

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол № ____ засідання кафедри

від “ ____ ” _____ 20 ____ р.

**ОПТИЧНІ СЕНСОРИ
НА ОСНОВІ ПОРУВАТИХ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра
студента спеціальності

105 Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології»

Оляніна Миколи Олександровича

Науковий керівник

доцент кафедри нанофізики

конденсованих середовищ

к.ф.-м.н. **Іван Іванович Іванов**

Оцінка захисту роботи

Київ – 2022 р.

АНОТАЦІЯ

Олянін М.О. Оптичні сенсори на основі поруватих фотонних кристалів. – Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології». Робота складається з 21 с., 19 рис., 32 посилань.

У роботі досліджувалася спектральна залежність коефіцієнта відбиття мультишарової структури типу Бреґівський рефлектор виготовленої з поруватого кремнію від аналіту в порах. Проведено теоретичний розрахунок і побудовані графіки відбивної здатності бреґівського дзеркала і бреґівського дзеркала зі щілиною. Встановлено, що за наявності аналіту, коефіцієнт відбиття бреґівських дзеркал більша ніж з повітрям. Результати теоретичних розрахунків підтвердив експеримент. Отримані результати можуть бути використані для створення багаторозмірних оптичних сенсорних структур, підвищення ефективності існуючих сенсорних структур на основі Бреґівських рефлекторів.

Ключові слова: фотонний кристал; поруватий кремній; сенсор; Бреґівський рефлектор; спектр.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	6
1.1. Властивості поруватого кремнію і сфери його застосування	6
1.2. Поруваті фотонні кристали як основа для створення оптичних сенсорів.	9
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БРЕГІВСЬКИХ ДЗЕРКАЛ	12
ВИСНОВКИ	20
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	21

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом останніх десятиліть фіксується значний інтерес до створення фотоннокристалічних матеріалів для створення фотонних кристалів (ФК), на основі яких розробляються прилади, здатні генерувати і перемикаєти оптичний сигнал. Особливий інтерес дослідників викликає перспектива застосування таких приладів в оптоелектроніці і фотоніці для біомедичної діагностики, сфери оборони, безпеки, аерокосмічної галузі та ін. На основі ФК створюються та розробляються оптичні фільтри, хвилеводи (зокрема, у волоконно-оптичних лініях зв'язку), пристрої, що дозволяють здійснювати керування тепловим випромінюванням, конструкції лазерів зі зниженим порогом накачування, перетворювачі сонячної енергії, світлочутливі фотодіоди, різного типу сенсори. Особливе значення для розвитку напівпровідникової мікроелектроніки має розробка оптичних сенсорів на основі ФК. Це пов'язано з тим, що будь-яке фізичне явище, наприклад температуру, тиск, деформацію, або наявність хімічних речовин та біомолекул, які можуть змінити періодичність та показник заломлення структури фотонного кристала, можна виявити шляхом вимірювання оптичних властивостей, таких як спектральна картина відображеної та переданої потужності. Застосування для цього ФК сенсорів пов'язано з можливістю контролю над геометричними властивостями ПК, що дозволяє розробляти високочутливі оптичні прилади з надзвичайно малими розмірами. Одним з видів одномірних ФК, що успішно використовується в якості сенсорів є Бреґівське дзеркало, яке дозволяє відбивати світлові хвилі з набагато вузькою полосою відбиття ніж інші матеріали. Ці властивості Бреґівського дзеркала зумовлюють його широке використання в оптичній техніці. Водночас залежність ефективності Бреґівського дзеркала від ширини полоси відбиття зумовлює актуальність моделювання Бреґівського дзеркала зі щільною.

Метою роботи є: моделювання оптичних сенсорів на основі 1D поруватих Брегівських рефлекторів і Брегівських рефлекторів з мікрощілиною.

Завдання роботи :

- Дослідити спектральні залежностей сенсорних структур від їх параметрів Методом матриць переходу
- Вивчити пакет PyLlama для моделювання багатошарових структур в Python

Об'єкт дослідження: оптичні сенсори на основі поруватих фотонних кристалів.

Предмет дослідження: спектральні залежності сенсорних структур від їх параметрів

Методи дослідження: теоретичний та експериментальний.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Властивості поруватого кремнію і сфери його застосування

Поруватий кремній (ПК) – це наноматеріал для виготовлення якого застосовують метод електрохімічного травлення. ПК являє собою нанокристалічний основу, пронизану великою кількістю найдрібніших отворів. Ступінь поруватості такого кремнію є його найважливішою характеристикою. Щільність отворів на окремих зразках може бути настільки величезною, що відбувається їх перекриття. В результаті неперотравлені ділянки кремнію мають вигляд коралоподібної сукупності квантових ниток різного перерізу. Тому ПК можна розглядати як квантову губку, і як губка він може просочуватися різними хімічними речовинами [1]. ПК має унікальні фізичні властивості [2] і сумісний з сучасною мікроелектронною технологією. Він належить до найперспективніших матеріалів напівпровідникової електроніки.

Сьогодні існують два основних способи отримання шарів ПК на поверхні кремнієвих пластин – хімічне забарвлююче травлення без електричного поля та анодне електрохімічне травлення кремнієвої пластини в присутності зовнішнього електричного поля. Другий спосіб є найбільш поширений.

ПК був випадково відкритий американським дослідником Артуром Уліром в 1955 році [3]. В той час Улір розробляв техніку полірування та формування поверхонь кремнію і проводив експерименти з обробки пластин монокристалічного Si плавиковою кислотою, в електролітах на основі водних розчинів [4;5]. В наслідок хімічного та електрохімічного травлення на поверхні матеріалу утворилася плівка з численними порожнинами різного діаметру. Тоді отримані результати не викликали зацікавлення наукової спільноти. Лише наприкінці 1980-х рр. британський вчений Лі Кенхем почав проводити експерименти з ПК. У 1990 році Л. Кенхем доповів, що при фотозбудженні ПК сильно випромінює у видимому спектрі: при кімнатній температурі з ПК

спостерігається інтенсивна червоно-помаранчева фотолюмінесценція. Водночас квантовий вихід фотолюмінесценції становив від 2 до 13 %. Появу фотолюмінесценції тоді справедливо пов'язали з квантовим розмірним ефектом у наноструктурах ПК. Опублікований результат викликав великий інтерес до його нелінійних оптичних та електричних властивостей. Невдовзі було виявлено електролюмінесценцію у ПК. При електролюмінесценції випромінювання світлових квантів відбувається завдяки проходженню електричного струму в напівпровіднику, що призводить до збудження електронів та дірок із наступною рекомбінацією [5].

З того часу кількість опублікованих робіт, присвячених вивченню властивостей і потенційних застосувань пористого кремнію постійно зростає. Згідно проведених досліджень, складна структура ПК забезпечує йому велику кількість привабливих фізико-хімічних властивостей, серед яких можна виділити видиму люмінесценцію, малі розміри нанокристалів, велику площу поверхні, менший коефіцієнт відбивання у порівнянні з об'ємним кремнієм, що зумовлює значну чутливість електрофізичних властивостей ПК до умов зовнішнього середовища, і до електромагнітного випромінювання в широкому спектральному діапазоні [6].

Крім того, можливість контролювати його морфологію на мікро- і нано рівнях робить ПК практично універсальним матеріалом для його використання в різноманітних сферах [7;8;9;10], починаючи від оптики [11;12] до біомедицини [13;14]. Відповідно, властивості шарів ПК дозволяють створювати на його основі прилади різного призначення: випромінювачі, фотоприймачі, хімічні та біологічні сенсори, фотонні кристали та ін.

Визначена структура ПК сама по собі є предметом вивчення, враховуючи притаманну йому складну поверхню, об'єм і морфологію розділу поверхні. Крім

того, існує багато різних форм ПК, що робить аналіз його структури ще більш складним завданням. Загалом, детальна морфологічна і хімічна характеристика є ключовим фактором для покращення розуміння фізичних механізмів, відповідальних за дуже різну поведінку ПК щодо об'ємного Si, а також для покращення загальної поведінки структур і пристроїв на основі ПК.

ПК знайшов своє застосування в сфері сенсорики та інформаційних технологій, на його основі розроблені короткохвильові оптичні фільтри, матриці, що працюють в рентгенівському спектрі випромінювання, мікронасоси, мікроканалні структури, текстуровані покриття антивідблиску для сонячних елементів і т.д. У зв'язку з розвитком технології світловипромінюючих діодів на Si найближчим часом можливий перехід до повністю кремнієвої оптоелектроніки [15].

В сфері сенсорики ПК використовують для створення датчиків вологості, газових, оптичних, хімічних і біологічних сенсорів. Зокрема газові сенсори на основі ПК, що працюють на фотовольтаїчних ефектах, використовують для аналізу газів та газових сумішей. Газові сенсори застосовують для детектування й кількісного моніторингу присутності активних донорно-акцепторних газів. Робота біологічних сенсорів базується на взаємодії селектора з біологічним матеріалом і реєстрації частки взаємодії [16]. Біологічні сенсори використовують для моніторингу навколишнього середовища [17].

Використання ПК в оптиці в якості сенсорів зумовлене наноструктуруванням об'ємного Si, завдяки таким властивостям як люмінесценція, залежність показника заломлення, схильність до біодеградації і біоактивності [18; 19]. Здатність до біодеградації відкрила перспективи використання ПК для діагностики та лікування широкого спектру захворювань. Тому на основі ПК отримані оптичні сенсори для виявлення та кількісного

визначення небезпечних хімічних речовин, дослідження біомолекулярних взаємодій, досліджень клітинних систем та ін. [20].

ПК успішно використовується для виготовлення мікротопливних елементів, в яких в якості електроліту використовують твердополімерну мембрану, а електроди розробляють на основі пористих вуглецевих або кремнієвих матеріалів [21]. Перспективним є застосування ПК для створення суперконденсаторів та літій-іонних джерел струму [22;23]. Для цього використовується технологія створення композиційних матеріалів на основі матриці Si, модифікованої графеном. Ще одним напрямом, який відкриває значні перспективи у використанні ПК є розробки на його основі стабільних та відтворюваних за характеристиками мембран, здатних до сепарації молекул за розмірами [24].

В сфері інформаційних технологій новітніми є спроби записувати за допомогою структурованої матриці ФК біти оптичної пам'яті. Метод заснований на властивостях ПК поглинати імпульс світла і випромінювати його під дією інтенсивнішого імпульсу ніж той, що був записаний раніше [25].

1.2. Поруваті фотонні кристали як основа для створення оптичних сенсорів

Оптичні властивості ПК зумовлюють його ефективне використання в оптоелектроніці. ПК має високу площу поверхні та розвинену систему отворів, що дає можливість створювати на його основі сенсори, які працюють за принципом оборотної зміни ефективного показника заломлення внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем. В якості сенсорів працюють брегівські дзеркала та оптичні фільтри на основі поруватих напівпровідників і діелектриків.

Брегівське дзеркало також відоме як діелектричне дзеркало, є відбивачем, що використовується у хвилеводах, таких як оптичні волокна. Фактично це є багат шарова структура, що складається з діелектричних шарів з різними значеннями показника заломлення або періодичною зміною будь-якої характеристики (наприклад, висоти) діелектричного хвилеводу, що призводить до періодичної зміни ефективного показника заломлення хвилеводу.

Принцип роботи діелектричних дзеркал ґрунтується на інтерференції світла, відбитого від різних шарів діелектричного матеріалу (рис. 1.1). Той самий принцип використовується в багат шарових прозорих покриттях, які є діелектричними шарами, розробленими для мінімізації, а не максимізації відбивної здатності. Найпростіші діелектричні дзеркала функціонують як одномірні фотонні кристали, що складаються з набору шарів з високим показником заломлення, які чергуються з шарами з низьким показником заломлення. Товщини шарів вибираються таким чином, щоб різниця довжин шляху для відбиття від різних шарів з високим показником заломлення була цілим числом кратним довжині хвилі, на яку розраховане дзеркало. Відбиття від шарів з низьким показником заломлення мають різницю довжин шляху рівно половину довжини хвилі, але різниця у фазовому зрушенні на кордоні з низьким і високим показником заломлення становить 180° у порівнянні з межою з високим і низьким показником заломлення, що означає, що ці відображення також перебувають у фазі. У разі нормального падіння світла, шари мають товщину чверть довжини хвилі. Вибираючи певну кількість та товщини шарів, можна варіювати величину відображення дзеркал від 0,1–99,9% для певної довжини хвилі і шириною полови відбиття 0,05–10 нм [26].

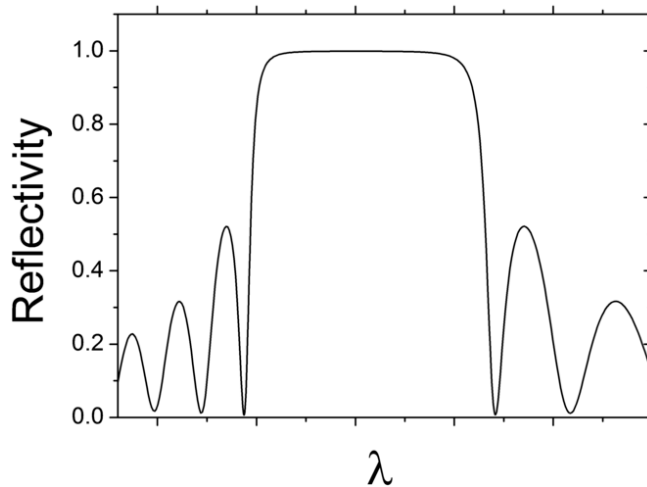


Рис.1.1 Коефіцієнт відбиття схематичної структури брегівського дзеркала.

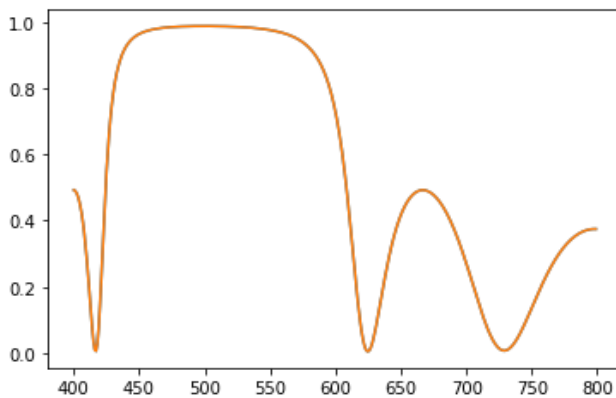
В разі зміни щільності фотонних мод внаслідок періодичної модуляції показника заломлення, у щільності фотонних станів відбувається поява «брегівської щілини». Щілина дозволяє змінювати розмір ділянки волокна, що опромінюється, що своєю чергою дає можливість варіювати довжину брегівського дзеркала, а з ним і його спектральні характеристики.

З використанням брегівських дзеркал розробляються фотодетектори з резонансним посиленням [27;28] та лазери з вертикальним виведенням випромінювання, причому як з мікрорезонатором [29], так і зовнішнім резонатором [30]. Зокрема, вони застосовуються у спектральному газоаналізі [31] та телекомунікації [32].

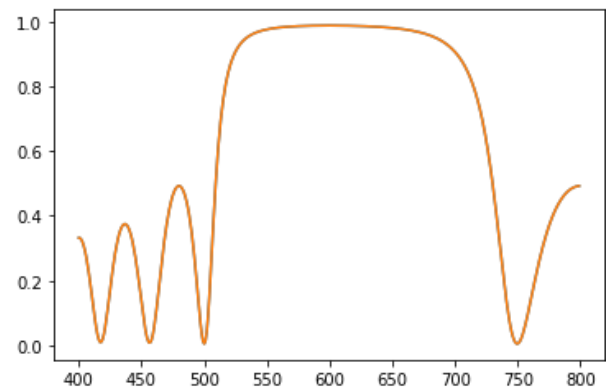
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БРЕГІВСЬКИХ ДЗЕРКАЛ

На першому етапі роботи необхідно було виконати теоретичне моделювання спектру відбиття Брегівського дзеркала і Брегівського дзеркала зі щілиною без аналізу і з аналізом. Для цього, застосовуючи мову програмування Python і модуль `pyllama.py` в діапазоні різних довжин хвиль та коефіцієнта відбиття $nL = 1.65$, $nH = 2.55$ і $nL = 2.0115$, $nH = 2.743$ відповідно при 8 бішарів, було побудовано спектри відбиття.

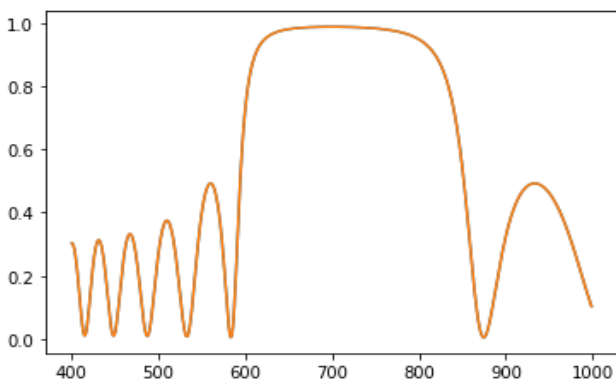
Побудова спектрів відбиття Брегівського дзеркала заповненого повітрям для довжин хвиль 500-800нм показана на графіках 1-4



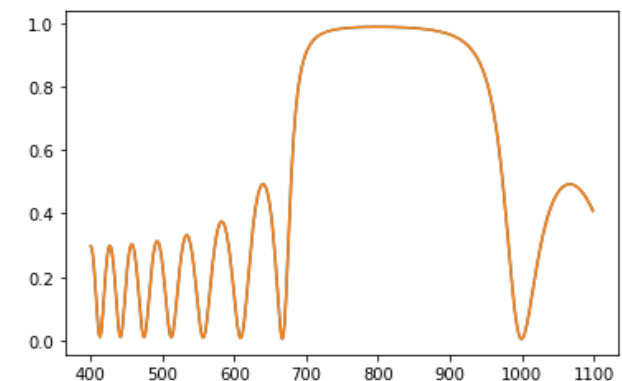
Графік 1 При $\lambda_0(\text{air})=500\text{нм}$



Графік 2 При $\lambda_0(\text{air})=600\text{нм}$

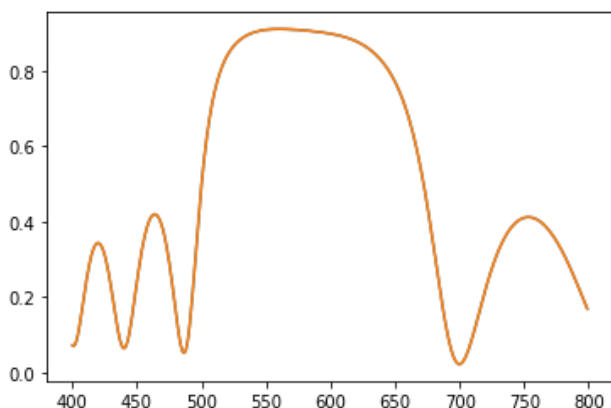


Графік 3 При $\lambda_0(\text{air})=700\text{ нм}$

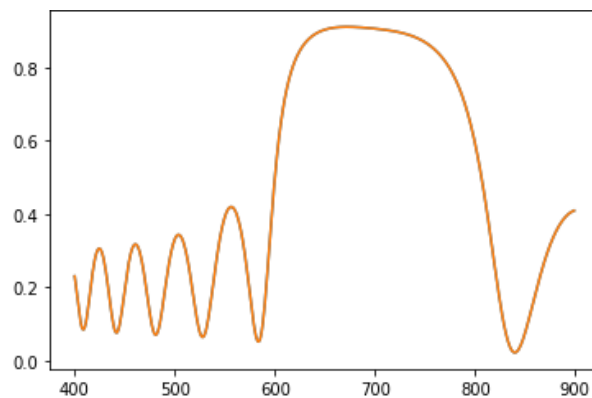


Графік 4 При $\lambda_0(\text{air})=800\text{ нм}$

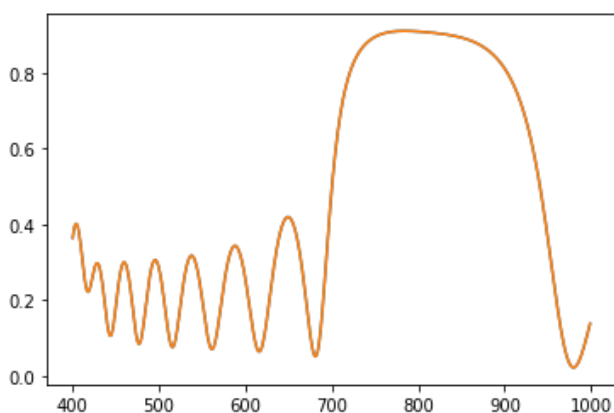
Побудова спектрів відбиття Брегівського дзеркала заповненого етанолом для довжин хвиль 500-800нм показана на графіках 1-4



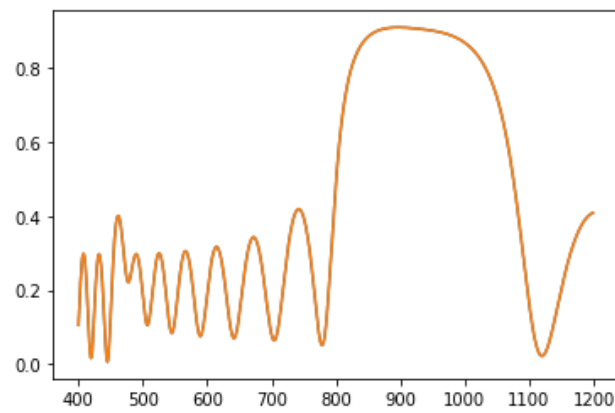
Графік 1 При $\lambda_0(\text{ethanol})=500$ нм



Графік 2 При $\lambda_0(\text{ethanol})=600$ нм



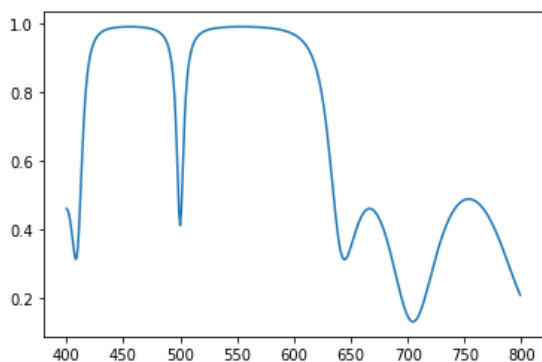
Графік 3 При $\lambda_0(\text{ethanol})=700$ нм



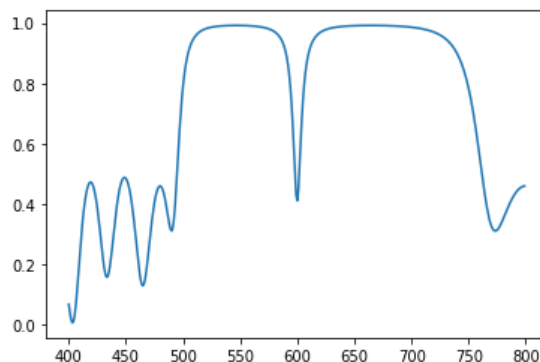
Графік 4 При $\lambda_0(\text{ethanol})=800$ нм

Дослідження відбивної здатності брегівських дзеркал за наявності аналіту та за його відсутності. Оскільки аналіт може змінювати оптичну товщину шарів матеріалів з високим і низьким індексом заломлення, у результаті чого змінюється пікова довжина хвилі. Ця зміна пікової довжини хвилі у відповідь на аналіти є основою зондування Брегівських рефlectorів.

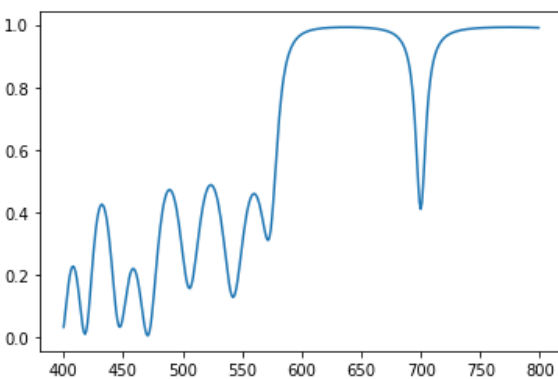
Побудова спектрів відбиття Брегівського дзеркала з мікрощілиною заповненого повітрям для довжин хвиль 500-800нм показана на графіках 1-4.



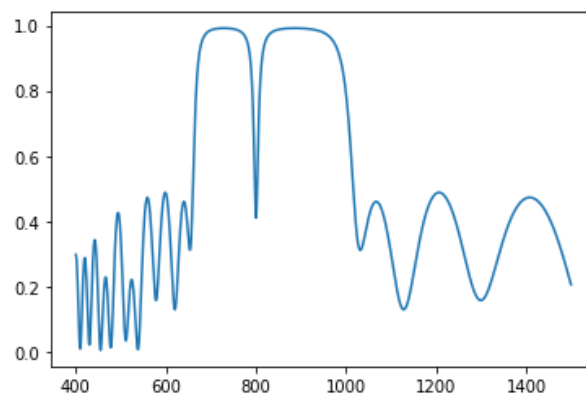
Графік 1 При $\lambda_c(\text{air})=500$ нм



Графік 2 При $\lambda_c(\text{air})=600$ нм

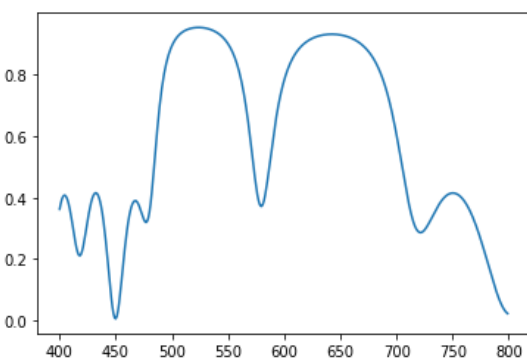


Графік 3 При $\lambda_c(\text{air})=700$ нм

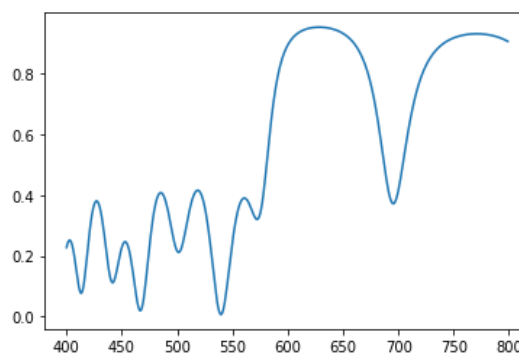


Графік 4 При $\lambda_c(\text{air})=800$ нм

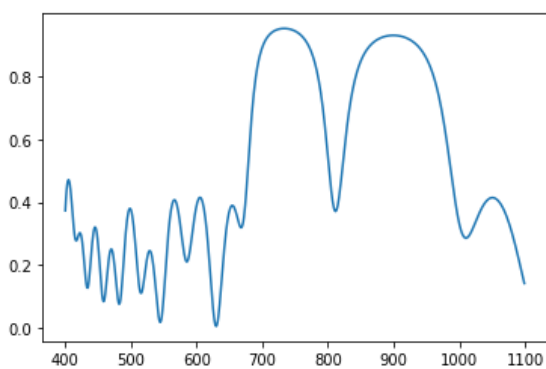
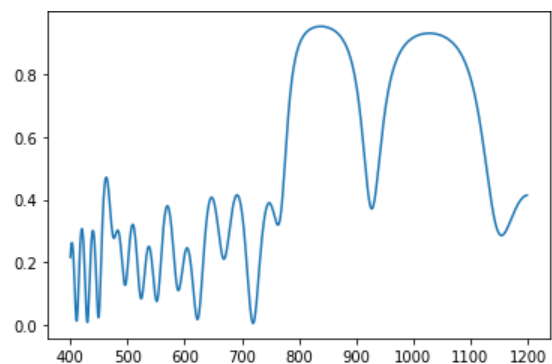
Побудова спектрів відбиття Брегівського дзеркала з мікрощілиною заповненого етанолом для довжин хвиль 500-800нм показана на графіках 1-4.



Графік 1 При $\lambda_c(\text{ethanol})=500$ нм



Графік 2 При $\lambda_c(\text{ethanol})=600$ нм

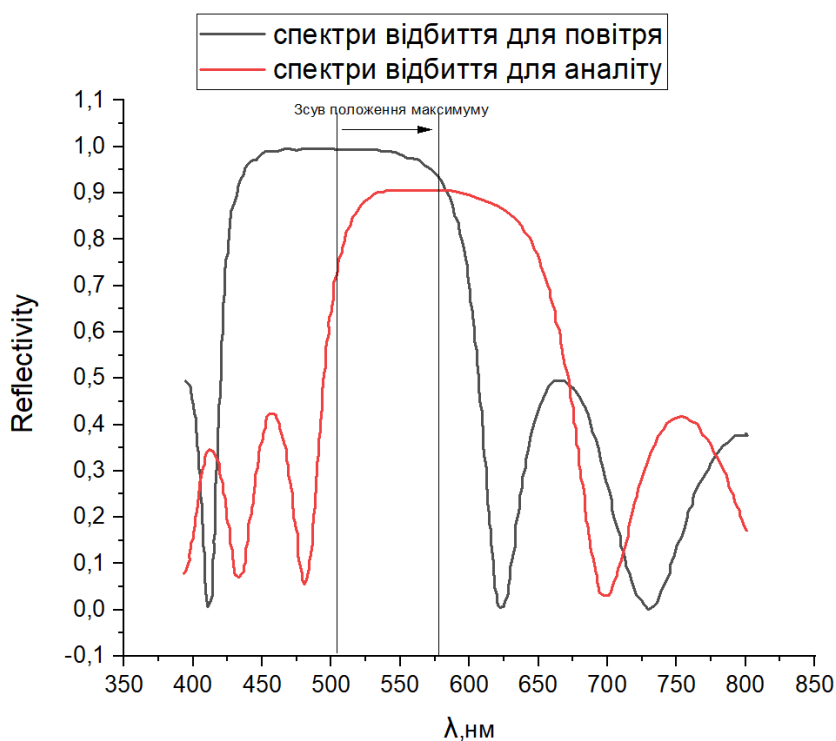
Графік 3 При $\lambda_c(\text{ethanol})=700$ нмГрафік 4 При $\lambda_c(\text{ethanol})=800$ нм

Однією з конструкцій фотонних кристалів є структура типу Брегівське дзеркало - це багатошарова структура, що складається з послідовності шарів з високим і низьким показником заломлення. Оптична товщина кожного шару тобто $n_L \times L = n_H \times L_H$ має бути ламбда 0 поділити на 4. На цій довжині хвилі буде спостерігатися головний інтерференційний пік, що зветься Брегівським піком. На графіку представлені 2 спектри відбиття світла для повітря і аналіту. Зсув положення і довжини піку обумовлюється різними коефіцієнтами відбиття. Брегівське дзеркало як показано буде далі можна створити з шарів поруватого кремнію і ці шари будуть характеризуватися ефективним показником заломлення. При заповненні пор аналітом положення Брегівського піку зсувається в довгохвильову область і по зсуву роблять висновок про оптичний відгук сенсора на аналіт.

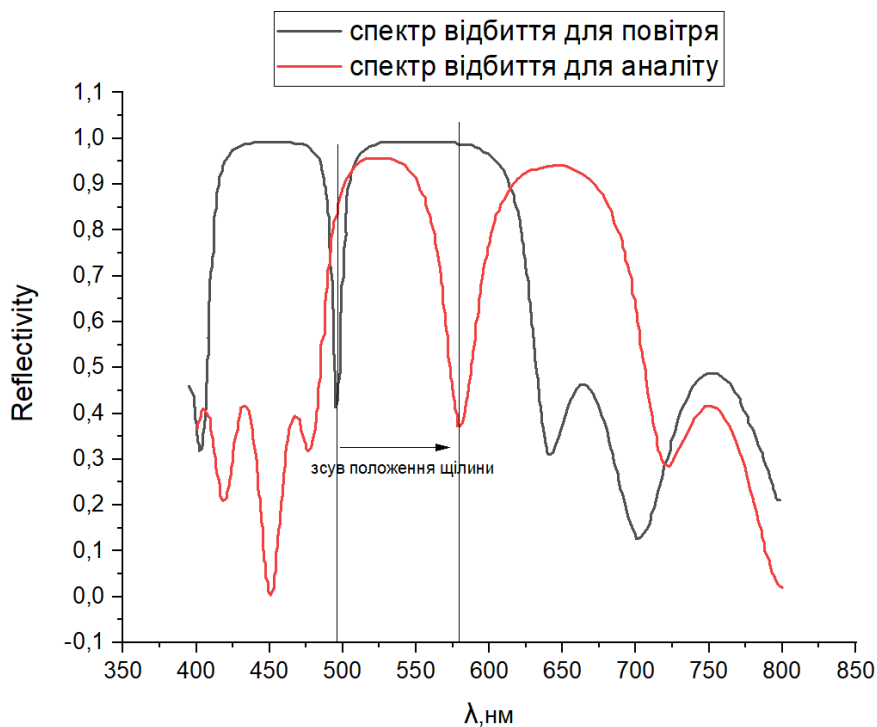
Профіль показника заломлення Брегівського дзеркала становить :

na nH nL nH nL nH nL nH nL nH nL nb

LH LL LH LL LH LL LH LL LH LL LH LL



Однією з підмодифікацій фотонний кристалів є структура типу Брегівське дзеркало зі щілиною. Особливістю конструкції є наявність шару всередині з напівхвильовою оптичною товщиною. Для такої структури на спектральній залежності коефіцієнта відбиття спостерігається вузька мікрощілина по положенню якої оцінюється спектральний відгук сенсора. Дана конструкція дозволяє більш точно визначати довгохвильовий зсув Брегівського піку так як у структури з простим БП так як верхівка у неї може бути плоска.

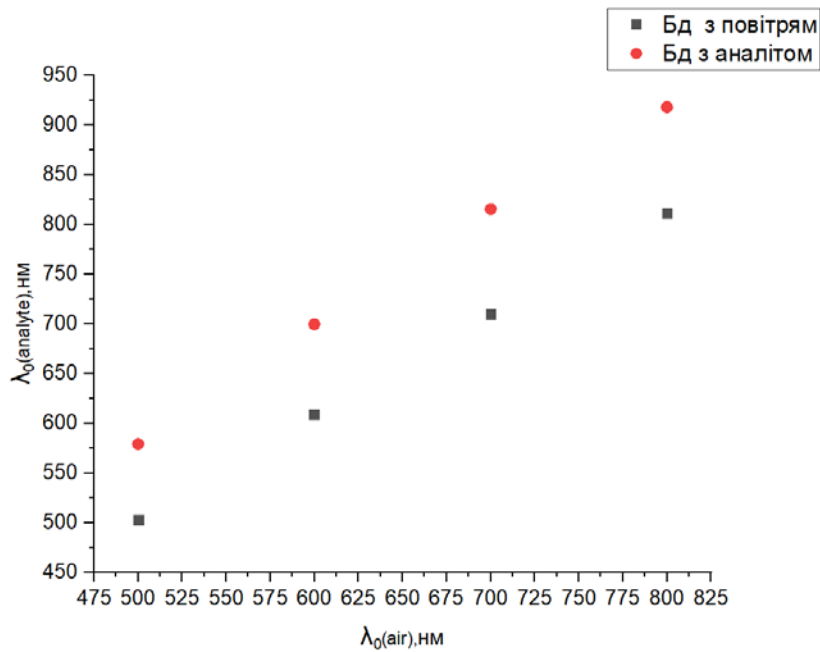


Профіль показника заломлення Брегівського дзеркала зі щілиною становить :

na nH nL nH nL nH nL nH nL nH nL nH nL nb

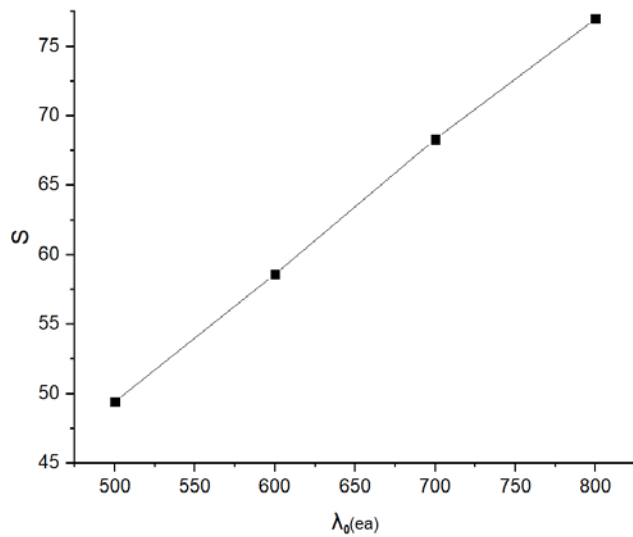
LH LL LH LL LH 2LL LH LL LH LL LH LL

Наведено графік залежності зсуву положення Брегівського піку після заповнення пор етанолом для структур спроектованих на різну довжину хвилі, що дозволило визначити їх чутливість і зробити висновок, що структури спроектовані для довгохвильового діапазону більш чутливі.

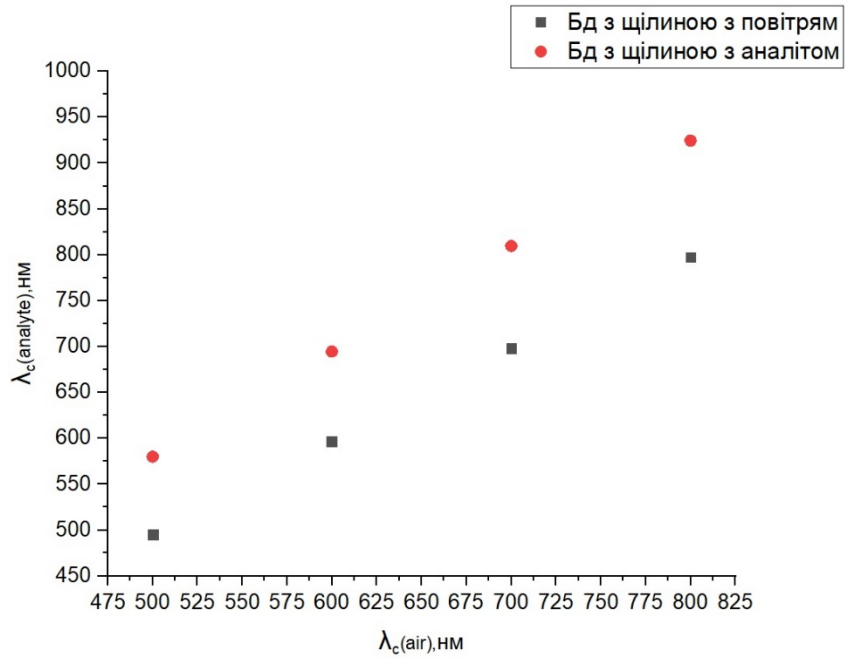


Залежність положення максимумів $\lambda_0(\text{analyte})$ від $\lambda_0(\text{air})$

Чутливість на довжинах хвиль становить:

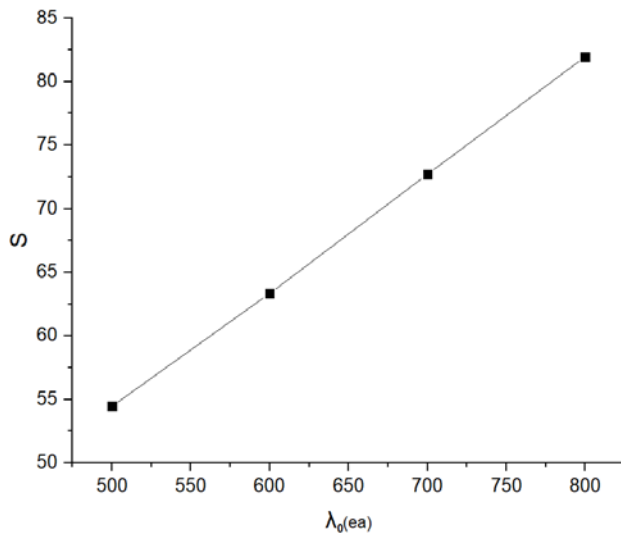


Наведено графік залежності зсуву положення щілини після заповнення пор етанолом для структур спроектованих на різну довжину хвилі, що дозволило визначити їх чутливість і зробити висновок, що структури спроектовані для довгохвильового діапазону більш чутливі.



Залежність положення щілини $\lambda_c(\text{analyte})$ від $\lambda_c(\text{air})$

Чутливість на довжинах хвиль становить:



ВИСНОВКИ

Результати теоретичного моделювання Брегівського дзеркала з аналітом і без аналіту показали рівномірне зміщення положення піків відбиття хвиль для усіх значень довжин хвиль, але за наявності аналіту, коефіцієнт відбиття Брегівського дзеркала більша ніж з повітрям.

Моделювання Брегівського дзеркала з щілиною з аналітом і без аналіту також показало рівномірне зміщення положення піків відбиття хвиль для усіх значень довжин хвиль. Однак за наявності аналіту коефіцієнт відбиття Брегівського дзеркала з щілиною більша ніж з повітрям.

Отже для підсилення відбивної здатності Брегівського дзеркала необхідно використовувати аніліт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Saha H., Das J. and Hossain S.M. Porous Silicon: A Natural Nanostructure for Vapour Sensing Application // *Asian J. Physics*. 2003. V.12. P.323-330.
2. Cullis A.G., Canham L.T., Calcott P.D.J. The structural and luminescence properties of porous silicon // *J. Appl. Phys*. 1997. V. 82. №3. P. 909-965.
3. Uhler B.A.. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon // *Bell Labs Technical Journal*. 1955. V. 35. №. 2. P. 333-347.
4. Зимин, С.П. Пористый кремний – материал с новыми свойствами [Текст] // *Соросовский образовательный журнал*. 2004. Т. 8, №1. С. 101–107.
5. Кашкаров, П.К. Необычные свойства пористого кремния // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т. 7, №1. С. 102–107.
6. Оленич І.Б., Монастирський Л.С, Соколовський Б.С., Фотодетектори на основі поруватого кремнію. // *Журнал нано- та електронної фізики*. 4 № 3. 2012, С. 03025-1–03025-5.
7. Canham, L, Editor (1997a.) Properties of porous silicon, INSPEC - The Institution of Electrical Engineers ; United Kingdom.
8. Lehmann V (2002) Electrochemistry of silicon: instrumentation, science, Materials and Applications. Wiley-VCH, Weinheim
9. Sailor MJ (2011) Porous silicon in practice. Wiley, Weinheim
10. Hernández-Montelongo J, Muñoz-Noval Á, García-Ruíz JP, Torres-Costa V, Martín-Palma RJ, Manso-Silván M (2015) Nanostructured porous silicon: the winding road from photonics to cell scaffolds. A review. *Front Bioeng Biotechnol* 3:60
11. Torres-Costa V, Martín-Palma RJ (2010) Application of nanostructured porous silicon in the field of optics. A review. *J Mater Sci* 45(11): 2823–2838.
12. Martín-Palma RJ, Hernández-Montelongo J, Torres-Costa V, Manso-Silván M, Muñoz-Noval A (2014) Nanostructured porous silicon-mediated drug delivery. *Expert Opin Drug Deliv* 11 (8): 1273

13. Martín-Palma RJ, Hernández-Montelongo J, Muñoz-Noval Á, Manso-Silván M, Torres-Costa V (2015) Silicon-based nanoparticles for biosensing and biomedical applications. *Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry*, Wiley Online, pp 1–11
14. Raúl J. Martín-Palma. Vicente Torres Costa *Microscopy of Porous Silicon // Handbook of Porous Silicon*. University of Birmingham Birmingham, Worcestershire. Springer Nature. 2018. p. 571–583
15. В.В. Старков. Получение, свойства и применение пористого кремния // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2009. №. 4. С.13-21.
16. Олексенко Л.П., Максимович Н.П., Матушко І.П., Федоренко Г.В. Газові сенсори та застосування наноматеріалів у сенсоріці. К. : ВПЦ “Київський університет”, 2019. 143 с.
17. Марценюк В. П., Жулкевич І. В., Сверстюк А. С., Мельник Н. А., Козодій Н. В., Березовська І. Б. Використання біосенсорів для моніторингу навколишнього середовища // *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*. 2019. № 2 (80). С.107–114.
18. Chiappini C. Biodegradable Porous Silicon Barcode Nanowires with De-fined Geometry / C. Chiappini, X. Liu, J.R. Fakhoury, M. Ferrari // *Advanced Functional Materials*. 2010. V. 20. P. 2231-2239.
19. Alvarez S.D. Biomaterials The compatibility of hepatocytes with chemically modified porous silicon with reference to in vitro biosensors / S.D. Alvarez, A.M. Derfus, M.P. Schwartz, S.N. Bhatia et al.// *Biomaterials*. 2009. V. 30. P. 26-34.
20. Pacholski C. Photonic crystal sensors based on porous silicon. // *Sensors*, 13(4), 4694–4713.
21. А.Г. Забродский. Физика, микро- и нанотехнологии портативных топливных элементов // *Успехи физических наук*. 2006. Т. 176. №. 4. С. 444-449.

22. Oakes. Surface engineered porous silicon for stable, high performance electrochemical supercapacitors / L. Oakes, A. Westover, J.W. Mares, S. Chatterjee et al. // *Scientific Reports*. 2013. P. 03020-1-7.123
23. M. Ge. Review of porous silicon preparation and its application for lithium-ion battery anodes / M. Ge, X. Fang, J. Rong, C. Zhou // *Nanotechnology*. 2013. V. 24. P. 422001-1-10.
24. Velleman L.. Fabrication of self-supporting porous silicon membranes and tuning transport properties by surface functionalization / L. Velleman, C.J. Shearer, A.V. Ellis, D. Losic et al. // *Nanoscale*. 2010. V. 2. P. 1756-1761.
25. Kuramochi E., Nozaki K., Shinya A., Takeda K., Sato T., et al. Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip. *Nat Photon* 2014; 8: 474-481.
26. Пашкеев Д. А., Усова А. М., Ильинов Д. В., Никонова А. В., Кошавцев Н. Ф. Анализ спектров пропускания распределенных брэгговских отражателей в зависимости от параметров четвертьволновых слоев // *Прикладная физика*. 2018. No 6. С. 90.
27. Temelkuran B., Ozbay E., Kavanaugh J. P., Tuttle G., Ho K. M. *Applied Physics Letters* 72, 2376 (1998).
28. Kou-Wei Lai, Sheng-Di Lin, Zong-Lin Li, and Chi-Cheng Wang, *Applied Optics* 52, 6906 (2013).
29. Ding Y., Fan W. J., Ma B. S., Xu D. W., Yoon S. F., Liang S., Zhao L. J., Wasiak M., Czystanowski T., and Nakwaski W.. *Journal of Applied Physics* 108, 073111 (2010).
30. Kilen I., Koch S. W., Hader J., Moloney J. V., *Applied Physics Letters* 112, 262105 (2018).
31. Pustogov V. V., Kuhnemann F., Sumpf B., Heiner Y., Herr K., *Journal of Molecular Spectroscopy* 167, 288 (1994).
32. M. T. Haidar, P. S. Reu, S. Paul, C. Gierl, J. Cesar, A. Emsia, and F. Kupperts, *Optics Letters* 40, 5528 (2015).