвилі яким відповідає положення щілини та залежність напівширини щілини від довжини хвилі яка відповідає положенню щілини для різних значень різних пар значень коефіцієнтів заломлення кожного шару нашої структури.

2.5 Визначення параметрів для зразків пори яких заповнених аналітами.

```
def fun_n_pSi_bin(nSkel, nFill, p):
    n_pSi = 0.5 * (2 * nSkel**2 - nFill**2 - 3 * p *
nSkel**2 + 3 * p * nFill**2 + (8 * nSkel**2 * nFill**2
+ (nFill**2 - 2 * nSkel**2 + 3 * p * nSkel**2 - 3 * p *
nFill**2)**2)**0.5)**0.5
    return n_pSi

def find_porosity(nSkel, nFill, n_target):
    def objective(p):
        return fun_n_pSi_bin(nSkel, nFill, p) -
n_target

    p_solution = brentq(objective, 0, 1)
    return p_solution

nSkel = 3.4
nFill = int(input("Введіть значення показника
заломлення аналіту: "))

p1 = find_porosity(nSkel, nFill, nH)
p2 = find_porosity(nSkel, nFill, nL)

# Задання значень показників заломлення шарів пори яких
заповнені аналітом
```

```

nH_a = 0.5 * (2 * nH**2 - nFill**2 - 3 * p1 * nH**2 + 3 * p1
* nFill**2 + (8 * nH**2 * nFill**2 + (nFill**2 - 2 * nH**2 + 3 *
p1 * nH**2 - 3 * p1 * nFill**2)**2)**0.5)**0.5
nL_a = 0.5 * (2 * nL**2 - nFill**2 - 3 * p2 * nL**2 + 3 * p2
* nFill**2 + (8 * nL**2 * nFill**2 + (nFill**2 - 2 * nL**2 + 3 *
p2 * nL**2 - 3 * p2 * nFill**2)**2)**0.5)**0.5
epsH = nH_a * nH_a
epsL = nL_a * nL_a

```

Даний фрагмент коду описує обчислення ефективного показника заломлення та визначає показник поруватості кремнію, тобто визначає об'ємне співвідношення пор до кремнію для того щоб порахувати ефективні показники заломлення для кожного з шарів nH та nL. Та на їх основі визначає діелектричні показники для побудови нової матриці.

3 Результати дослідження

Однією з першочергових задач в нашому дослідженні, було отримати спектри пропускання для дзеркала Брегга яке складається з шарів поруватого кремнію які в свою чергу мають різну товщину та показники заломлення . Для більш детального та якісного отримання результатів ми дослідити три різних зразки дзеркала Брегга з різною товщиною шарів. Такий підхід дав нам змогу отримати результати для пар поруватого кремнію з різними показниками заломлення та різною поруватістю шарів.

Так як наше дослідження – це моделювання, в такому випадку ми можемо не прив'язуватися до задання саме тих фізичних даних, які потрібні для реального досліду. Тому ми мали змогу задавати не значення товщини для кожного шару, а визначати ці значення в залежності від заданих показників заломлення та довжин хвилі. Обчислення товщини кожного шару кремнію ми виконували за допомогою формули:

$$t = \frac{\lambda}{4 \cdot n},$$

де t – товщина шару, λ – довжина хвилів та n – показник заломлення шару.

Отже, маючи всі перераховані вище параметри ми можемо отримати спектри пропускання для зразків з різною товщиною та поруватістю відповідно, змінюючи довжину хвилі у діапазоні видимого спектру.

Наступною задачею дослідження було визначення спектральних залежностей та даних дзеркала Брегга пори кремнію якого заповнені аналітом. Для цього дослідження ми обрали три різних аналіти – етаилен, метилен та воду. Кожна з цих рідин мають різні показники заломлення, відповідно вони будуть по різному впливати на спектральні дані зразків.

Аналогічно до дослідження структури пори якої не заповнені (заповнення пор в такому випадку вважаємо повітря) ми провели ряд досліджень та вимірювань для трьох різних зразків поруватого кремнію різної товщини яку задавали різні пари значень n_H та n_L .

Тобто при побудові нового зразку Брегівського дзеркала з поруватого кремнію пори якого заповнені водою, етиленом чи метиленом були враховані нові ефективні показники заломлення які ми порахували використовуючи формулу

$$N = \frac{1}{2} \sqrt{2n_1^2 - n_2^2 - 3pn_1^2 + 3pn_2^2 + \sqrt{8n_1^2n_2^2 + (n_2^2 - 2n_1^2 + 3pn_1^2 - 3pn_2^2)^2}},$$

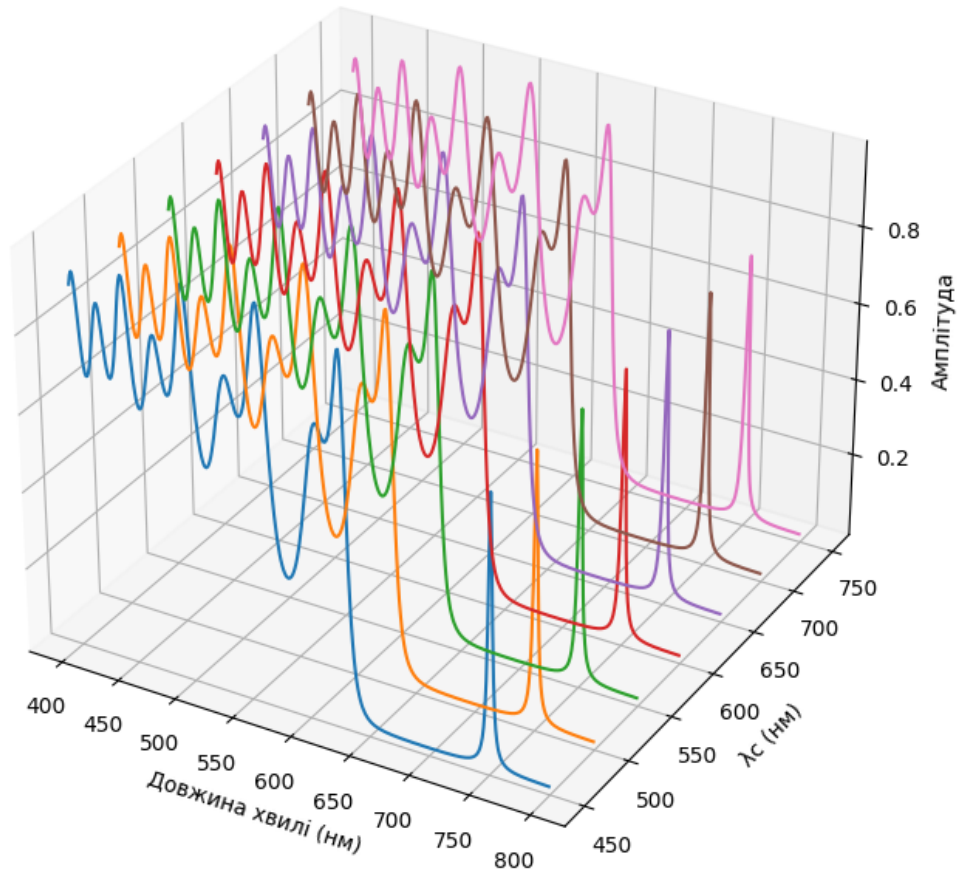
де N – ефективний показник заломлення, n_1 – показник заломлення суцільного кремнію, n_2 – показник заломлення аналіту в порах та p – величина поруватості кремнію.

Так, як наші шари мають різну товщину то і поруватість цих шарів буде різна, тому після додавання аналіту в пори ми отримаємо нові значення показників заломлення для значень n_H та n_L . Але потрібно зауважити, що нам потрібно дослідити структуру з незмінними значеннями для товщини шарів, тому для обчислення товщини шарів t ми використаємо ті ж самі данні для n_H та n_L , що і для показників заломлення кремнію пори якого заповнені повітрям.

3.1 Отримання та аналіз спектральних результатів без аналіту.

Спочатку ми отримали спектр пропускання для зразку який має показники заломлення : $n_H = 3$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2$ – показник заломлення другого шару.

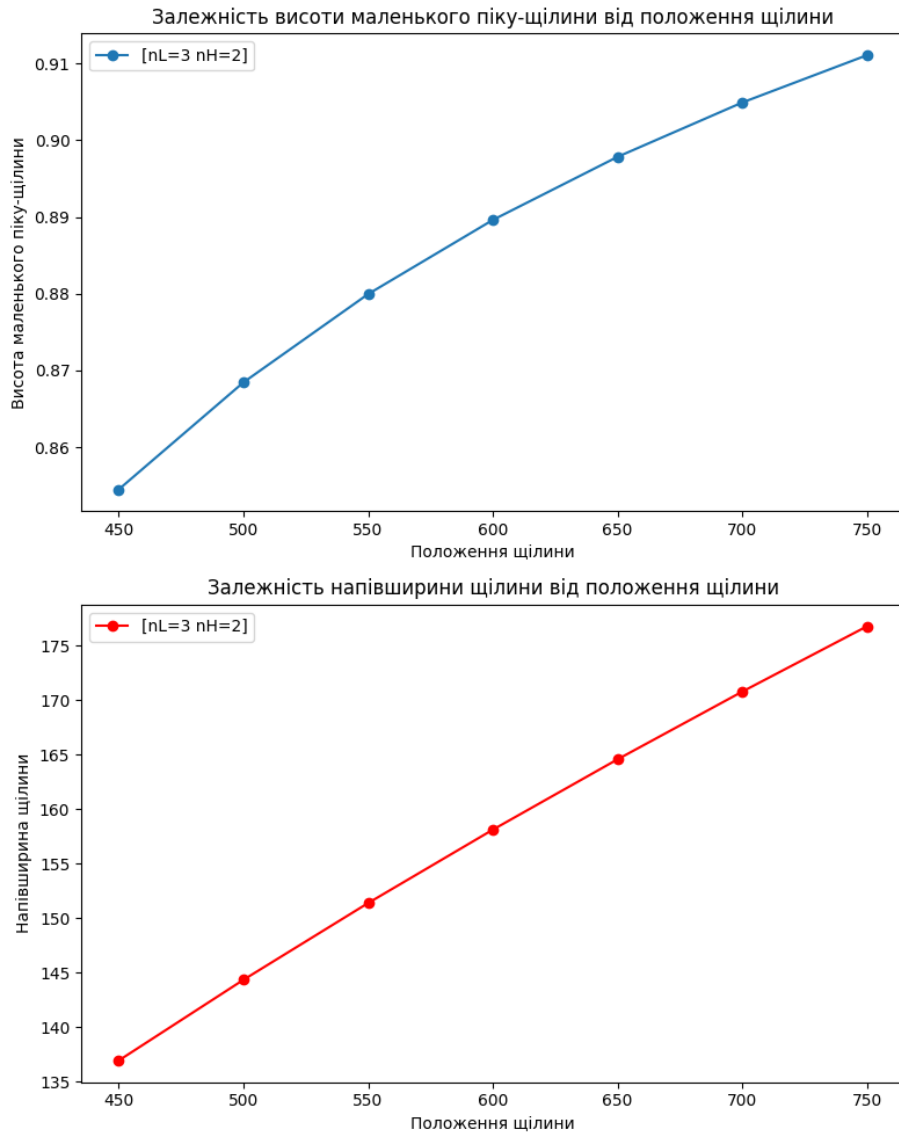
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3$ $n_H=2$]



На даному графіку представлена спектральна залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s (значення довжини хвилі яке відповідає положенню щілини). Тобто, на одному рисунку ми можемо проаналізувати як змінюються коефіцієнт пропускання в залежності від положення щілини, яка в свою чергу впливає на показник поруватості зразку.

Маючи спектральні дані залежності коефіцієнта пропускання від довжини хвилі для декількох різних товщин кремнієвих шарів ми можемо обрахувати такі параметри як висота малого піку щілини та напівширини щілини для різних значень товщини шарів зразку. Відповідно ми можемо проаналізувати ці дані побудувавши дві залежності, а саме залежність

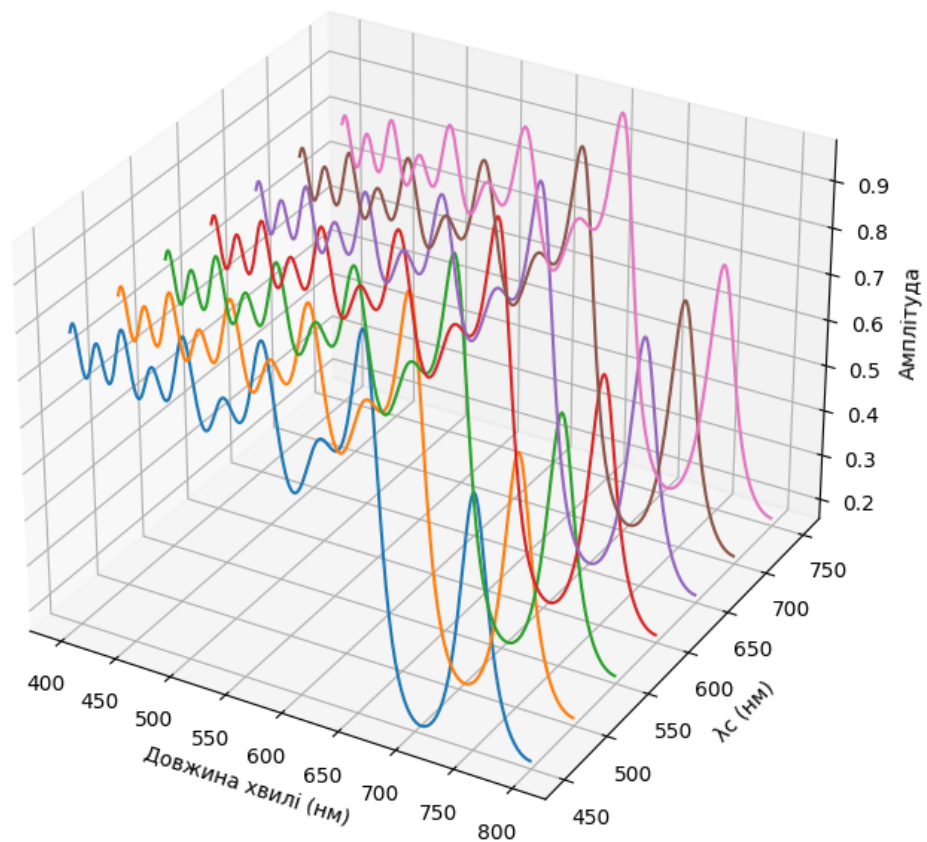
висоти малого піку щілини від положення щілини та залежність напівширини щілини від положення щілини.



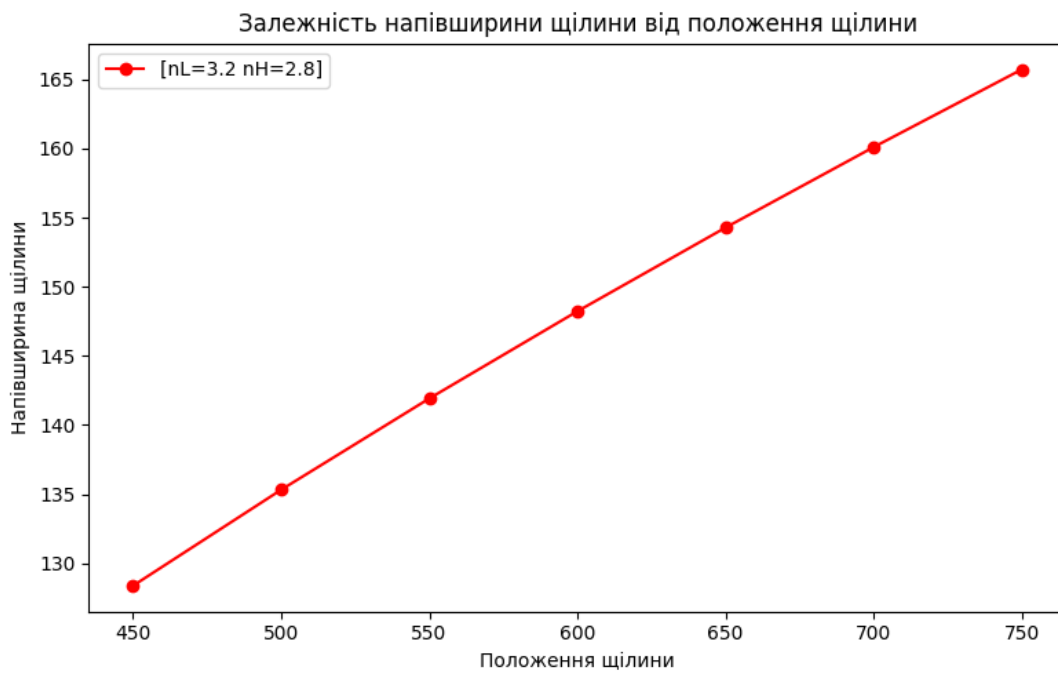
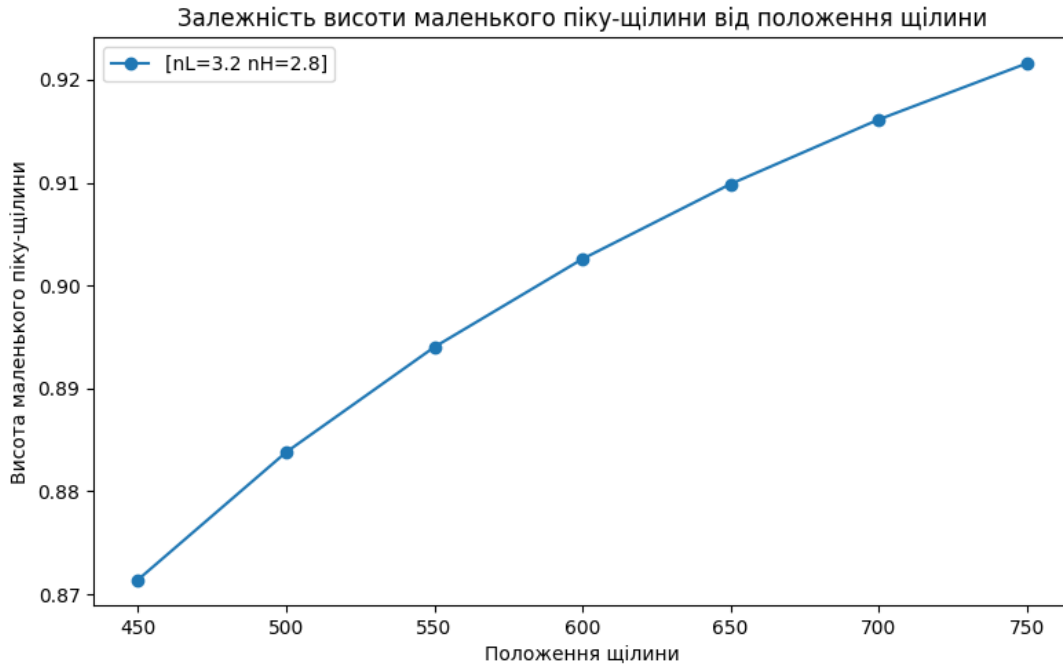
Аналогічно до першого зразку дзеркала Брегга, ми виконали обрахунок спектральних параметрів для двох інших пар значень показників заломлення.

Для значень $nH = 2.8$ – для першого шару та $nL = 3.2$ – для другого шару ми отримали наступну спектральну залежність

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3.2$ $n_H=2.8$]

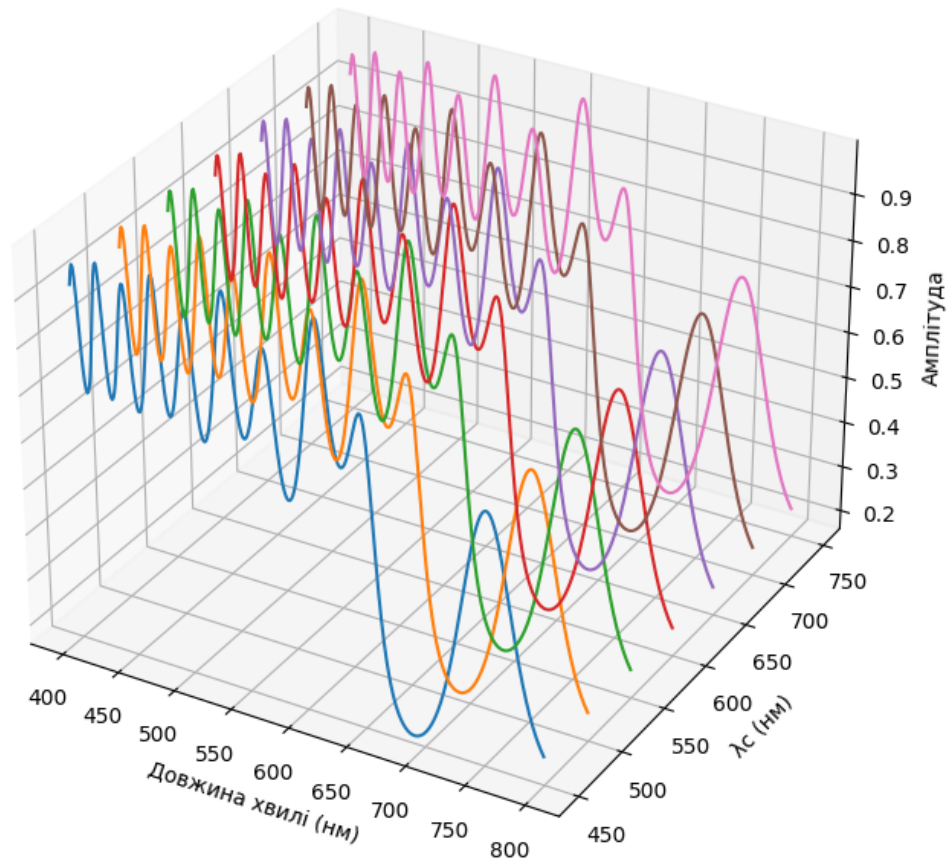


Для даної спектральної залежності ми також порахували висоту малого піку щілини та напівширину щілини для різних значень товщини шарів зразку та побудували залежність висоти малого піку щілини від положення щілини та залежність напівширини щілини від положення щілини.



Для значень $nH = 2.4$ – для першого шару та $nL = 2$ – для другого шару ми отримали наступну спектральну залежність

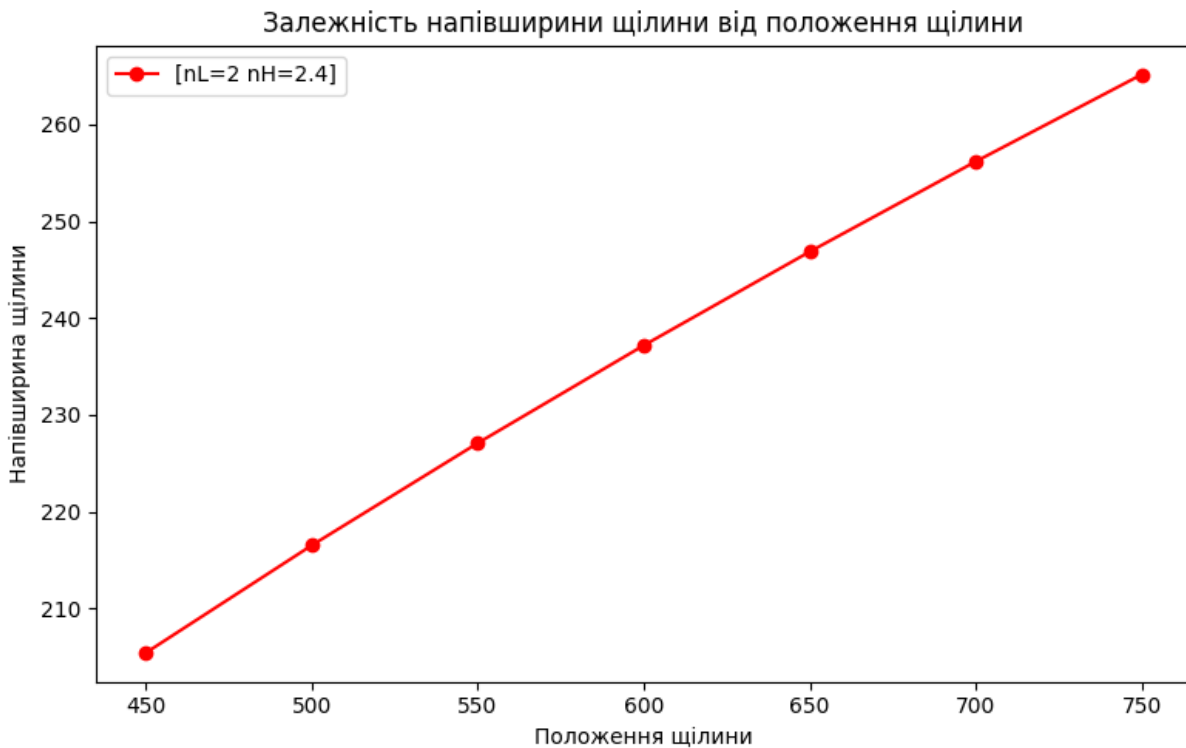
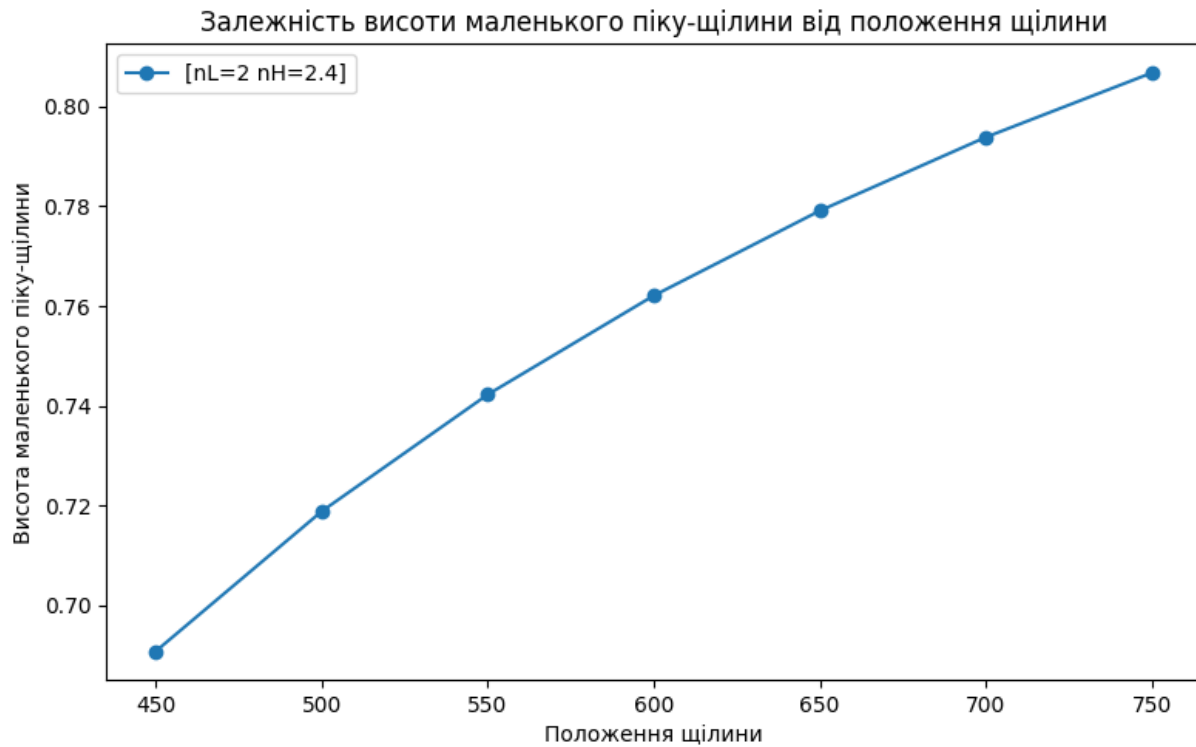
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=2$ $n_H=2.4$]



Для останньої спектральної залежності ми також отримали значення висоти малого піку щілини та напівширини щілини для різних значень товщини шарів зразку та побудували залежність висоти малого піку щілини від положення щілини та залежність напівширини щілини від положення щілини.

Отже, проаналізувавши графіки спектральних залежностей амплітуди від довжини хвилі та λ_s (значення довжини хвилі яке відповідає положенню щілини) для різни пар значень n_H та n_L можна сказати, що залежність коефіцієнта пропускання від довжини хвиль є нелінійною та залежить від конкретних параметрів, таких як поруватість шарів та їх товщина. Існує

широкий спектр довжин хвиль, для яких коефіцієнт пропускання може мати значні варіації.



Це може бути пов'язано з інтерференцією світла між різними шарами та їх взаємодією. Виявляються явні максимуми та мінімуми коефіцієнта пропускання при певних довжинах хвиль. Це свідчить про наявність резонансних ефектів, коли світло взаємодіє зі структурою шарів у такий спосіб, що певні довжини хвиль відбиваються або пропускаються з більшою інтенсивністю, що і пояснює наявність щілини між шарами.

Також змінюючи параметри структури шарів, такі як їх товщина, можна впливати на коефіцієнт пропускання світла в різних діапазонах довжин хвиль, що важливо для розробки оптичних матеріалів та пристроїв з бажаними оптичними властивостями.

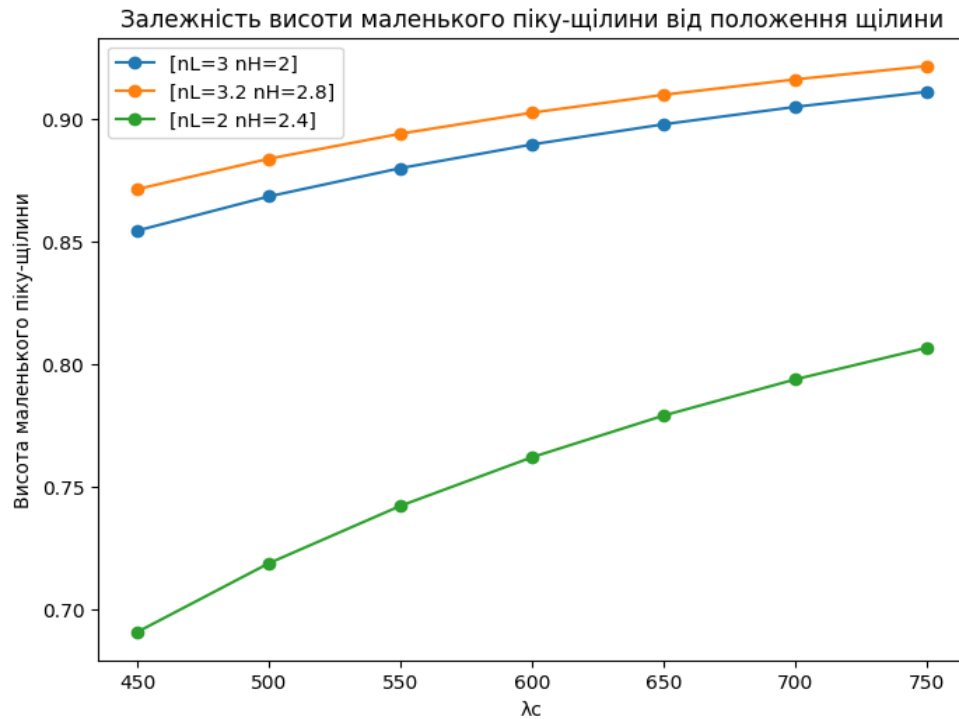
Для більшого розуміння та кращого аналізу зміни напівширини щілини та малого піку щілини в залежності від положення щілини ми побудуємо криві залежностей для різних значень nH та nL на одному графіку.

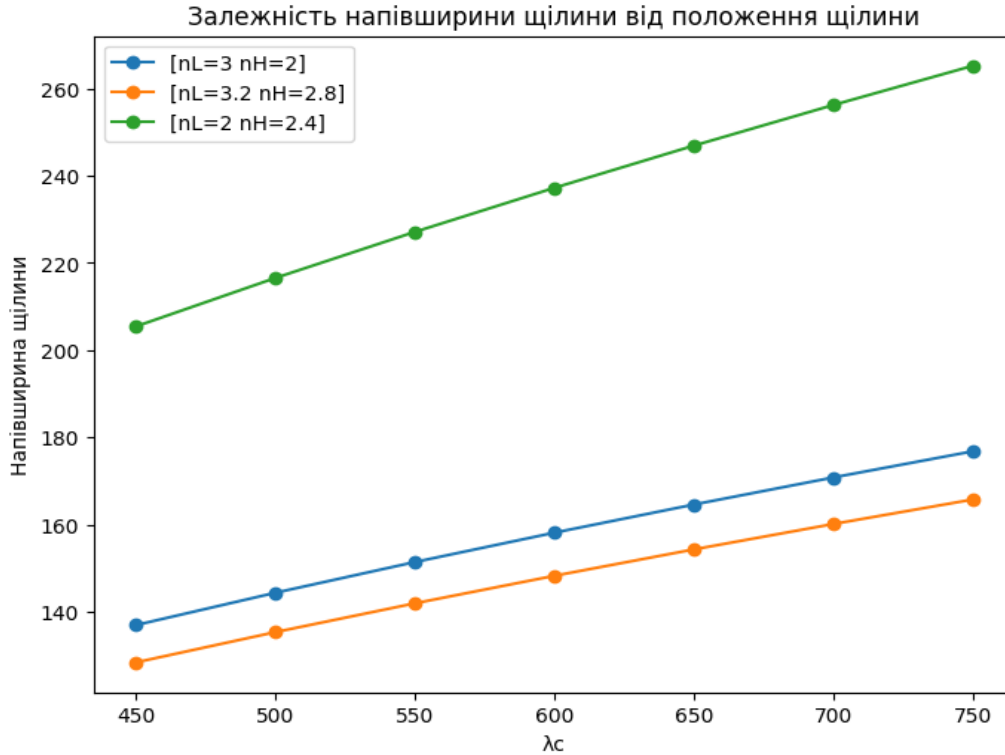
Графік залежності висоти маленького піку щілини від положення щілини демонструє, що висота маленького піку-щілини змінюється зі зміною положення щілини. Це пов'язано з інтерференцією світла, яке проходить крізь щілину. При певних значеннях положення щілини відбувається конструктивна інтерференція, що призводить до максимальної висоти піку-щілини. При інших значеннях положення щілини відбувається деструктивна інтерференція, що зменшує висоту піку-щілини до мінімуму. Це є характерною ознакою інтерференції та дифракції світла, яка відбувається на щілині.

Графік залежності напівширини щілини від положення щілини вказує на те, що напівширина щілини збільшується зі збільшенням положення щілини. Це відображає фізичний факт: ширина щілини впливає на розсіяння світла, що проходить через неї. Зі збільшенням положення щілини та

розширення її отвору збільшується розсіяння світла, що призводить до збільшення напівширини щілини.

Така тенденція спостерігається для всіх пар значень показників заломлення шарів різних товщин nH та nL . Такі зміни вказують на те, що параметри щілини, такі як положення і ширина, мають великий вплив на властивості інтерференційних та дифракційних явищ.





3.1.1 Дані колориметричного аналізу

Також дуже важливим пунктом нашого дослідження було отримання колориметричних даних для досліджуваних спектрів. Основними показниками колориметричного аналізу спектрів є домінантна довжина хвилі та показник ідеальності. Тобто довжину хвилі, яка має найбільший вплив на значення спектральних показників (домінантна довжина хвилі) та показник який визначає наскільки добре система нашого дослідження відповідає ідеальним умовам (показник ідеальності).

Дані колориметричного аналізу ми записали до таблиці для різних значень nH та nL .

nH = 3 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	687	0.2589943256849948
500	763	0.5403475979743508

550	409	0.7466493356368189
600	446	0.43158811347904075
650	483	0.6080763939265414
700	521	0.6563552285764629
750	558	0.6575546701435158

nH = 2.8 та nL = 3.2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	524	0.19190220673065408
500	438	0.4501719452040246
550	641	0.5730806579846048
600	699	0.5779057292725291
650	757	0.5433143209455489
700	613	0.5509393483334952
750	657	0.5703349558269386

nH = 2.4 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	766	0.509490117194632
500	651	0.8197888878368307
550	716	0.6317406430617749
600	425	0.5796584417576023
650	460	0.7868082549466868
700	496	0.6349967090700986
750	531	0.6820953515518622

Отже, аналізуючи дані про доміную довжину хвилі та показник ідеальності для різних значень показників заломлення (n_H і n_L), можна зазначити те, що зі збільшенням доміную довжини хвилі від 450 до 750 нм для заданих значень показників заломлення $n_H = 2.8$ та $n_L = 3.2$ показник ідеальності поступово зростає від 0.19 до 0.66 та для $n_H = 2.4$ та $n_L = 2$ показник ідеальності змінюється від 0.51 до 0.82. Це означає, що кольорова відтвореність світла від джерела з цими параметрами покращується, близько

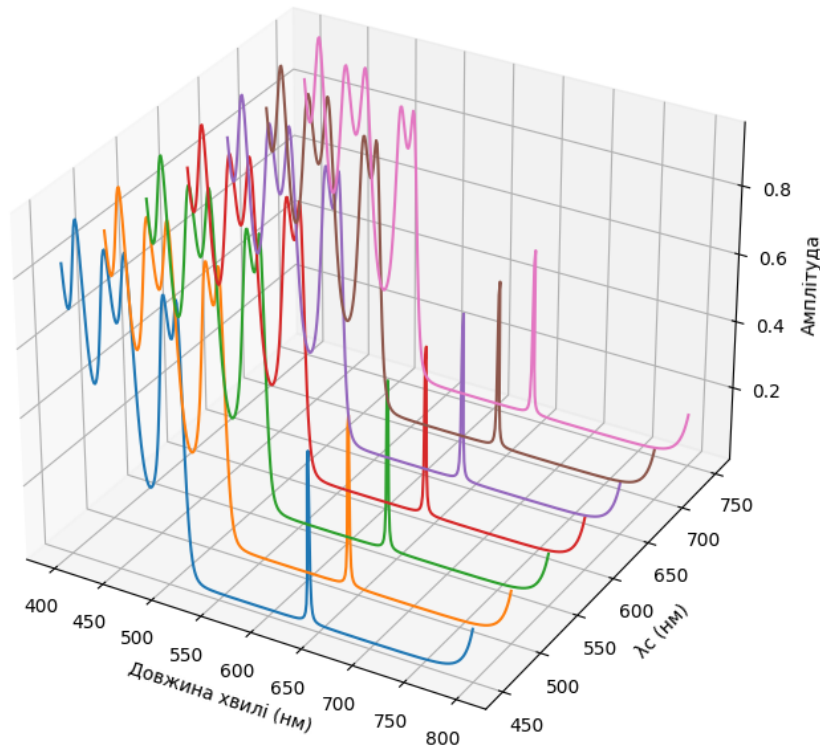
до натурального освітлення. Варіюючи показники заломлення, можна отримати різні значення домінантної довжини хвилі та показника ідеальності. Це свідчить про те, що оптичні характеристики матеріалів впливають на спектральний склад світла, який вони відбивають або пропускають.

Значення домінантної довжини хвилі відображають пікові значення в спектрі світла, яке відбивається від оптичної структури. Ці піки можуть залежати від параметрів шарів та їх товщини. Узагальнюючи, змінюючи показники заломлення та інші параметри структури шарів, можна керувати домінантною довжиною хвилі та показником ідеальності, що впливає на кольорову відтвореність світла.

3.2 Результати дослідження зразку з етанолом.

Після заповнення пор етанолом зміняться показники заломлення для шарів, звідси зміняться і спектральні показники та залежності для досліджуваної структури.

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3$ $n_H=2$] з етанолом



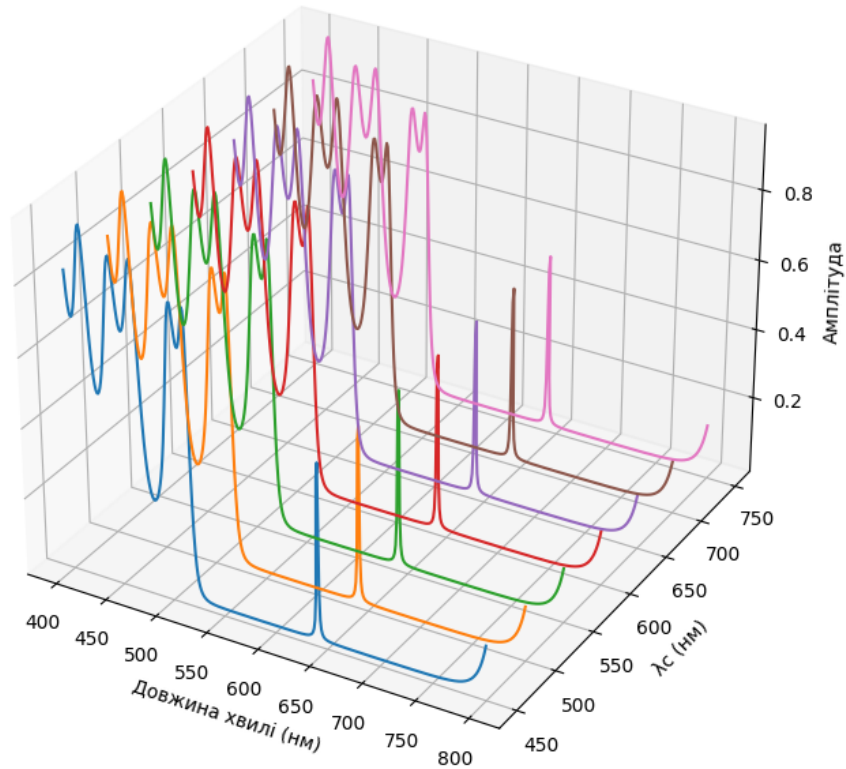
Спочатку ми отримали спектр пропускання для зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $n_H = 3$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2$ – показник заломлення другого шару.

На даному графіку представлена спектральна залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s (значення довжини хвилі яке відповідає положенню щілини) для зразку пори кремнію якого заповнені етанолом. Тобто, на одному рисунку ми можемо проаналізувати як змінюються коефіцієнт пропускання в залежності від положення щілини, яка в свою чергу впливає на показник поруватості зразку для дзеркала Брегга на основі поруватого кремнію, пори якого заповнені етанолом.

Аналогічно до першого зразку дзеркала Брегга пори кремнію якого заповнені етанолом, ми виконали обрахунок спектральних параметрів для двох інших пар значень показників заломлення.

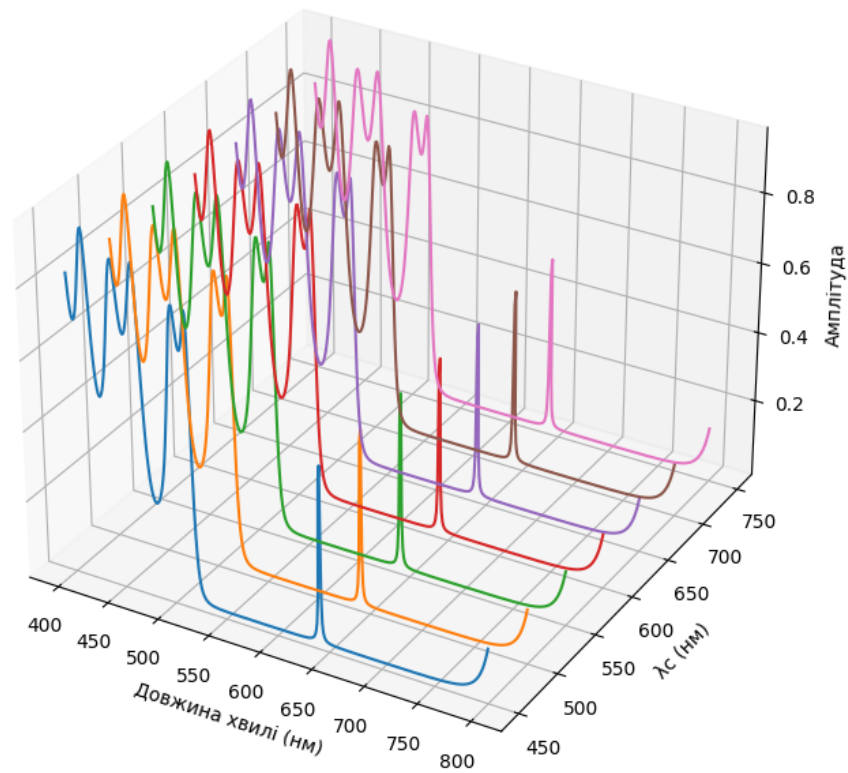
Для значень $nH = 2.8$ – для першого шару та $nL = 3.2$ – для другого шару ми отримали наступну спектральну залежність

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$nL=3$ $nH=2$] з етанолом



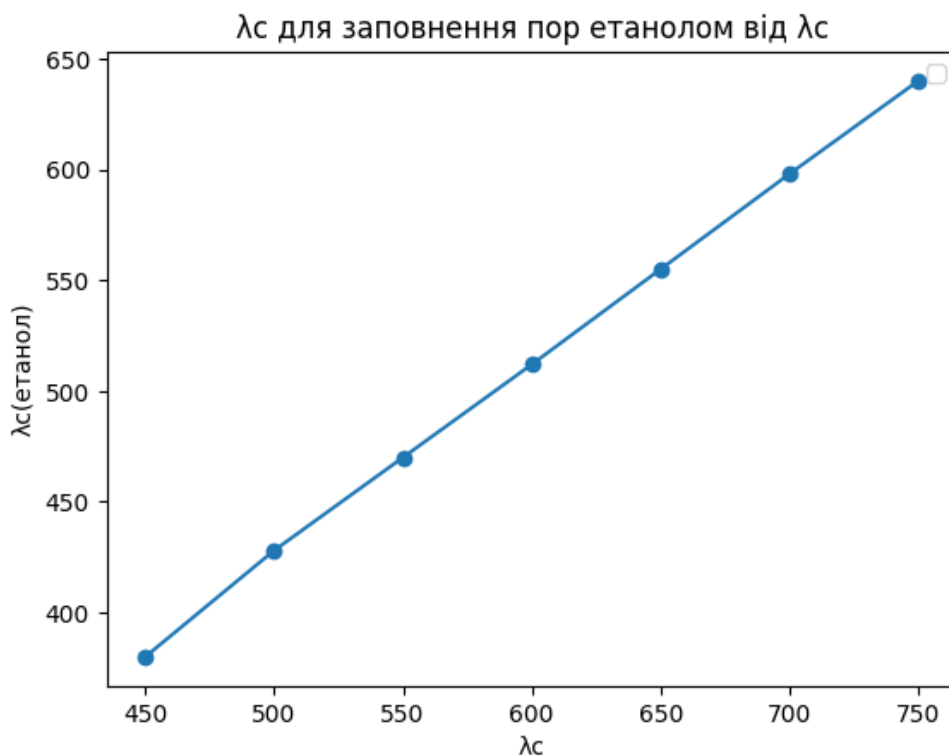
І для значень спектр пропускання зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $nH = 2$ – показник заломлення першого шару та $nL = 2.4$ – показник заломлення другого шару.

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3$ $n_H=2$] з етанолом



Отже, порівнявши спектри для зразків заповнених етиленом та повітрям можна зробити висновок, що змінюючи значення n_L та n_H на ефективні значення показників заломлення з урахуванням заповнення пор кремнію етиленом, ми впливаємо на показники заломлення шарів. Така зміна призводить до зміни формування градієнта показника заломлення між шарами та середовищем навколо. Тобто ми впливаємо на загальну ефективність та поведінку оптичної системи, що призводить до змін положення щілини. Заповнення пор аналітом може змінювати показники заломлення та впливати на процеси розсіювання світла, які впливають на форму спектру пропускання.

Також важливим показником який нам потрібно врахувати це чутливість, яка відобразить залежність зсуву щілини. Чутливість відображає, наскільки чутливо вимірювальна система реагує на зміни вхідних параметрів або зміни в середовищі. В нашому випадку чутливість можна розглядати як відношення зміни зсуву щілини до зміни концентрації етанолу.



Для того, щоб визначити чутливість S для зміни заповнення пор кремнію етанолом можна скористатися формулою:

$$S = \frac{\Delta\lambda_c}{\Delta n},$$

де $\Delta\lambda_c = \lambda_c - \lambda_c(\text{ан.})$ та $\Delta n = n(\text{ан.}) - n$,

де $\Delta\lambda_c$ – різниця положення щілини для пор заповнених повітрям та аналітом, Δn – різниця показників заломлення аналіту та повітря.

Використавши формулу ми отримаємо таблицю в ми спостерігаємо

Положення щілини	Чутливість
------------------	------------

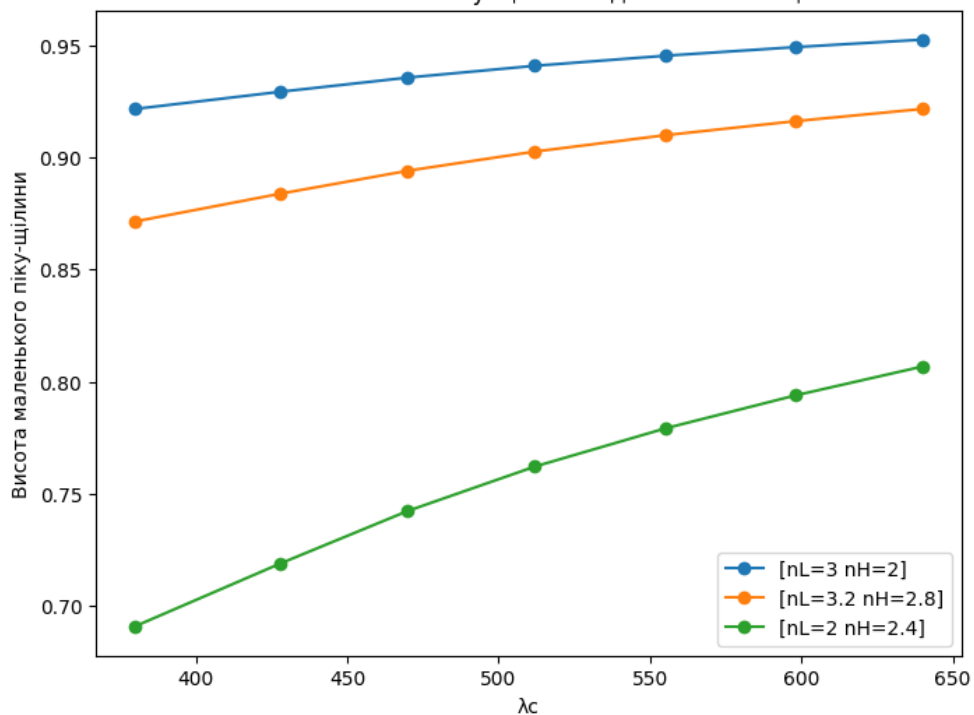
450	194.44
500	200
550	222.22
600	244.44
650	263.89
700	283.33
750	305.56

залежність чутливості від довжини хвилі якій відповідає положення щілини.

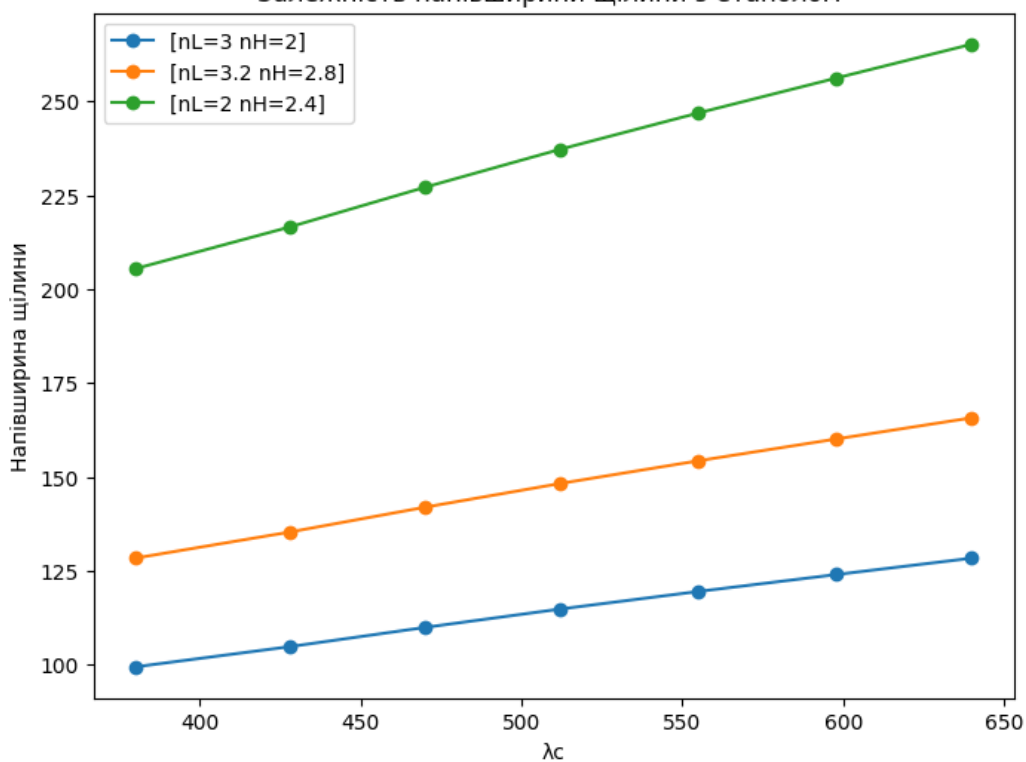
На графіку можна побачити, як змінюється положення щілини з заповненими порами етанолом в порівнянні з заповнення пор повітрям.

Маючи спектральні данні залежності коефіцієнта пропускання від довжини хвилі для декількох різних товщин кремнієвих шарів ми можемо обрахувати такі параметри як висота малого піку щілини та напівширини щілини для різних значень пар показників заломлення для кремнію пори якого заповнені етанолом. Відповідно ми можемо проаналізувати ці данні побудувавши дві залежності, а саме залежність висоти малого піку щілини від положення щілини та залежність напівширини щілини від положення щілини з врахуванням вже ефективного показника заломлення для різних значень n_H та n_L .

Залежність висоти маленького піку-щілини від положення щілини з етанолом



Залежність напівширини щілини з етанолом



Аналогічно як і для зразку пори якого заповнені повітрям, графік залежності висоти маленького піку щілини від положення щілини для

заповнення пор етиленом показує, що висота маленького піку-щілини змінюється зі зміною положення щілини. При інших значеннях положення щілини відбувається деструктивна інтерференція, що зменшує висоту піку-щілини до мінімуму, що є характерною ознакою інтерференції та дифракції світла, яка відбувається на щілині.

Графік залежності напівширини щілини від положення щілини для заповнення пор етиленом вказує на те, що напівширина щілини збільшується зі збільшенням положення щілини. Це відображає фізичний факт, що ширина щілини впливає на розсіяння світла, що проходить через неї.

Якщо порівняти ці значення для заповнення пор етиленом та повітрям, можна сказати, що зміна показників заломлення речовини впливає на параметри висоти маленького піку-щілини та напівширини щілини через явище заломлення світла. Заломлення світла відбувається, коли світловий промінь переходить з однієї речовини в іншу з різними показниками заломлення. Показник заломлення визначає, як сильно світловий промінь змінює свою швидкість та напрямок при переході з однієї речовини в іншу. Коли світло переходить через щілину, воно заломлюється на краях щілини і утворює інтерференційні смуги. Заломлення світла відбувається згідно з законом заломлення, який стверджує, що кут заломлення світлового променя залежить від показників заломлення речовини, з якої відбувається перехід. Кут заломлення впливає на шлях, який промінь пройде через щілину, і тим самим впливає на висоту маленького піку-щілини. Отже, ширина щілини також впливає на заломлення світла та визначає, як багато світлових хвиль промінь може пройти через щілину. Чим ширша щілина, тим більше світла може пройти через неї. Заломлення світла на краях щілини залежить від її ширини, що впливає на напівширину щілини. Таким чином, зміна показників заломлення повітря та етилену впливає на заломлення світла, кути

заломлення та шлях, який світло пройде через щілину. Це в свою чергу призводить до зміни висоти маленького піку-щілини та напівширини щілини, які відображаються на графіках.

3.2.1 Дані колориметричного аналізу зразку з етанолом

nH = 3 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	799	0.3563912696695239
500	663	0.3493213871680264
550	730	0.7349598893569755
600	796	0.5420729626191203
650	402	0.4314500486673634
700	433	0.4920119653926969
750	416	0.6367258659144268

nH = 2.8 та nL = 3.2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	716	0.2206872458586383
500	795	0.13451459883921268
550	644	0.25599899560223557
600	702	0.695194664373699
650	761	0.48866631107295444
700	418	0.6163008985476219
750	447	0.5459677464389897

nH = 2.4 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	482	0.19378347922429587
500	536	0.5218577444190901
550	590	0.521802914502453
600	643	0.7847526731633644
650	697	0.48854814252972983
700	751	0.5752137276327096
750	580	0.6339267147305996

Домінантна довжина хвилі знаходиться в такому самому діапазоні як і для заповнення пор повітрям. У цьому випадку, ми спостерігаємо іншу тенденцію: збільшення довжини хвилі при збільшенні її значень. Це означає, що інтерференційні максимуми зміщуються в бік більших кутів.

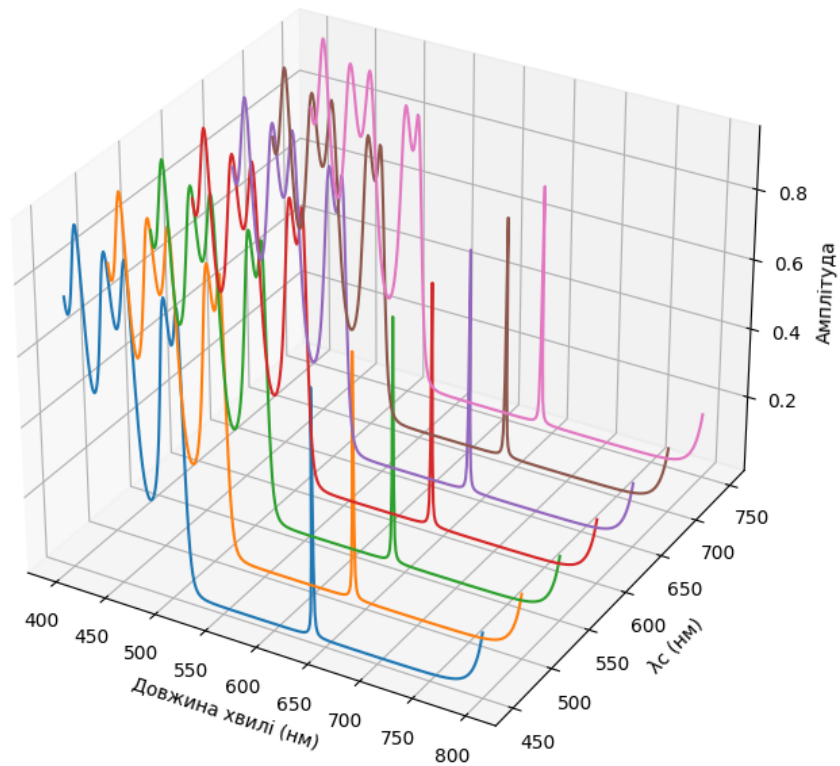
Показник ідеальності також зазнає змін. Значення показника ідеальності коливаються в діапазоні від 0.19 до 0.75. Ми спостерігаємо, що більша частина значень показника ідеальності для пор, заповнених етанолом, нижча порівняно з порами, заповненими повітрям.

Загалом, зміна показників заломлення та доміантних довжин хвиль при зміні заповнення пор може пояснюватися впливом оптичних властивостей етанолу на інтерференційні явища. Етанол має інший показник заломлення порівняно з повітрям, що призводить до зміни характеристик інтерференційного взаємодії в структурі дзеркала Брегга. Це може впливати на зсув інтерференційних максимумів та зміну загального розподілу інтенсивності в спектрі. Такі зміни можуть бути викликані зміною оптичних властивостей середовища, через яке поширюється світло та взаємодіє з порами. Враховуючи ці аспекти, можна зробити припущення, що зміна заповнення пор (від повітря до етанолу) призводить до зміни оптичних властивостей структури дзеркала Брегга і, відповідно, до зміни параметрів доміантної довжини хвилі та показника ідеальності.

3.3 Результати дослідження зразку з метанолом.

Спочатку ми отримали спектр пропускання для зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $n_H = 3$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2$ – показник заломлення другого шару.

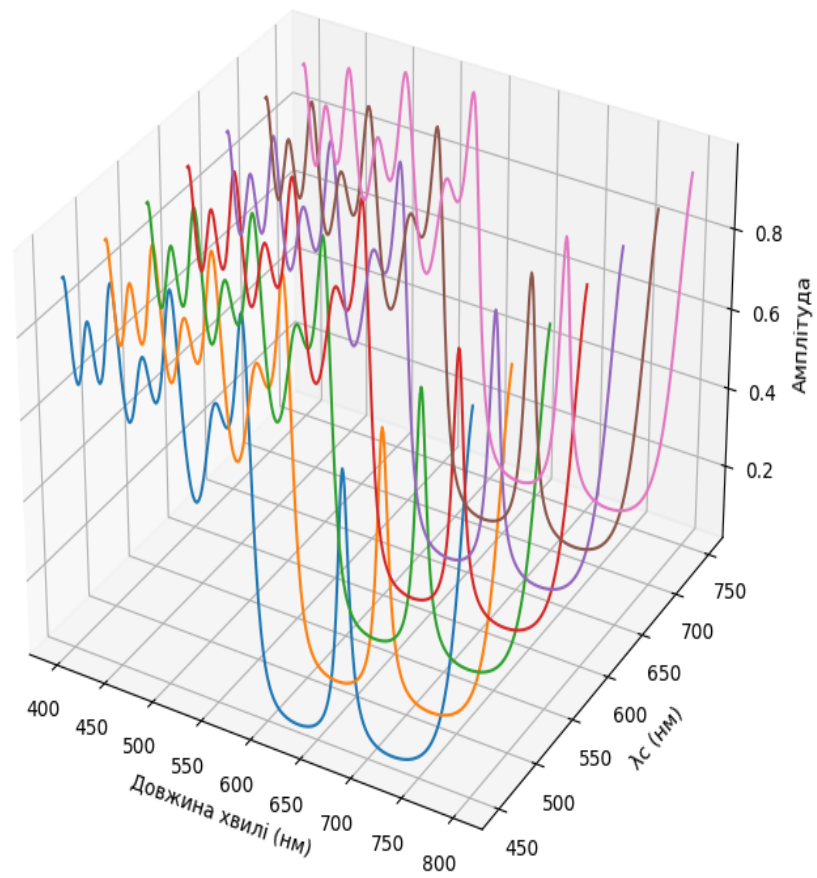
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_c при показниках заломлення [$n_L=3$ $n_H=2$] з метанолом



Аналогічно до першого зразку дзеркала Брегга пори кремнію якого заповнені метанолом, ми виконали обрахунок спектральних параметрів для двох інших пар значень показників заломлення.

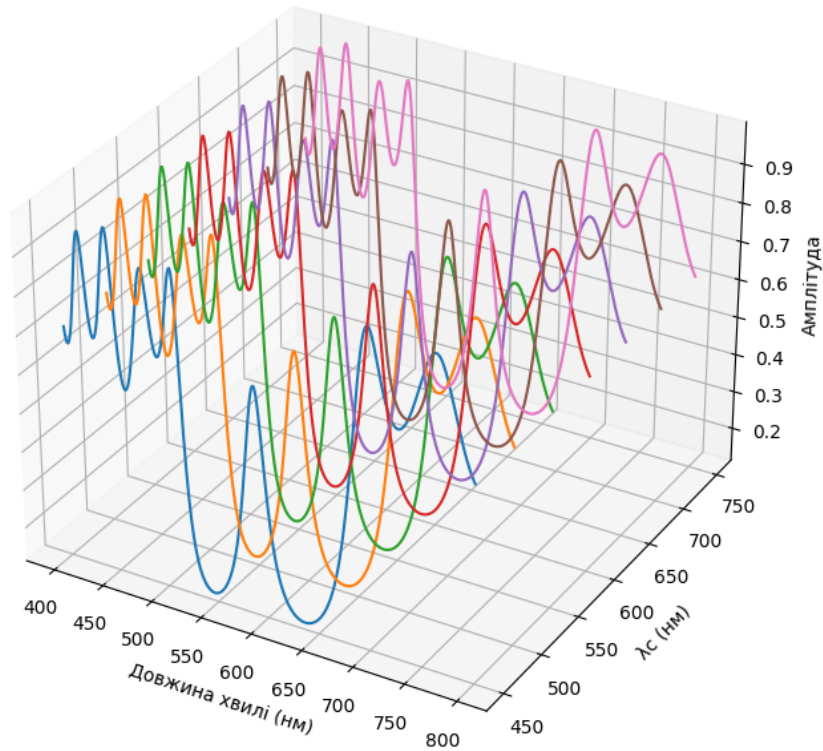
Для значень $n_H = 2.8$ – для першого шару та $n_L = 3.2$ – для другого шару ми отримали наступну спектральну залежність

Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3.2$ $n_H=2.8$] з метанолом



І для значень спектр пропускання зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $n_H = 2$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2.4$ – показник заломлення другого шару.

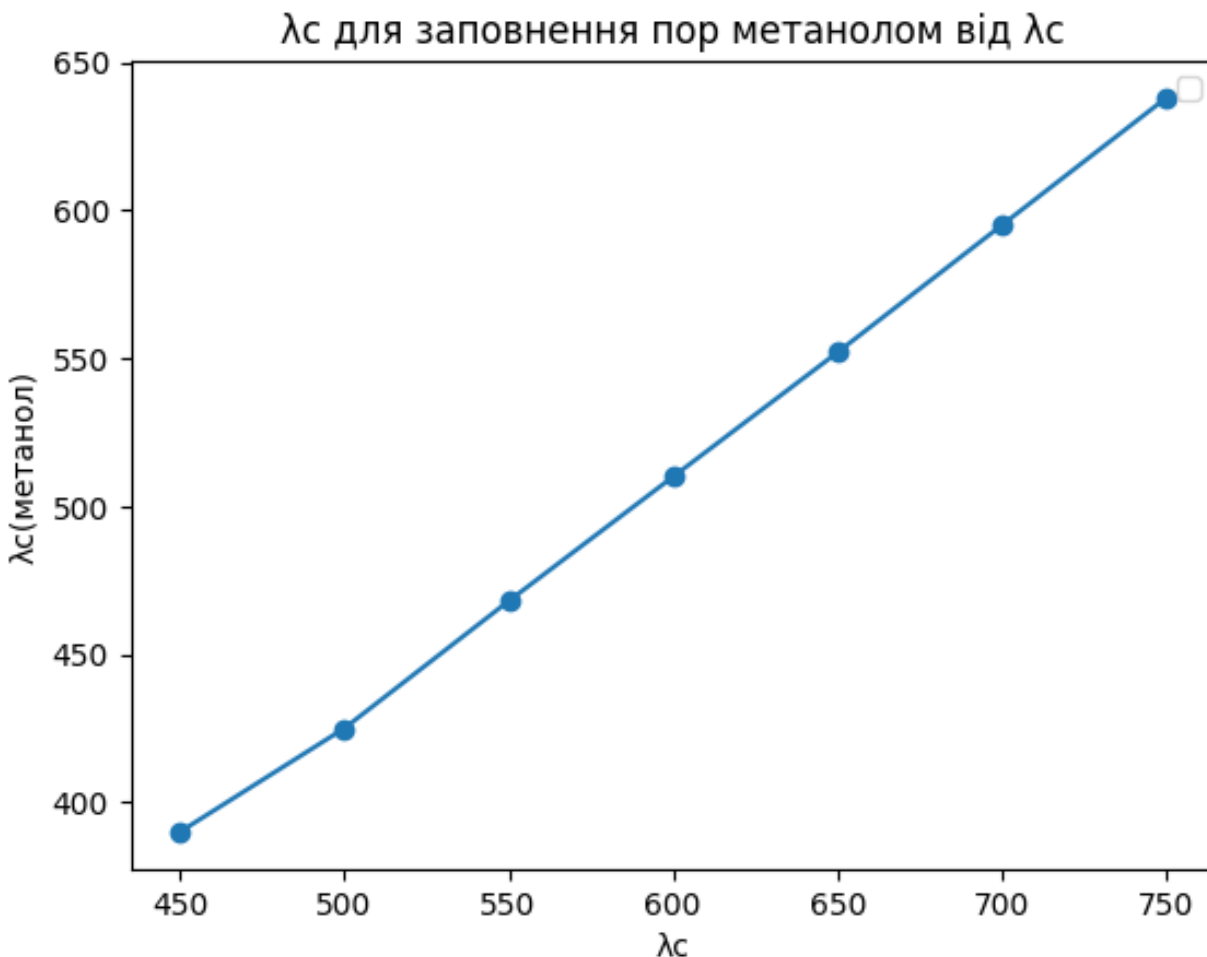
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_c при показниках заломлення [$n_L=2$ $n_H=2.4$] з метанолом



В даному випадку ми також бачимо зсув показників довжин хвиль які відповідають щілині, щоб проаналізувати цю залежність ми додамо дані чутливості до таблиці, яка відобразить залежність зсуву щілини.

Положення щілини	Чутливість
450	181.82
500	227.27
550	248.48
600	272.73
650	296.97
700	318.18
750	339.39

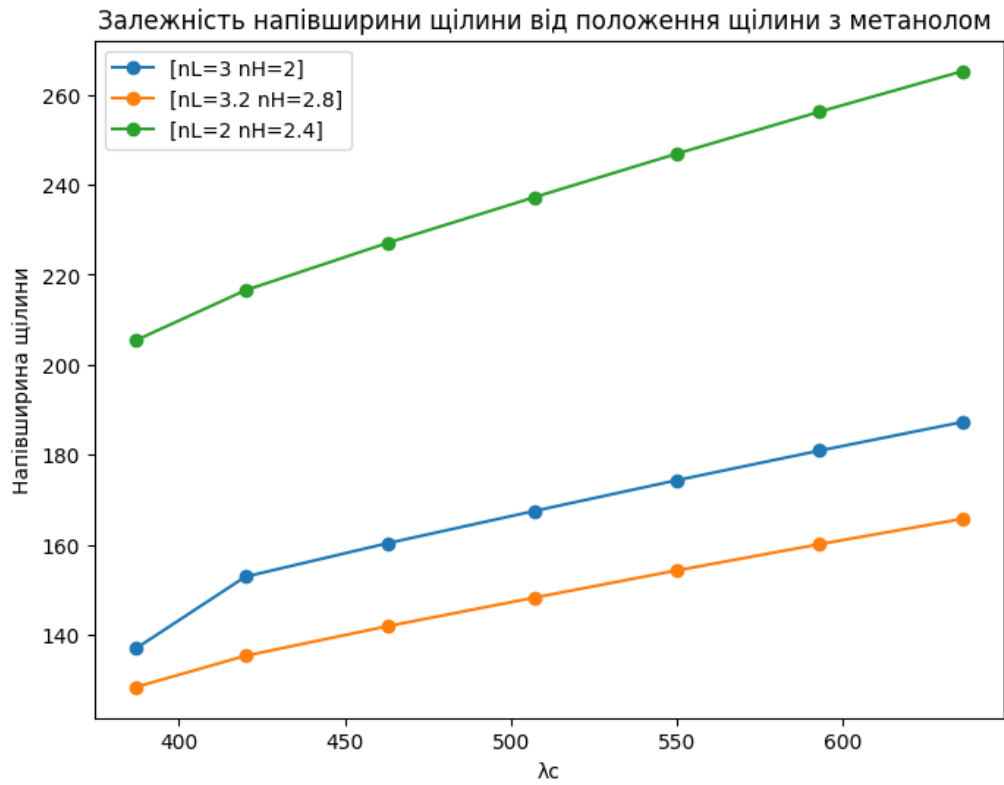
Також побудуємо графік залежності зміни положення щілини з заповненими порами метанолом в порівнянні з заповнення пор повітрям.



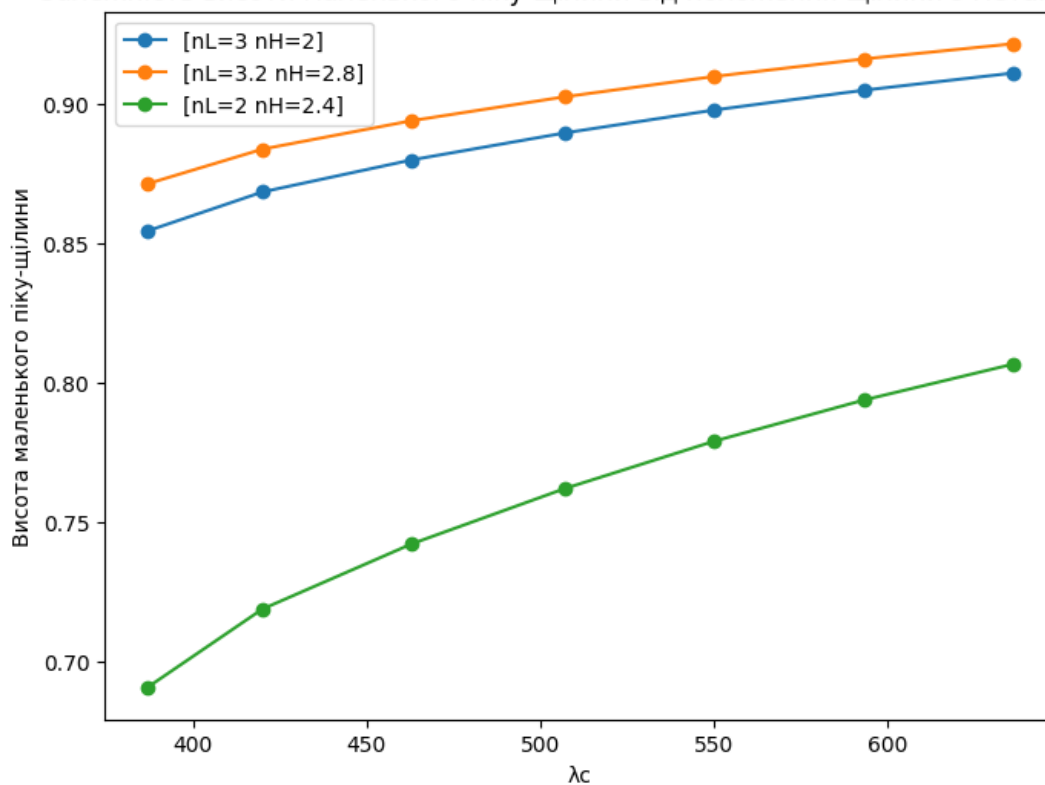
Аналогічно як і для зразку пори якого заповнені повітрям, графік залежності висоти маленького піку щілини від положення щілини для заповнення пор метилом показує, що висота маленького піку-щілини змінюється зі зміною положення щілини. При інших значеннях положення щілини відбувається деструктивна інтерференція, що зменшує висоту піку-щілини до мінімуму, що є характерною ознакою інтерференції та дифракції світла, яка відбувається на щілині.

Графік залежності напівширини щілини від положення щілини для заповнення пор метилом вказує на те, що напівширина щілини збільшується зі збільшенням положення щілини. Це відображає фізичний

факт, що ширина щілини впливає на розсіяння світла, що проходить через неї.



Залежність висоти маленького піку-щілини від положення щілини з метанолом



3.3.1 Дані колориметричного аналізу зразку з метанолом

nH = 3 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	796	0.22635067425883328
500	661	0.37535020245928183
550	728	0.2787508232557102
600	794	0.4177196272083866
650	400	0.30391456355660246
700	412	0.56561117246772
750	413	0.6711459857035904

nH = 2.8 та nL = 3.2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	482	0.19116726858438693
500	536	0.04578874739695579

550	589	0.5234945505075588
600	643	0.7809527141938375
650	697	0.49278231092873026
700	750	0.5790514756498004
750	579	0.6271682461346978

nH = 2.4 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	710	0.3331011801285254
500	789	0.06699966118932657
550	639	0.026941509460022807
600	697	0.6442937497717094
650	755	0.5819413110477814
700	414	0.7139434319242086
750	443	0.5954569757546737

Аналогічно до всіх попередніх випадків для пор, заповнених метанолом спостерігається схожий тренд зі зміною доміантної довжини хвилі та показника ідеальності. Проте значення показника ідеальності для кожної довжини хвилі відрізняється від відповідних значень при заповненні пор повітрям. Зміна параметрів може бути обумовлена впливом властивостей метанолу на взаємодію світла з пористим кремнієм. Різниця в показнику ідеальності може бути пов'язана зі зміною оптичних властивостей речовини, таких як показник заломлення та поглинання світла.

Загалом, зміна заповнювача пор впливає на взаємодію світла з дзеркалом Брегга, що відображається в зміні доміантної довжини хвилі та показника ідеальності. Детальний фізичний аналіз може вимагати додаткових досліджень та врахування інших факторів, що впливають на властивості матеріалів та структури дзеркала.

3.4 Результати дослідження зразку з водою.

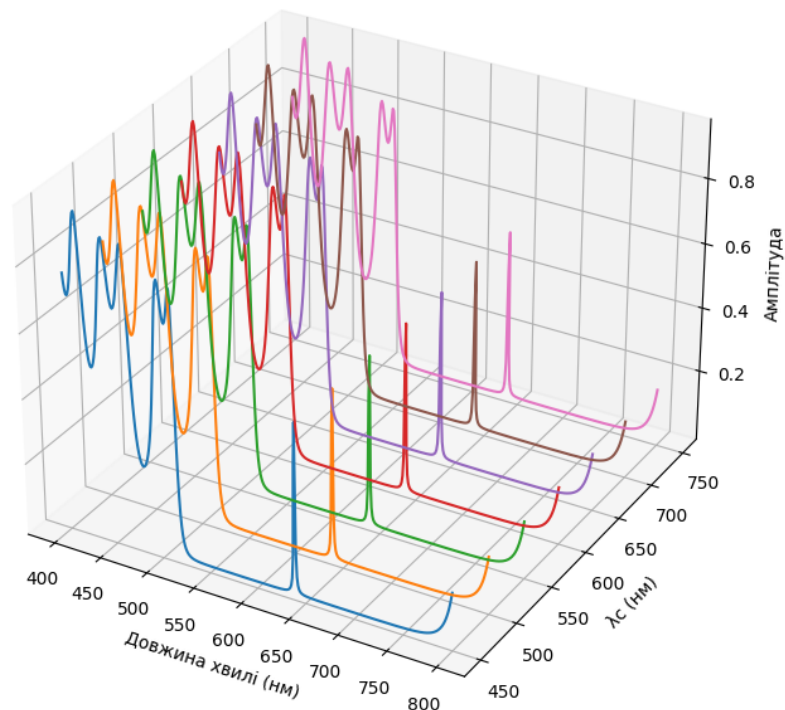
Спочатку ми отримали спектр пропускання для зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $n_H = 3$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2$ – показник заломлення другого шару.

Аналогічно до першого зразку дзеркала Брегга пори кремнію якого заповнені водою, ми виконали обрахунок спектральних параметрів для двох інших пар значень показників заломлення.

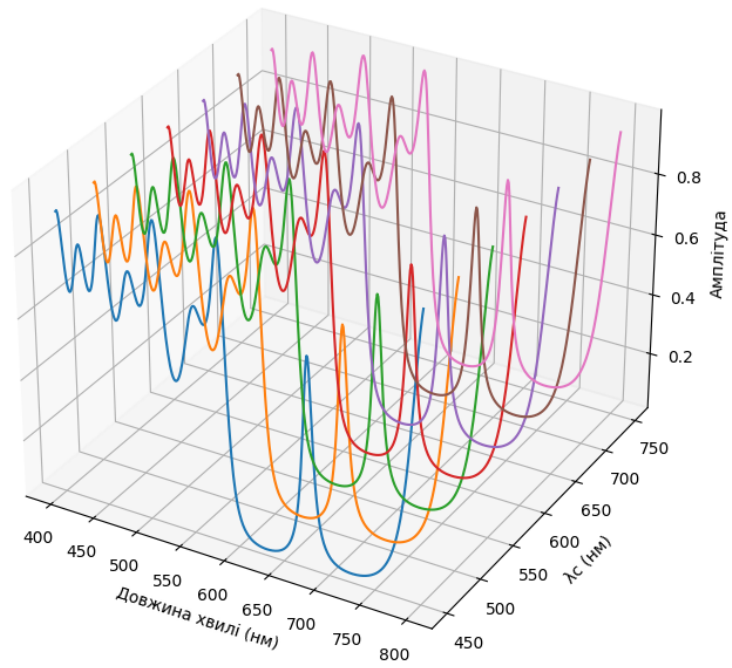
Для значень $n_H = 2.8$ – для першого шару та $n_L = 3.2$ – для другого шару ми отримали наступну спектральну залежність.

І для значень спектр пропускання зразку товщина шарів якого відповідає показникам заломлення $n_H = 2$ – показник заломлення першого шару та $n_L = 2.4$ – показник заломлення другого шару.

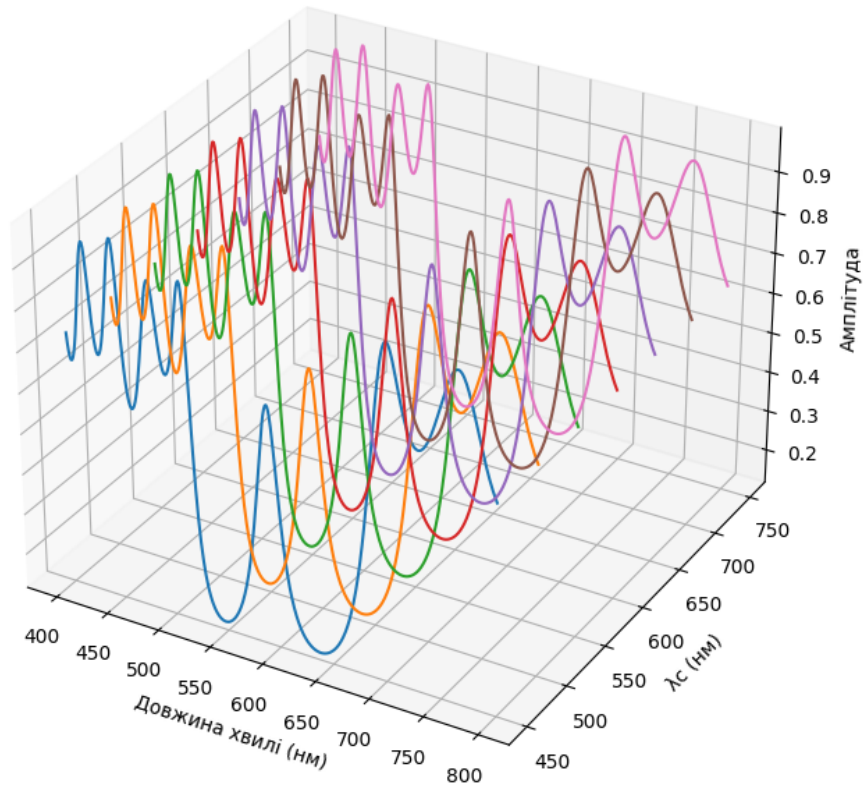
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3$ $n_H=2$] з водою



Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_s при показниках заломлення [$n_L=3.2$ $n_H=2.8$] з водою



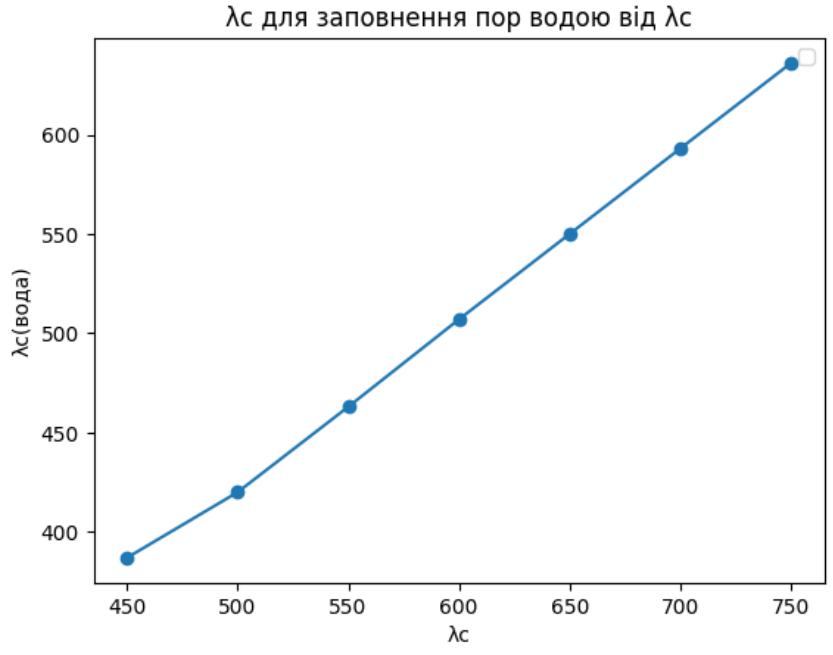
Залежність амплітуди від довжини хвилі та λ_c при показниках заломлення [$n_L=2$ $n_H=2.4$] з водою



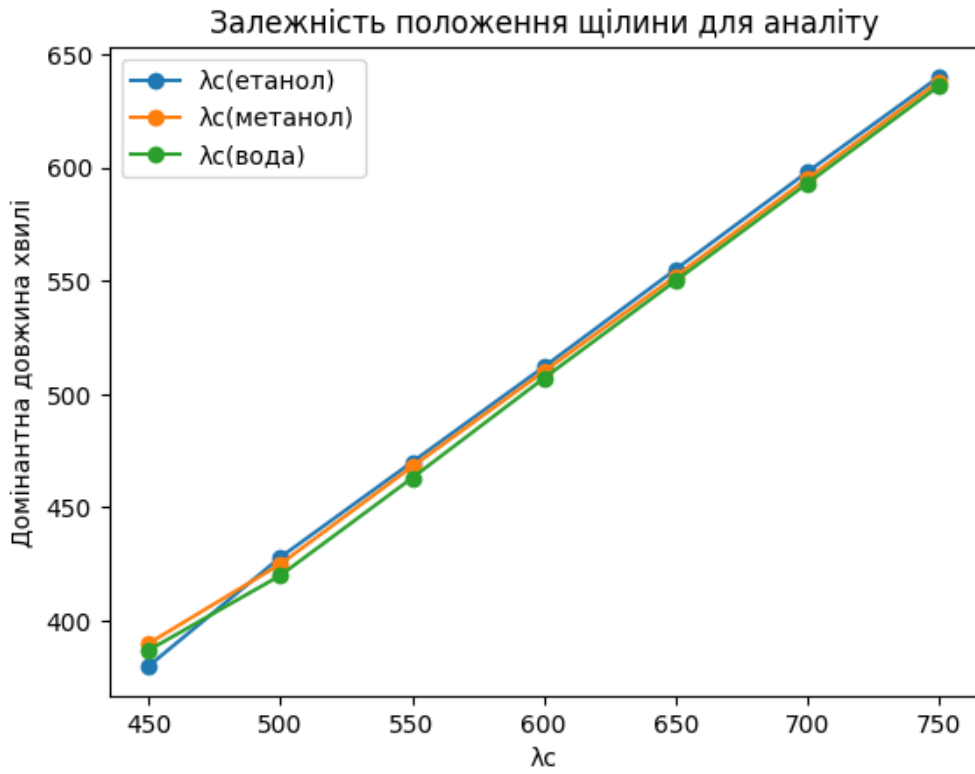
В даному випадку ми також бачимо зсув показників довжин хвиль які відповідають щілині, щоб проаналізувати цю залежність ми додамо дані чутливості до таблиці, яка відобразить залежність зсуву щілини.

Положення щілини	Чутливість
450	196.87
500	250.0
550	271.87
600	290.62
650	312.5
700	334.37
750	356.25

Також побудуємо графік залежності зміни положення щілини з заповненими порами водою в порівнянні з заповнення пор повітрям.



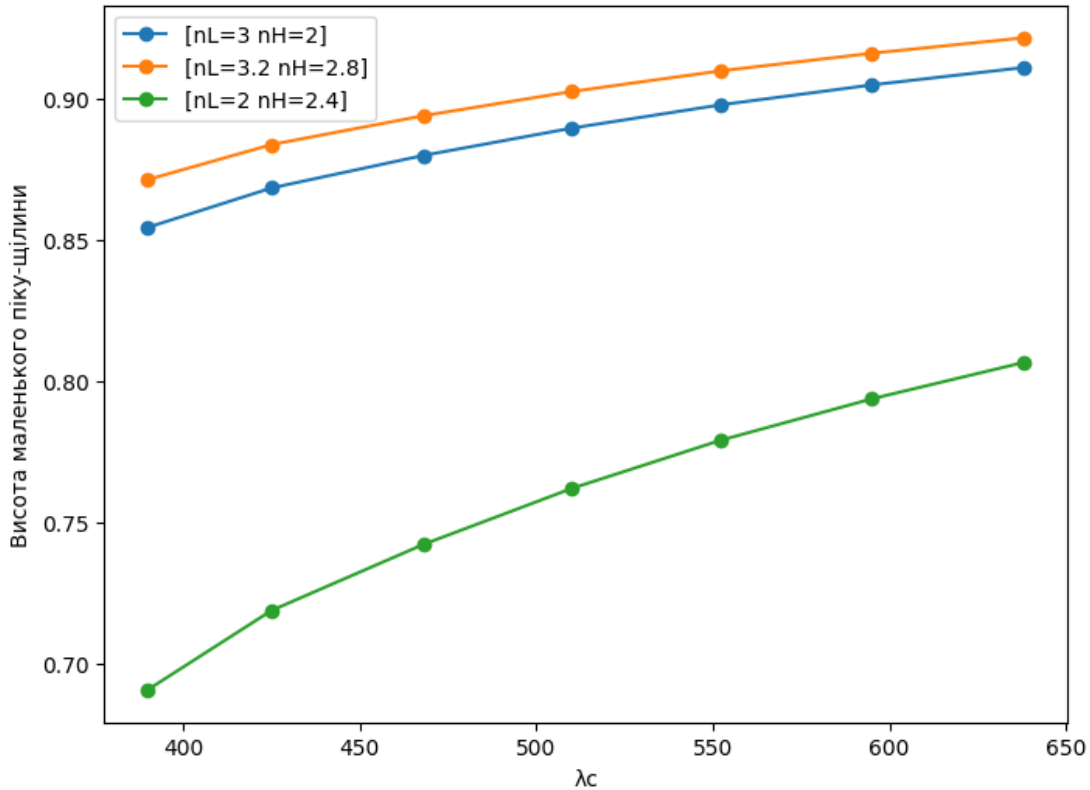
Також побудуємо графік залежності положення щілини для заповнення пор аналітом від положення щілини для пор заповнених повітрям для води, етилену та метилену, що дасть нам можливість проаналізувати як кожен аналіт впливає на зміну положення щілини.

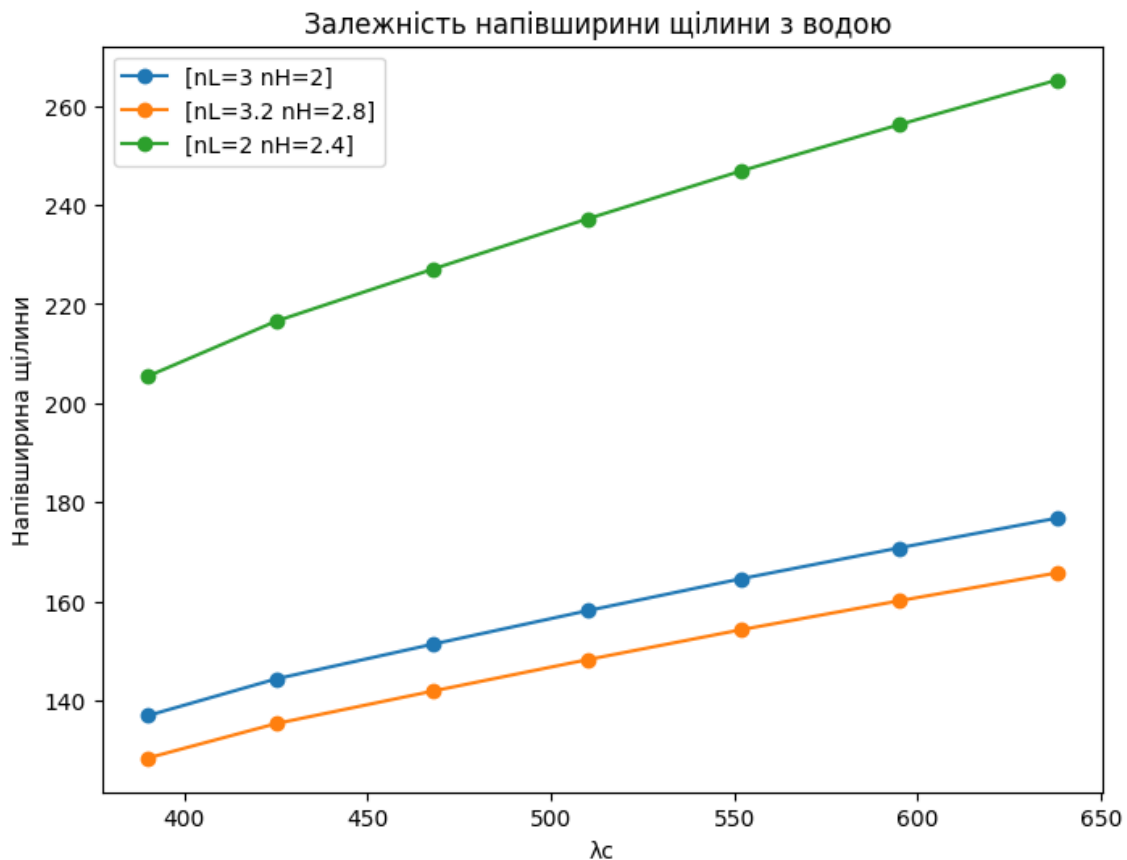


Як ми бачимо, графік демонструє майже однакову зміну положення щілини для етилену, метилену та води. Що свідчить про відносно однакові значення показника ідеальності для всіх трьох випадків.

Залежності висоти малого піку та напівширини щілини від положення щілини для пор з водою демонструють майже ідентичну тенденцію зміни залежності як і для пор заповнених метанолом. Це можна пояснити тим, що показники заломлення цих речовин практично однакові $n = 1.33$ та $n = 1.32$. Так як цей показник впливає на ефективний показник заломлення системи, ми отримали практично дві однакові залежності.

Залежність висоти маленького піку-щілини від положення щілини з водою





3.4.1 Дані колориметричного аналізу зразку з водою.

nH = 3 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	797	0.2523127923527157
500	662	0.3656677006426681
550	728	0.351447389258108
600	794	0.45020577864219513
650	400	0.3368251181494143
700	412	0.5490119358536387
750	414	0.6628730311013872

nH = 2.8 та nL = 3.2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	482	0.19182056233576134
500	536	0.4728053648478061
550	590	0.5230843910462983
600	643	0.7819775240430895
650	697	0.49171440174009695
700	750	0.5780467875500007
750	579	0.6288487644870362

nH = 2.4 та nL = 2		
	Домінантна довжина хвилі	Показник ідеальності
450	711	0.30210778446577113
500	790	0.8002925487868572
550	640	0.26234319554734056
600	698	0.6655526665749139
650	756	0.5580454319898627
700	415	0.6880570930600208
750	444	0.5761982024405569

Отже, порівнявши всі колориметричні данні для різних пар значень nH та nL, пори зразків заповнених повітрям та трьома аналітами можна зробити висновок: за результатами вимірювань видно, що домінантна довжина хвилі змінюється залежно від параметрів системи. Вона може збільшуватись або зменшуватись при зміні умов, таких як заповнювач пор, хімічний склад або товщина шарів. Така зміна може впливати на спектральні властивості відбивного матеріалу. Показник ідеальності вказує на ефективність відбивання світла в системі, результати вказують на те, що значення показника ідеальності можуть варіюватись залежно

від довжини хвилі та заповнювача пор. Це може бути пов'язано з властивостями матеріалу, його взаємодією зі світлом та оптичними явищами, що відбуваються в системі.

Загалом, зміна домінантної довжини хвилі та показників ідеальності вказує на важливі оптичні властивості системи з відбиваючими шарами. Вони можуть бути керовані шляхом зміни параметрів системи, що відкриває можливості для оптимізації оптичної ефективності та розробки нових матеріалів для застосувань у фотоніці та оптичних пристроях.

ВИСНОВКИ

Отже, основною метою нашого дослідження було отримати колориметричні параметри та розрахунки спектральних параметрів структури дзеркала Брегга з мікрощілиною на основі поруватого кремнію шари якого мають різну товщину та порівняти отримані спектральні дані для заповнення пор кремнію різними аналітами, які мають різні показники заломлення (етанол, метанол та вода). Одним з ключових параметрів який може описати та порівняти зміну спектральних даних, в нашому випадку зміна положення щілини в залежності від аналіту яким ми заповнили пори можна вважати чутливість. Тобто чутливість відображає залежність зсуву щілини при зміні заповнення пор.

Можна зробити висновок, що заповнювачі пор (етанол, метанол, вода) впливають на зміну положення щілини, що відображається у зсувах значень положення щілини. Заповнення пор етанолом та метанолом призводить до більш помітного зміщення, ніж заповнення пор водою.

Якщо ж порівнювати колориметричні дані для заповнення пор аналітами з різними показниками заломлення можна зробити висновок: що за результатами вимірювань видно, як домінантна довжина хвилі змінюється залежно від параметрів системи. Така зміна може впливати на спектральні властивості відбивного матеріалу. Значення зміни показника ідеальності може бути пов'язано з властивостями матеріалу, його взаємодією зі світлом та оптичними явищами, що відбуваються в системі.

Загалом, зміна домінантної довжини хвилі та показників ідеальності вказує на важливі оптичні властивості системи з відбиваючими шарами.

Актуальність роботи полягає в його потенційному застосуванні в різних галузях, таких як оптика, сенсорні пристрої, фотоніка та біомедицина.

Спираючись на проведенні мною дослідження та аналізуючи отримані результати я можу запропонувати наступні методи для покращення колориметричного аналізу дзеркал Бреґга з мікрощілиною на основі поруватого кремнію: використання більш точних методів вимірювання спектральних параметрів, наприклад, застосування спектрофотометрії з високою роздільною здатністю та широким спектральним діапазоном; розширити дослідження на інші аналітичні середовища та речовини з різними показниками заломлення, щоб отримати більш повну інформацію про спектральні властивості структури; Обробляти та аналізувати великі обсяги спектральних даних за допомогою аналітики даних і машинного навчання, що автоматизує процес аналізу та підвищить ефективність.

Ці нововведення можуть сприяти покращенню точності, ефективності та застосовуваності колориметричного аналізу брегівських дзеркал з мікрощілинами на основі поруватого кремнію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Michael J. Sailor Porous Silicon in Practice.
2. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41341/1/Dorozhynska_dys.pdf
3. <https://www.imath.kiev.ua/~maryna/MAINFILE.pdf>
4. Colorimetric Analysis by Allport
5. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/f654bc89-e5a0-4e96-b4d6-799274e34d7c/content>
6. Silicon Nanophotonics Basic Principles, Current Status and Perspectives
7. <https://studfile.net/preview/5650662/page:18/>
8. <https://pyllama.readthedocs.io/en/latest/>
9. Sensors And Microsystems: Proceedings Of The 3rd Italian Conference
10. <https://matplotlib.org>
11. <https://numpy.org>
12. Monitoring at Chemical Agent Disposal Facilities.