

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ВЛАСНІ РЕЖИМИ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ ХВИЛЕВОДІВ
З РІЗНОЮ СИМЕТРІЄЮ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи ФТОІм-24-1
Микита КУЛЬБАШНИК
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Євген ОДАРЕНКО
(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 175 Інформаційно-вимірювальні технології _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ «Фотоніка та оптоінформатика» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Кульбашнику Микиті Олеговичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Власні режими фотонно-кристалічних хвилеводів з різною симетрією

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1025 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи геометричні параметри фотонних кристалів з трикутною та квадратною симетрією; електродинамічні характеристики двовимірних фотонних кристалів; методи побудови періодичних структур і хвилеводних дефектів у середовищі COMSOL Multiphysics; принципи чисельного визначення дисперсійних характеристик і власних мод хвилеводів; матеріальні параметри діелектричних середовищ, необхідні для моделювання.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Вступ. 2 Огляд фізичних принципів фотонних кристалів та їх класифікація. 3 Огляд фізичних принципів фотонних кристалів та їх класифікація. 4 Аналіз впливу симетрії фотонної решітки на формування фотонної забороненої зони. 5 Побудова моделей двовимірних фотонних кристалів з трикутною та квадратною ґратками у COMSOL. 6 Формування лінійних дефектів та створення хвилеводних структур. 7 Чисельний розрахунок дисперсійних характеристик фотонно-кристалічних хвилеводів різної симетрії. 8 Визначення власних мод хвилеводів і аналіз розподілів електромагнітного поля. 9 Порівняння характеристик хвилеводів із різною симетрією та оцінка ефективності локалізації світла. 10 Узагальнення результатів і формування висновків.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел за темою «Власні режими фотонно-кристалічних хвилеводів з різною симетрією»	02.09.25–22.09.25	Виконано
2	Дослідження структур фотонних кристалів з трикутною та квадратною симетрією	26.09.25–07.10.25	Виконано
3	Виконання чисельного моделювання та розрахунків дисперсійних характеристик фотонно-кристалічних хвилеводів у COMSOL	09.10.25–16.10.25	Виконано
4	Аналіз отриманих дисперсійних кривих, власних мод та параметрів хвилеводів для різних типів симетрії решітки	23.10.25–28.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.11.25–13.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–19.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КвР на унікальність	26.11.25–07.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	09.12.25–12.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–18.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Євген ОДАРЕНКО
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 59 с., 38 рис., 1 додаток, 20 джерел.

ВЛАСНІ РЕЖИМИ, ДИСПЕРСІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА, СИМЕТРІЯ СТРУКТУРИ, ФОТОННИЙ КРИСТАЛ, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИЙ ХВИЛЕВІД, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – фотонно-кристалічні хвилеводи з різною симетрією періодичної решітки.

Мета роботи – дослідження власних режимів фотонно-кристалічних хвилеводів із трикутною та квадратною симетрією на основі чисельного моделювання у програмному середовищі COMSOL Multiphysics.

Метод дослідження – теоретичний, чисельний експеримент.

У роботі виконано моделювання фотонно-кристалічних структур із різною симетрією та проведено аналіз впливу геометричних параметрів решітки на дисперсійні характеристики та розподіл електромагнітного поля. Побудовані моделі дозволили визначити власні моди хвилеводів, порівняти ширину фотонної забороненої зони для різних типів симетрії та оцінити ефективність локалізації світлових хвиль у дефектній області. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні фотонних інтегральних схем, сенсорів і оптичних мікропристроїв нового покоління.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 59 p., 38 fig., 1 appendix, 20 sources.

EIGENMODES, DISPERSION CHARACTERISTICS, STRUCTURAL SYMMETRY, PHOTONIC CRYSTAL, PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE, NUMERICAL SIMULATION.

The object of the study is photonic crystal waveguides with different symmetry of the periodic lattice.

The purpose of the work is to study the eigenmodes of photonic crystal waveguides with triangular and square symmetry based on numerical simulation in the COMSOL Multiphysics software environment.

The research method is theoretical, numerical experiment.

The work involves modeling photonic crystal structures with different symmetry and analyzing the influence of the geometric parameters of the lattice on the dispersion characteristics and distribution of the electromagnetic field. The constructed models allowed us to determine the eigenmodes of the waveguides, compare the width of the photonic band gap for different types of symmetry, and evaluate the efficiency of light wave localization in the defect region. The results obtained can be used in the design of photonic integrated circuits, sensors, and new generation optical microdevices.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ	8
1 Фотонно-кристалічні хвилеводи	9
1.1 Теоретичні основи фотонних кристалів	9
1.2 Класифікація фотонних кристалів	10
1.3 Зонна структура та дефекти в фотонних кристалах	11
1.4 Виготовлення та застосування фотонних кристалів	13
1.5 Принципи функціонування фотонно-кристалічних хвилеводів	17
1.6 Типи фотонно-кристалічних хвилеводів	22
1.7 Дисперсійні властивості фотонно-кристалічних хвилеводів	23
1.8 Втрати та зв'язок мод у фотонно-кристалічних хвилеводах	26
1.9 Проектування та виготовлення фотонно-кристалічних хвилеводів	27
1.10 Застосування фотонно-кристалічних хвилеводів	30
1.11 Перспективи розвитку фотонно-кристалічних хвилеводів	34
2 Чисельне моделювання фотонно-кристалічних структур у Comsol	35
2.1 Моделювання трикутної (гексагональної) фотонно-кристалічної структури та побудова моделі з трикутною ґраткою	35
2.2 Дисперсійні характеристики фотонних кристалів	42
2.3 Моделювання фотонно-кристалічних хвилеводів	47
Висновки	57
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Демонстраційний матеріал	60

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ФЗЗ – фотонна заборонена зона;

ФК – фотонний кристал;

ФКХ – фотонно-кристалічний хвилевод.

ВСТУП

Сучасний розвиток фотоніки пов'язаний із пошуком нових способів керування поширенням світла у мікро- та нанорозмірних структурах. Одним із найефективніших рішень є використання фотонних кристалів – штучних періодичних діелектричних структур, що створюють фотонні заборонені зони, подібні до енергетичних зон у напівпровідниках. На основі таких структур формуються фотонно-кристалічні хвилеводи, які дозволяють спрямовувати електромагнітні хвилі завдяки створенню лінійних дефектів у решітці.

Особливий науковий інтерес становить вивчення впливу симетрії фотонної решітки на власні режими хвилеводів, оскільки геометрія структури визначає ширину фотонної забороненої зони та характер дисперсії. Метою роботи є дослідження власних режимів фотонно-кристалічних хвилеводів із різною симетрією за допомогою чисельного моделювання у програмному середовищі COMSOL Multiphysics. У роботі розглянуто поведінку електромагнітних хвиль у структурах з квадратною та трикутною решітками та визначено вплив симетрії на їхні оптичні характеристики.

Отримані результати мають практичне значення для проектування фотонних інтегральних елементів, сенсорів, фільтрів і мікрорезонаторів, що можуть бути використані у телекомунікаційних і лазерних системах нового покоління.

1 ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНІ ХВИЛЕВОДИ

1.1 Теоретичні основи фотонних кристалів

Штучні періодичні структури, відомі як фотонні кристали, визначаються просторовою модуляцією діелектричної проникності протягом періоду, подібного до періоду електромагнітного випромінювання. Вперше ідею ФК незалежно один від одного теоретично обґрунтували Е. Яблонович і С. Джон у 1987 році. Вони продемонстрували, що можна створити структури з фотонними забороненими зонами (рис. 1.1), які нагадують напівпровідникові електронні забороненими зонами [1].

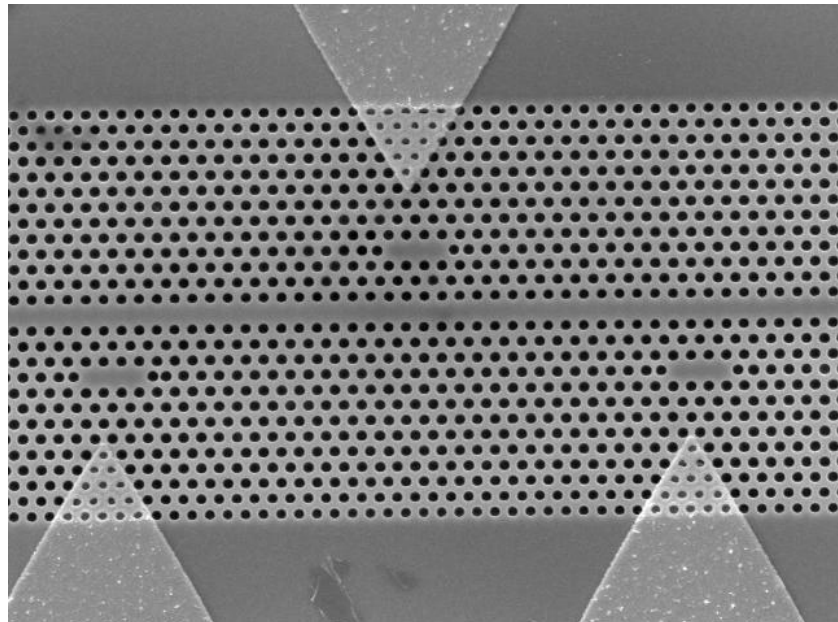


Рисунок 1.1 – SEM-знімок нанопорової структури, де періодичні отвори ~ 200 нм формують фотонну заборонену зону в матеріалі

Фундаментальний принцип ФК полягає в тому, що енергетичні зони створюються і розділяються забороненими зонами в результаті періодичних змін показника заломлення в просторі. Оскільки певні частоти електромагнітних хвиль не можуть поширюватися в цих заборонених зонах, з'являються особливі можливості для керування світловими потоками.

Інтерференція хвиль, розсіяних на періодичній структурі, пов'язана з фізичною природою формування фотонної забороненої зони (ФЗЗ).

Сильне Брегівське розсіювання виникає, коли довжина світлової хвилі наближається до періоду структури, що може повністю запобігти поширенню хвиль певної частоти в заданому напрямку. Хоча до уваги беруться фотони, а не електрони, це явище можна порівняти зі створенням енергетичних зон у кристалах. Залежно від діапазону робочих частот, ФК можуть бути побудовані з широкого спектру матеріалів, таких як напівпровідники, метали та діелектрики [2].

1.2 Класифікація фотонних кристалів

Періодичність структури ФК визначає його класифікацію (рис. 1.2). Багатошарові структури з періодичною зміною шарів з різними показниками заломлення відомі як одновимірні фотонні кристали. Дзеркало Брега, яке складається з шарів матеріалів з високим і низьким показником заломлення, що чергуються, є найпростішим прикладом. Ці структури часто зустрічаються в лазерах та оптичних фільтрах і забезпечують високе відбиття в певному діапазоні частот.

У двовимірних фотонних кристалах діелектрична проникність у двох просторових напрямках періодично модулюється, але в третьому напрямку структура є однорідною. Масиви циліндричних отворів або стрижнів, розміщених у діелектричній матриці в періодичному порядку, є поширеними прикладами. Для створення таких структур можна використовувати сучасні технології мікро- та нанообробки [3].

У всіх трьох просторових напрямках тривимірні фотонні кристали демонструють періодичну структуру. Вони можуть запропонувати повну фотонну заборонену зону – нездатність електромагнітних хвиль певної частоти поширюватися в усіх напрямках у просторі. Хоча створити такі

структури технічно складно, вони надають найбільше можливостей для керування світлом.

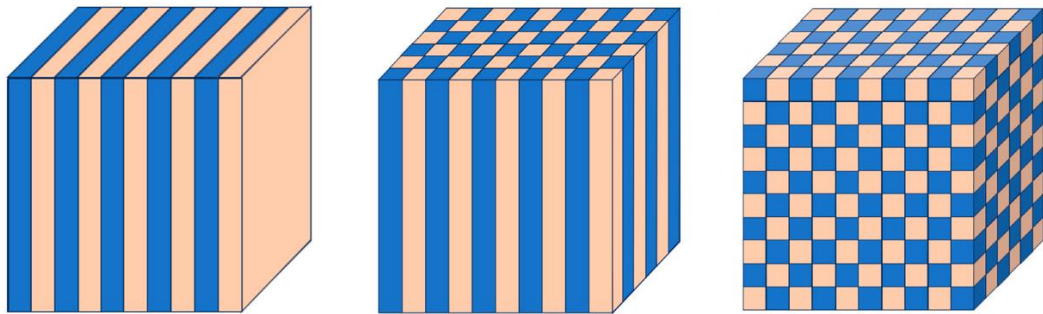


Рисунок 1.2 – Одновимірний, двовимірний, тривимірний варіанти фотонних кристалів

1.3 Зонна структура та дефекти в фотонних кристалах

Рівняння Максвелла для періодичних середовищ описують електромагнітні властивості ФК. Розв'язки цих рівнянь мають форму хвиль Блоха для періодичних структур, в яких електричне поле виражається як добуток комплексного хвильового вектора і експоненти періодичної функції. В результаті формується зонна структура, подібна до кристалічної.

Дисперсійні співвідношення, які встановлюють залежність частоти від хвильового вектора, визначають зонну структуру ФК. Для визначення цих співвідношень розв'язують хвильове рівняння для періодичної структури. Ширина забороненої зони, в якій можуть поширюватися електромагнітні хвилі певних поляризацій і напрямків, і ширина зони, в якій поширення хвиль або неможливе, або сильно пригнічене, є двома основними характеристиками зонної структури.

Контраст показників заломлення складових матеріалів і геометрія структури визначають ширину і розташування ФЗЗ. Ширина забороненої зони розширюється зі збільшенням контрасту показників заломлення. На

характеристики фотонних кристалів також сильно впливає геометрія структури.

Наприклад, на симетрію і величину забороненої зони впливає кругла, еліптична або полігональна форма отворів або стрижнів у двовимірних структурах [4].

Локалізовані моди з'являються в межах ФЗЗ, коли дефекти вводяться в періодичну структуру фотонного кристала. Розмір або склад окремого структурного елемента може бути змінений для створення точкових дефектів. Вони призводять до створення резонансних мод з високою добротністю, що є вигідним для розробки мікрорезонаторів і фільтрів.

Коли кілька компонентів змінюються або видаляються в певному напрямку, створюються лінійні дефекти (рис. 1.3). Ці дефекти створюють хвилевідні канали, які дозволяють світлу з частотами всередині фотонної забороненої зони проходити через них. Коли порушується періодичність площини, виникають планарні дефекти, які можна використовувати для створення планарних хвилеводів [5].

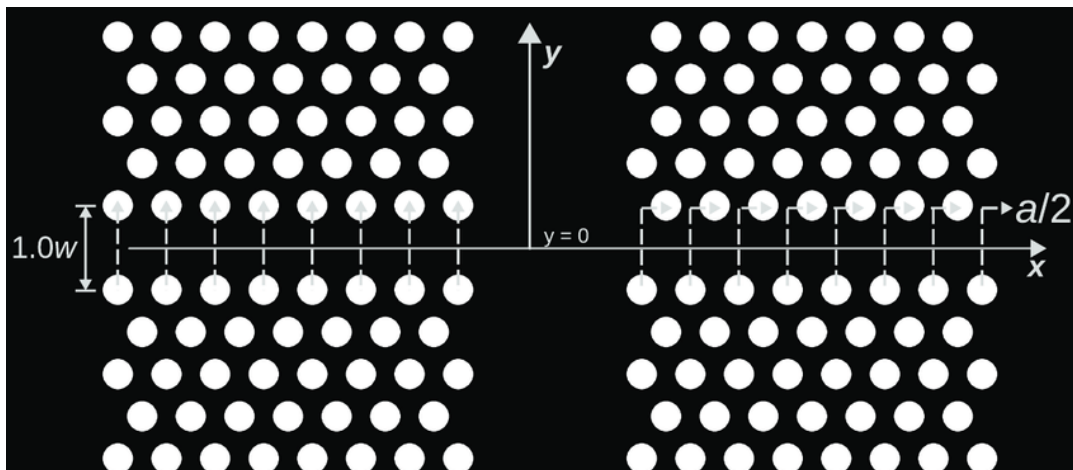
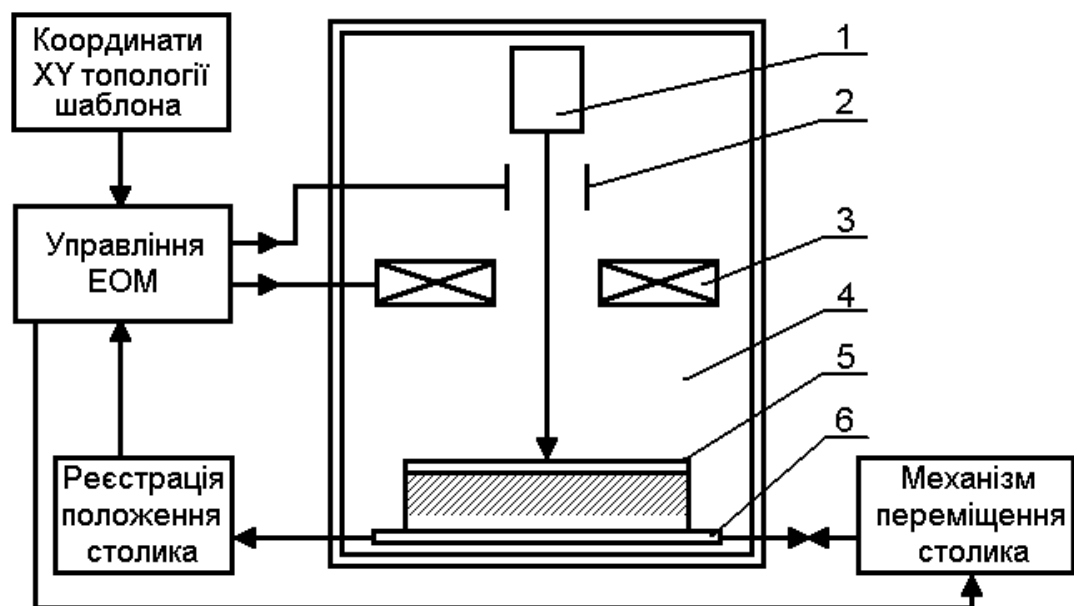


Рисунок 1.3 – Схематичні хвилеводи з двома варіантами лінійних дефектів, які формують спрямовані хвильові канали у фотонному кристалі (PhC)

1.4 Виготовлення та застосування фотонних кристалів

Щоб досягти необхідних оптичних властивостей, складний процес виготовлення фотонних кристалів вимагає надзвичайної точності та контролю над структурними параметрами. Залежно від типу ФК та його призначення, основними методами виготовлення є літографічні методи, самозбірка, золь-гель процеси та комбіновані підходи. Кожен з них має свої переваги та недоліки. Одним з найпопулярніших методів виготовлення двовимірних фотонних кристалів є електронно-променева літографія (рис. 1.4), особливо для пристроїв, що працюють у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах довжин хвиль, де період діелектричної модуляції повинен бути порядку оптичної довжини хвилі. Цей метод дозволяє створювати структури з нанометровою точністю, пропонуючи високу роздільну здатність для малих розмірів пристроїв і гнучкість у дизайні фотонно-кристалічних решіток [6].



1 – електронна гармата; 2 – переривач променя; 3 – відхиляючі котушки лінзи;
4 – вакуумна камера; 5 – підкладка з нанесеним електрорезистом; 6 – столик.

Рисунок 1.4 – Умовна схема пристрою для електронно-променевої літографії

Великомасштабні масиви ФК часто виготовляють за допомогою оптичної літографії, незважаючи на її нижчу роздільну здатність порівняно з електронно-променевою літографією. Нанесення фоторезисту, опромінення його світлом або електронним променем для створення малюнка, а потім використання процесу сухого травлення на основі фтору для перенесення малюнка на підкладку – це етапи процесу літографії. Хоча для тривимірних ФК розроблено низку методів, таких як пошарова літографія, поверхнева іонно-променева літографія та методи мікроманіпуляцій, технологічна складність цих пристроїв робить їх менш поширеними, ніж двовимірні структури [7].

Альтернативним методом створення ФК є метод самоорганізації, який особливо добре працює для тривимірних структур, таких як опал, що складаються зі сферичних частинок кремнезему або полімеру, розташованих у впорядкованій кубічній гранецентрованій решітці. Створення великомасштабних структур і простота виготовлення є двома перевагами цього методу, але структурної регулярності та контролю дефектів все ще важко досягти. Процес спінового покриття використовує форму самоорганізації для отримання плівок з низьким рівнем забруднення, високою ефективністю і точно контрольованою товщиною. Багатошарові планарні фотонні кристали можуть бути отримані з полімерних систем за допомогою процесу спінового покриття, який складається з трьох основних етапів: нанесення розчину, високошвидкісного обертання та сушіння [8].

Ще одним ефективним методом створення ФК є золь-гель процеси, особливо для структур, які функціонують у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі. Змінюючи концентрацію прекурсорів і параметри обробки, ці процедури дозволяють точно контролювати показник заломлення і морфологію структури. Золь-гель методи особливо корисні для формування пористих структур і введення різних матеріалів у вже існуючі фотонні кристали для зміни їхніх оптичних характеристик [9].

Поєднання пошарового випаровування та нанолітографії створює нові можливості для створення складних фотонних структур. Ці методи

потребують лише кількох етапів процесу і базуються на сучасних технологіях, таких як розпилення зі зміщенням, електрохімічне травлення під низьким тиском та електронно-променева літографія. Згідно з попередніми результатами виробництва, високоякісні ФК для реальних застосувань можуть бути досягнуті шляхом розвитку цих технологій.

Завдяки своїй винятковій здатності регулювати взаємодію між фотонами і матеріалами, ФК знаходять застосування в різних галузях промисловості. Мініатюрні фотонні пристрої (рис. 1.5) високої щільності, такі як хвилеводи, розгалужувачі енергії, логічні компоненти та системи зв'язку, виготовляються з використанням фотонних кристалів у телекомунікаційних системах. Завдяки своїм чудовим властивостям, які можуть допомогти у створенні щільних інтегральних схем, хвилеводи з ФК розглядаються як чудові кандидати для цілого ряду застосувань. Ширококутові інтерферометричні з'єднувачі використовуються для з'єднання «волокно-чип» у великосерійному виробництві оптоелектронних чіпів, оскільки вони забезпечують дуже ефективно і незалежно від поляризації з'єднання між фотонними чіпами і зовнішніми пристроями [10].

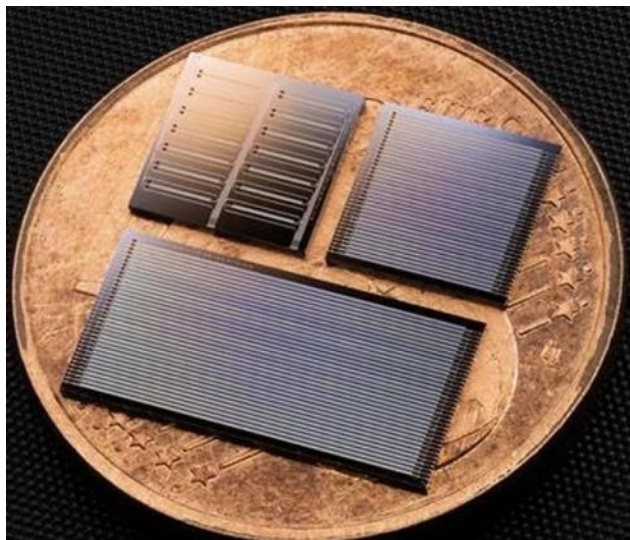


Рисунок 1.5 – Зображення фотонного чипа, створеного з використанням танталату літію

У системах щільного спектрального мультиплексування вузькосмугові фільтри, які вибірково пропускають певні довжини хвиль і блокують інші, можуть бути реалізовані з використанням оптичних фільтрів, створених на основі ФК. У компактних інтегрованих системах поляризацією, фокусуванням і формуванням оптичних пучків можна керувати за допомогою планарних хвилеводних лінз, анізотропних хвилеводів, наноантен і оптичних фазових решіток [11].

Ще однією важливою сферою застосування ФК є сенсорні технології, де завдяки їхній високій чутливості до змін у навколишньому середовищі стали можливими різноманітні сенсори. Сенсори на основі ФК корисні для біомедичних застосувань, моніторингу навколишнього середовища, контролю якості харчових продуктів та систем безпеки, оскільки вони можуть виявляти навіть найменші зміни у складі речовини з високою чутливістю. Біохімічні сенсори пропонують винятковий потенціал для сенсорних застосувань завдяки використанню чіткої геометричної структури фотонно-кристалічних волокон для отримання унікальних властивостей і можливостей [12].

Оскільки ФК можуть контролювати поширення світла, вони є перспективними для підвищення ефективності поглинання та перетворення сонячної енергії. Використовуючи технологію мокрого травлення з менш ніж 10 мк кристалічного кремнію, фотонно-кристалічні структури можуть досягти майже ідеального поглинання і захоплення сонячного світла в діапазоні довжин хвиль від 300 нм до 1100 нм.

ФК активно використовуються в лазерних системах для розробки лазерів з електричним накачуванням з покращеними властивостями, такими як знижений поріг генерації, підвищена ефективність перетворення електричної енергії в оптичну та кращий контроль над модовим складом. Фотонно-кристалічні резонатори забезпечують сильне просторове утримання світла, що є вигідним для розробки невеликих, малопотужних лазерних пристроїв.

Селективні властивості ФК використовуються в абсорберах для сонячних термофотовольтаїчних застосувань, щоб максимізувати спектральне поглинання та випромінювання теплового випромінювання. Це дозволяє термофотовольтаїчним системам більш ефективно перетворювати теплову енергію в електричну [13].

Нова галузь досліджень представлена топологічними ФК, які використовують топологічні характеристики для створення оптичних пристроїв, стійких до дефектів. Гострі та регульовані резонанси утворюються за рахунок взаємодії особливих об'ємних та поверхневих станів цих структур з фотонними модами. Динамічне керування спектральним положенням і шириною резонансної лінії стає можливим завдяки зовнішнім полям, які регулюють енергію Фермі в топологічних структурах. Це дає змогу налаштовувати їх у реальному часі і є важливим для багатопараметричного зондування.

Розвиток гібридних структур, інтеграція зі звичайними напівпровідниковими технологіями та виробництво багатоцільових пристроїв – це сучасні тенденції розвитку фотонних кристалів. Інтенсивні дослідження, що проводяться з метою подолання технологічних обмежень та масштабування технологій для комерційного виробництва, відкривають можливості для широкого застосування пристроїв на основі фотонних кристалів у різних галузях промисловості та наукових дослідженнях.

1.5 Принципи функціонування фотонно-кристалічних хвилеводів

Основні уявлення про взаємодію електромагнітного випромінювання з періодичними діелектричними структурами лежать в основі роботи фотонно-кристалічних хвилеводів, які дозволяють керувати поширенням світла на рівні, який неможливий у звичайних оптичних хвилеводах. Їх робота заснована на формуванні в періодичній структурі фотонних заборонених зон (рис. 1.6) – діапазонів частот, де деструктивна інтерференція між відбитими

хвилями від різних елементів періодичної структури перешкоджає поширенню електромагнітних хвиль. Періодична модуляція показника заломлення в просторі викликає брегівські відбиття на межах між областями з різними оптичними властивостями, що призводить до виникнення цих заборонених зон.

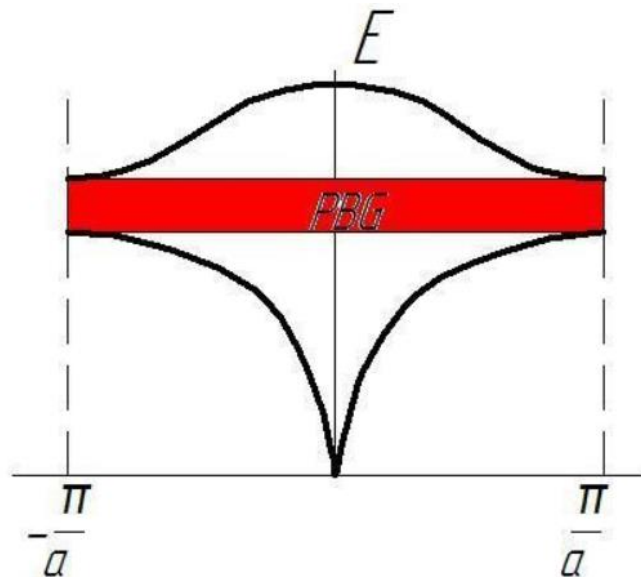


Рисунок 1.6 – Фотонна заборонена зона

Фотонно-кристалічні хвилеводи (ФКХ) використовують принципи фотонних кристалів для регулювання шляху проходження світла. На відміну від звичайних хвилеводів з повним внутрішнім відбиттям, які утримують світло завдяки різним показникам заломлення серцевини та оболонки, ФКХ використовують фотонні заборонені зони, щоб запобігти поширенню певних частот у поперечних напрямках.

ФКХ – це лінійний дефект у решітці модифікованих елементарних комірок, який використовує як розподілені відбиття від фотонно-кристалічної структури, так і повне внутрішнє відбиття на межі розділу для спрямування світла. Ця ідея дає змогу ефективно керувати оптичними режимами в невеликих пристроях і дозволяє створювати хвилеводи з малим радіусом

вигину. Існує два основні методи керування світлом у ФКХ: керування ФЗЗ та керування показником заломлення. Перший механізм, який називається індекс-контролем, гарантує, що світло утримується в серцевині хвилеводу за рахунок повного внутрішнього відбиття, використовуючи різницю в ефективному показнику заломлення між серцевиною і навколишньою фотонно-кристалічною структурою.

Використовуючи ФЗЗ у фотонно-кристалічній структурі, що оточує серцевину хвилеводу, другий механізм, відомий як керування фотонною забороненою зоною, утримує світло з частотами, що потрапляють у заборонену зону, сконцентрованим в серцевині, запобігаючи його поширенню в навколишній структурі [14].

Створення лінійного дефекту в періодичній структурі фотонного кристала, який порушує періодичність в одному напрямку, є основним механізмом хвилевода. В межах ФЗЗ цей дефект створює локалізовані дозволені стани в області дефекту. Частоти в межах ФЗЗ змушують світло поширюватися вздовж дефекту, а не в періодичній частині кристала. Таким чином створюються хвилеводні моди з особливими характеристиками, включаючи аномальну дисперсію, низькі втрати і потенціал для сильного утримання світла в субхвильових областях.

Матеріали з періодично структурованим показником заломлення, що досягається у фотонно-кристалічних волокнах (рис. 1.7) шляхом випадкового розташування повітряних отворів у діелектричному матеріалі, утворюють фотонні заборонені зони. Залежно від геометричних параметрів фотонно-кристалічної структури, таких як період кристалічної решітки, розмір і форма отворів, а також показник заломлення матеріалу, ці смуги пропускання можуть формуватися для різних частот. Оскільки фотонні кристали можуть утримувати і спрямовувати світло через вузькоканальні хвилеводи навколо надзвичайно гострих вигинів з розмірами порядку оптичних довжин хвиль, у ФКХ можливе сильне утримання світла.

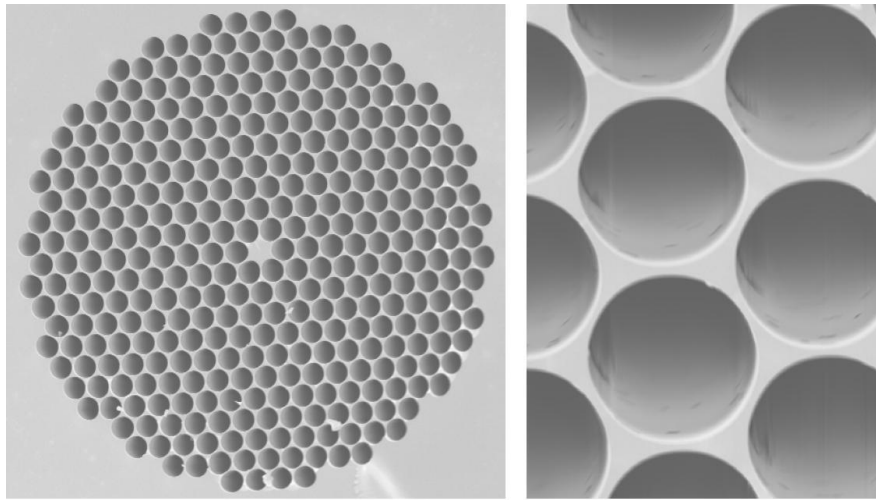


Рисунок 1.7 – Мікроснімок структури фотонно-кристалічного волокна

Оскільки ФКХ можуть керувати як груповою швидкістю світла, так і дисперсією групової швидкості, їхні дисперсійні властивості дуже відрізняються від властивостей звичайних хвилеводів. Ефект «повільного світла», який має вирішальне значення для застосування в нелінійній оптиці і сенсорних технологіях, викликаний значним зменшенням групової швидкості світла поблизу краю ФЗЗ. Причиною цього ефекту є сильна дисперсія в області перетину дозволеної і забороненої зон, де дисперсійна крива має малий нахил, що відповідає малій груповій швидкості. Компенсація дисперсії в телекомунікаційних системах і підвищення ефективності нелінійних процесів – два приклади того, як керування дисперсійними характеристиками може оптимізувати продуктивність пристрою для конкретних застосувань.

Геометрія дефекту у фотонно-кристалічній решітці та властивості ФЗЗ визначають модову структуру ФКХ. Коли елементи регулярної фотонної кристалічної решітки видаляються поспіль для створення хвилеводу, утворюються дозволені моди, які можуть поширюватися в області дефекту, але не можуть поширюватися в навколишній фотонній кристалічній структурі. Ширина дефекту, глибина ФЗЗ і поляризація світла впливають на кількість і властивості мод. Фотонна кристалічна структура може забезпечити одномодовий режим роботи в широкому спектральному діапазоні для

поперечних електричних мод, які поляризовані переважно вздовж певного напрямку.

Еванесцентні поля створюються, коли світло взаємодіє з фотонно-кристалічною структурою. Ці поля можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем і виходити за фізичні межі хвилеводу. Цей ефект особливо важливий для сенсорних застосувань, оскільки зміни навколишнього середовища можуть мати великий вплив на властивості поширення світла у хвилеводі [15].

Сильне просторове обмеження електромагнітного поля і контрольовані дисперсійні характеристики у ФКХ посилюють нелінійні ефекти. Ефективність нелінійних процесів, таких як чотирихвильове змішування, генерація гармонік і параметричне підсилення, підвищується завдяки високій напруженості поля в малому об'ємі. Можна максимізувати ефективність цих процедур для конкретних застосувань, керуючи фазовим узгодженням за допомогою дисперсійного контролю.

Внутрішні втрати від поглинання і розсіювання матеріалу та зовнішні втрати від структурних дефектів, спричинених виробничими допусками, складають втрати ФКХ. Додаткові втрати на поширення, пов'язані зі збудженням мод випромінювання і зворотним розсіюванням, можуть бути наслідком структурних дефектів, які викликають явища розсіювання при поширенні світла. Проектування і виробництво ФКХ для реальних застосувань вимагає мінімізації цих втрат.

Через зміни геометричних параметрів та показника заломлення матеріалу, температурні та механічні впливи на ФКХ можуть кардинально змінювати їхні оптичні властивості. У той час як механічна деформація може змінити період решітки і форму дефектів, термооптичні ефекти можуть спричинити зміну спектральних характеристик ФЗЗ. Ці ефекти необхідно враховувати при проектуванні стабільних систем або, з іншого боку, їх можна використовувати для створення оптичних пристроїв з можливістю перенастроювання. Для ФКХ можна охарактеризувати високодобротні

механічні режими поперечних коливань на частотах у кілька мегагерц. Це уможливорює сильний зв'язок між оптичними і механічними ступенями свободи, створюючи перспективи для оптомеханічних застосувань.

1.6 Типи фотонно-кристалічних хвилеводів

Фотонно-кристалічні хвилеводи (рис. 1.8) можна класифікувати, залежно від типу дефекту, який формує хвилеводний канал. Коли один або кілька рядів елементів видаляються з періодичної структури, утворюються хвилеводи з видаленими рядами. Ці хвилеводи можуть вміщувати одномодовий режим в широкому діапазоні частот і відрізняються порівняно великим ефективним показником заломлення. Дисперсійні властивості і втрати сильно залежать від ширини каналу хвилеводу і кількості видалених рядів.

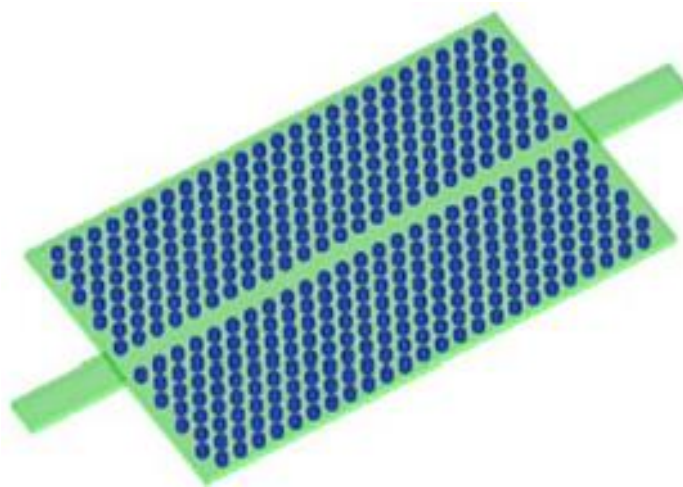


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення фотонно-кристалічного хвилеводу

Модифіковані хвилеводи створюються шляхом зміни матеріалу або розміру елементів уздовж певної лінії. У порівнянні з хвилеводами з видаленим рядом, це дозволяє більш точно контролювати дисперсійні властивості хвилеводу. Можливе як збільшення, так і зменшення розміру

елементів, що дозволяє оптимізувати властивості хвилеводу для конкретних застосувань.

Шляхом включення додаткових компонентів у кристалічну структуру створюються хвилеводи з інтродукованими дефектами. За допомогою цього методу можна виготовляти хвилеводи з бажаними характеристиками без зміни загальної топології структури. Введені елементи надають додаткові ступені свободи для оптимального налаштування показника заломлення, а також геометричних параметрів хвилеводу – його розміру та форми.

1.7 Дисперсійні властивості фотонно-кристалічних хвилеводів

Дисперсійні властивості фотонно-кристалічних хвилеводів є одним із ключових чинників, що визначають особливості поширення електромагнітного випромінювання. Залежність частоти електромагнітних коливань від хвильового вектора, який описує напрямок і швидкість поширення світла в структурі, подається у вигляді дисперсійної діаграми (рис. 1.9), яка використовується для характеристики дисперсії у фотонно-кристалічних хвилеводах [16].

Основною характеристикою дисперсії ФКХ є те, що вона принципово відрізняється від дисперсії традиційних оптичних волокон. У фотонно-кристалічних структурах дисперсійні характеристики формуються періодичною модуляцією показника заломлення і специфічною геометрією повітряних включень, тоді як у звичайних волокнах дисперсія в першу чергу визначається геометрією серцевини і властивостями матеріалу скла.

Взаємодія між електромагнітним полем і періодичною структурою оболонки викликає хвилеводну дисперсію у фотонно-кристалічних волокнах, яку можна регулювати, змінюючи параметри кристалічної решітки. На дисперсійні характеристики хвилеводу безпосередньо впливають діаметр повітряних отворів, відстань між ними та кількість шарів повітряних

включень, що дозволяє досягти особливих властивостей, недосяжних для традиційних волокон.

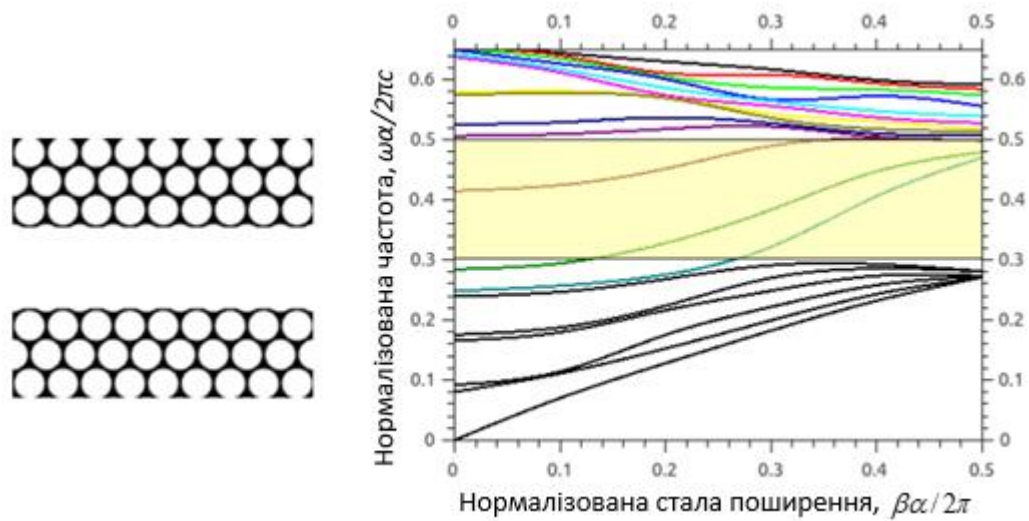


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення фотонно-кристалічного хвилеводу разом із його дисперсійною діаграмою

Здатність зміщувати нульову дисперсію ФКХ у широкому спектральному діапазоні створює нові можливості для нелінійної оптики і телекомунікаційних застосувань. Це досягається завдяки тому, що, залежно від точної геометрії фотонно-кристалічної структури, дисперсія хвилеводу може компенсувати матеріальну дисперсію кварцу в різних спектральних областях.

На відміну від звичайних кварцових волокон, які демонструють аномальну дисперсію лише в інфрачервоному спектрі, фотонно-кристалічні хвилеводи демонструють її навіть у видимому спектрі. Формування аномальної швидкості групової дисперсії на коротких довжинах хвиль стає можливим завдяки тому, що у фотонно-кристалічних структурах внесок дисперсії хвилеводу може значно переважати над внеском дисперсії матеріалу.

Розширення оптичних імпульсів при проходженні вздовж волокна визначається параметром, який характеризує групову дисперсію швидкості у ФКХ. Можливість отримання як областей з майже нульовою дисперсією в

широкому спектральному діапазоні, так і надзвичайно високих значень групової дисперсії швидкості – це те, що робить фотонно-кристалічні структури унікальними [17].

Залежно від геометрії дефектів і параметрів фотонно-кристалічної решітки, багатомодова дисперсія у ФКХ може підтримувати кілька режимів поширення, кожен з яких має свої унікальні характеристики. Дисперсійні характеристики різних мод можуть бути використані для селективного керування окремими спектральними компонентами випромінювання або для побудови мультиплексних систем передачі інформації.

У ФКХ поляризаційна дисперсія виникає через порушення циліндричної симетрії структури, яке може бути навмисно введене для отримання двопротенезаломлюючих властивостей або може бути ненавмисним наслідком особливостей технології виготовлення. Маніпулюючи поляризаційною дисперсією, можна виготовляти фотонно-кристалічні волокна з високим ступенем збереження поляризації або, навпаки, з контрольованим змішуванням поляризаційних станів.

Дисперсійні характеристики ФКХ сильно залежать від температури, що пов'язано як з тепловим розширенням структури, так і з температурними змінами показника заломлення матеріалу. Оптимізація геометричних параметрів фотонно-кристалічної решітки може зменшити температурну залежність дисперсії або компенсувати її, використовуючи матеріали з різними температурними коефіцієнтами.

При високих інтенсивностях світла, коли показник заломлення матеріалу починає залежати від потужності випромінювання, нелінійна дисперсія у ФКХ стає очевидною. ФКХ особливо цікаві для застосування в нелінійній оптиці, оскільки в них можна керувати дисперсійними характеристиками і досягати високих значень площі поперечного перерізу ефективної моди.

Заповнюючи повітряні отвори рідинами з різними оптичними характеристиками, регулюючи температуру або змінюючи механічне

навантаження, можна керувати дисперсією у ФКХ як на етапі проектування структури, так і після її виготовлення. Це уможливує розробку активних пристроїв з регульованими дисперсійними властивостями.

Оскільки практично неможливо знайти аналітичні розв'язки для ФКХ, моделювання їхніх дисперсійних властивостей вимагає використання передових чисельних методів, таких як метод скінченних елементів або метод плоских хвиль. Точне моделювання має важливе значення для прогнозування реальних характеристик пристрою. Ультракороткі лазерні імпульси, ефективні нелінійні оптичні перетворювачі, фотонно-кристалічні волокна (рис. 1.10) та інші новітні фотонні пристрої з відмінними характеристиками, недосяжними для звичайних оптичних систем, є прикладами практичної значущості дисперсійних властивостей ФКХ.

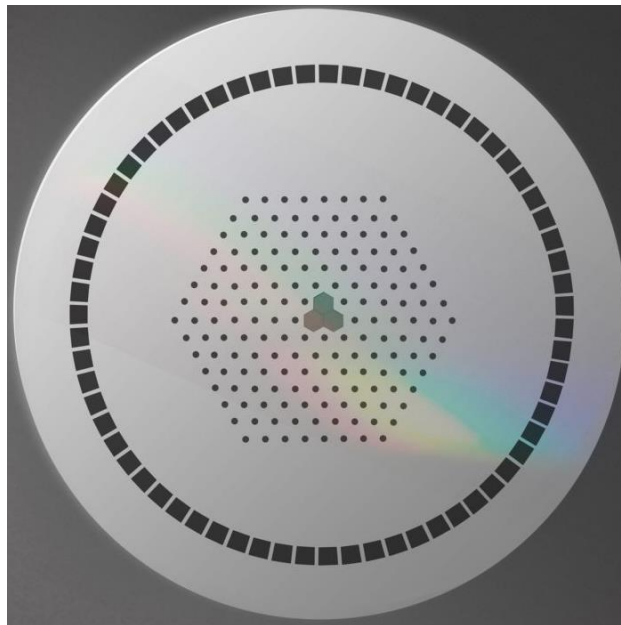


Рисунок 1.10 – Знімок структури фотонно-кристалічного волокна

1.8 Втрати та зв'язок мод у фотонно-кристалічних хвилеводах

Найважливішими механізмами, що спричиняють втрати у ФКХ, є матеріальні, радіаційні та втрати на розсіювання. Дефекти технології, такі як шорсткість поверхні, варіації розмірів елементів і відхилення від ідеальної

періодичності структури, призводять до втрат на розсіювання. Розсіювання світла на структурних дефектах і малі розміри кристала спричиняють втрати на випромінювання, які особливо помітні на вигинах хвилеводу, де основна мода може збуджувати моди випромінювання. Для їх мінімізації потрібна висока якість виготовлення і ретельна оптимізація геометрії хвилеводу.

Внутрішнє поглинання світла матеріалом фотонного кристала пов'язане з матеріальними втратами. У більшості випадків вони збігаються з величиною втрат у відповідному об'ємному матеріалі. Для досягнення високої ефективності дуже важливо вибирати матеріали з низьким коефіцієнтом поглинання в робочому діапазоні частот.

Важливою складовою ФКХ, окрім втрат, є зв'язок мод. Такий зв'язок може мати місце там, де порушується симетрія структури або з'являються нові дефекти. Він може бути використаний для реалізації функціональних елементів, таких як спрямовані об'єднувачі або розгалужувачі, або ж може призвести до небажаних втрат.

Оптимальний вибір параметрів структури дозволяє регулювати зв'язок з режимами випромінювання, що є важливим для величини втрат на випромінювання. У той час як слабкий зв'язок зменшує втрати, але ускладнює вхід і вихід світла у хвилеводі, сильний зв'язок призводить до значних втрат. Зв'язок з модами оболонки також є важливим; це особливо помітно в структурах з малими розмірами, і він впливає на крайові ефекти системи та розподіл енергії.

1.9 Проектування та виготовлення фотонно-кристалічних хвилеводів

Вибір відповідної геометрії фотонного кристала є першим кроком у проектуванні ФКХ. На вибір насамперед впливають контраст показника заломлення і тип решітки. Для двовимірних структур найбільш широко використовуються квадратні та трикутні решітки. Через свою вищу симетрію трикутна решітка зазвичай пропонує ширші фотонні заборонені зони. Ширина

ФЗЗ визначається контрастністю показника заломлення. Хоча це може ускладнити виробництво, вищий контраст створює ширшу ширину забороненої зони. Залежно від конкретного застосування і типу структури, коефіцієнт заповнення – відношення об'єму матеріалу з високим показником заломлення до загального об'єму елементарної комірки – має ідеальне значення. У випадку проектування, наприклад, вузькосмугового мікрорезонаторного фільтра (рис. 1.11), вибір геометрії та параметрів фотонного кристала особливо критичний, оскільки від них залежить резонансна частота, добротність та ефективність фільтрації.

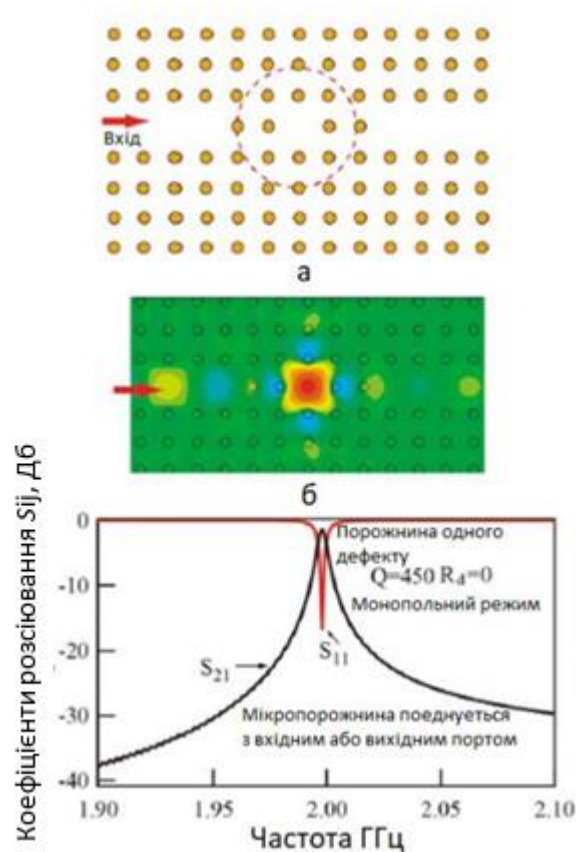


Рисунок 1.11 – Вузькосмуговий мікрорезонаторний фільтр

Ширина хвилеводу, глибина модуляції та період структури є основними параметрами, які необхідно оптимізувати. Ширина хвилеводу впливає на дисперсійні властивості і визначає кількість підтримуваних мод. Ретельна

оптимізація ширини необхідна для одномодового режиму. Глибина модуляції впливає на ступінь локалізації моди і рівень втрат. Погане утримання світла може бути наслідком занадто малої модуляції, тоді як високі втрати можуть бути наслідком занадто великої модуляції.

ФКХ проектують за допомогою різних чисельних методів. При визначенні зонної структури періодичних структур добре працює метод плоских хвиль, однак він менш придатний для аналізу дефектів. Хоча він використовує багато обчислювальної потужності, метод кінцевих різниць у часовій області ідеально підходить для моделювання розповсюдження імпульсів і визначення втрат.

Незважаючи на свою універсальність у вирішенні складної геометрії та граничних умов, метод скінченних елементів вимагає значних обчислювальних затрат. Метод власних мод добре підходить для визначення дисперсійних характеристик і дослідження хвилеводних структур. Конкретна задача і доступні обчислювальні ресурси визначають, який підхід є найкращим [18].

Для створення ФКХ потрібні сучасні мікро- та нановиробничі технології. Реактивне іонне травлення часто використовується після методів електронно-променевої літографії для створення двовимірних структур у напівпровідникових матеріалах. Завдяки цій технології геометричні параметри структури можуть бути відтворені з високою точністю.

Скляні матеріали можна формувати за допомогою іонного обміну або лазерної обробки. Хоча за допомогою лазерної обробки можна створювати тривимірні структури, єдиними обмеженнями є роздільна здатність і якість поверхні. Хоча іонний обмін забезпечує гладку поверхню, він обмежений у видах матеріалів і геометрії, які можуть бути використані.

Для того, щоб хвилеводи мали бажані властивості, важливим є контроль якості виготовлення. Атомно-силова мікроскопія використовується для аналізу шорсткості поверхні, оптичні методи – для вимірювання показника

заломлення і втрат, а растрова електронна мікроскопія - для геометричних параметрів.

1.10 Застосування фотонно-кристалічних хвилеводів

Завдяки своїй особливій здатності контролювати дисперсійні характеристики, сильно обмежувати світло і створювати фотонні заборонені зони, ФКХ широко використовуються в сучасних оптоелектронних пристроях. Завдяки цим характеристикам вони є невід'ємною частиною багатьох технологічних застосувань.

ФКХ використовуються в телекомунікаційних системах для побудови невеликих, малопотужних, компактних оптичних ланцюгів. Здатність фотонно-кристалічних структур забезпечувати селективну передачу окремих спектральних каналів з високою точністю лежить в основі роботи мультиплексорів – пристроїв, які об'єднують сигнали різних довжин хвиль в єдиний оптичний канал, і демультимплексорів – пристроїв, які розділяють об'єднаний сигнал на окремі спектральні складові. Оптичні маршрутизатори використовують властивості ФКХ з низькими втратами і контрольованою дисперсією для створення швидких і ефективних систем комутації, спрямовуючи оптичні сигнали в потрібному напрямку. Для систем щільного спектрального мультиплексування особливо корисними є Q-фільтри (рис 1.12) – фотонно-кристалічні дисперсійні фільтри – для селективного вибору потрібних частот з широкого спектру. Інтерферометричні з'єднувачі – це широкосмугові пристрої, які з'єднують фотонні чіпи із зовнішніми пристроями у високоефективний і незалежний від поляризації спосіб.

ФКХ широко використовуються в лазерних технологіях для створення селективних резонаторів і розподіленого зворотного зв'язку. Виробництво одномодових лазерів з вузькою спектральною лінією стало можливим завдяки розподіленим зворотним зв'язкам, або DFB (від англ. Distributed Feedback,

розподілений зворотний зв'язок), які є фотонно-кристалічними структурами, що забезпечують селективний зворотний зв'язок для певних довжин хвиль.

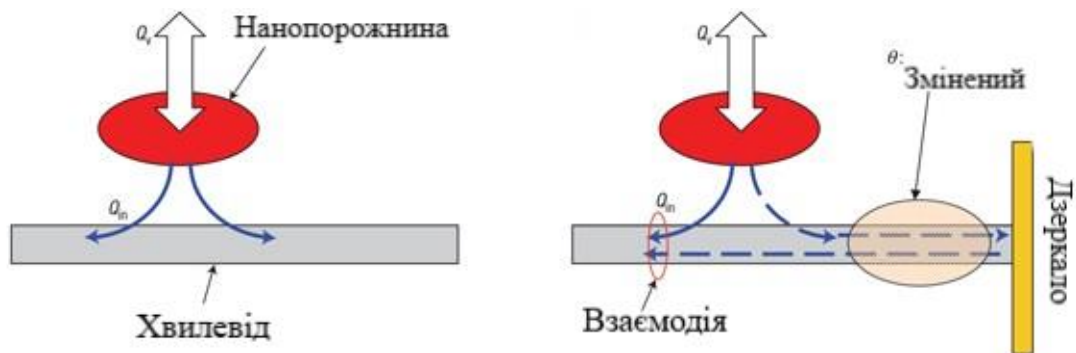


Рисунок 1.12 – Концепція топологічного Q-фільтра

ФЗЗ використовуються у селективних резонаторах для створення резонаторів з керованими модовими характеристиками і високою добротністю. Явище повільного світла у ФКХ, яке забезпечує низьку групову дисперсію швидкості і запобігає спотворенню високошвидкісних оптичних сигналів, лежить в основі лазерів на повільному світлі. Керування властивостями дисперсії забезпечує стабільну роботу за різних обставин і оптимізує параметри лазерного випромінювання.

Іншою важливою сферою застосування ФКХ є нелінійна оптика, де їх сильне утримання світла і контроль дисперсії використовуються для підвищення ефективності нелінійних процесів. У ФКХ з можливістю перестроювання в широкому спектральному діапазоні чотирьоххвильове змішування – нелінійний оптичний процес взаємодії чотирьох хвиль – демонструє високу ефективність, досягаючи коефіцієнта перетворення до 18,9 дБ з можливістю перестроювання в діапазоні 10 нм. Компактні пристрої з низьким енергоспоживанням стали можливими завдяки параметричним підсилювачам, які використовують явище повільного світла у фотонно-кристалічних структурах. Контроль дисперсійних характеристик забезпечує

оптимальні умови для ефективного перетворення генерації другої гармоніки, що є процесом перетворення частоти.

Оскільки ФКХ можуть виявляти навіть найменші концентрації речовин і мають високу чутливість до зміни показника заломлення, вони широко використовуються в сенсорних технологіях. Біомедичні сенсори на основі фотонних кристалів (рис. 1.13) використовуються для виявлення ракових клітин, особливо базальноклітинної карциноми, з високою чутливістю. Кільцеві резонатори на основі ФК, які дозволяють аналізувати гемоглобін, лейкоцити, еритроцити та рівень цукру в крові, застосовуються в аналізі крові. Компактні біомедичні сенсори на основі 2D фотонних кристалів використовуються в аналізі сечі для вимірювання кількості глюкози.

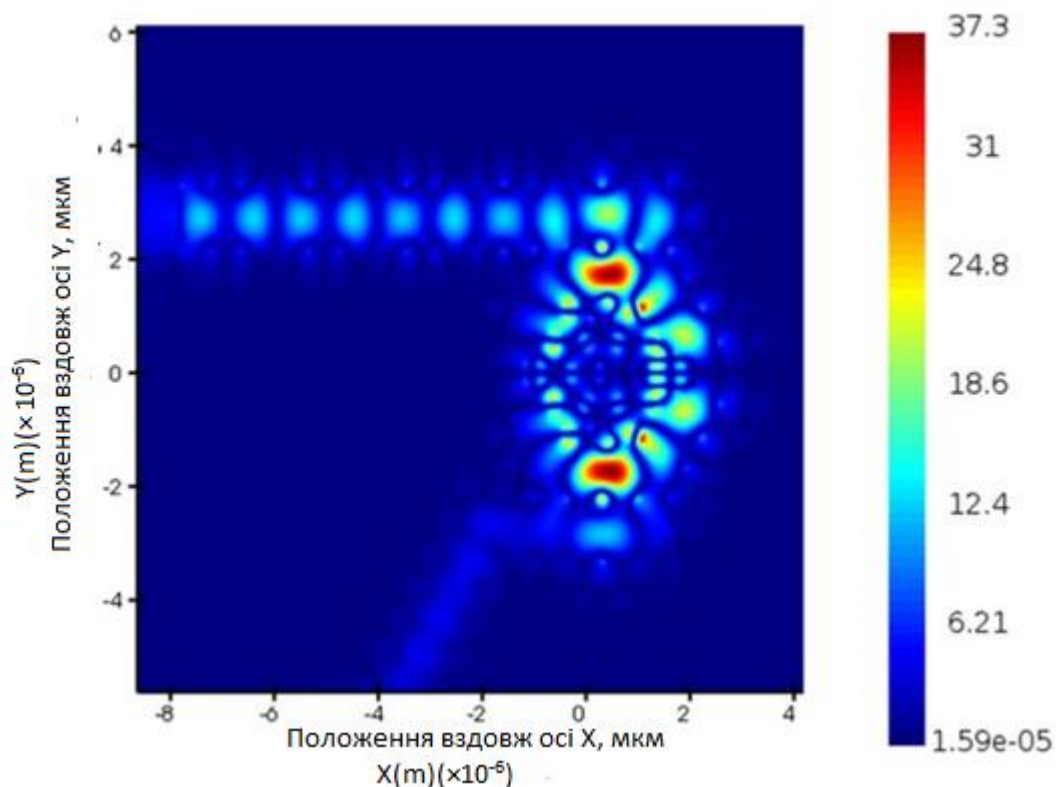


Рисунок 1.13 – Модель біомедичного сенсора для виявлення ракових клітин: резонансна частота реагує на зміну показника заломлення клітин

Оскільки ФКХ можуть регулювати взаємодію між окремими фотонами та квантовими випромінювачами, вони активно використовуються у квантових технологіях. Основою квантової оптомеханіки є потужна взаємодія між окремими фотонами коливального типу та індивідуальними атомами. Така взаємодія реалізується завдяки механічним модам поперечних коливань з частотами в межах кількох мегагерц, притаманних фотонним кристалічним хвилеводам. Для створення квантово-оптичних елементів використовуються квантові випромінювачі, які ґрунтуються на взаємодії атомів поблизу краю забороненої зони фотонного кристалу [19].

ФКХ розглядаються інтегральними оптичними схемами як важлива частина функціональності та зменшення розмірів складних оптичних систем. В інтегральних оптичних схемах світло фокусується та колімується за допомогою планарних хвилеводних лінз. Керування поляризацією світла та розробка поляризаційно-чутливих пристроїв стали можливими завдяки анізотропним хвилеводам. Напрямок випромінювання та створення оптичних променів можна контролювати за допомогою наноантен та оптичних фазових решіток.

Розробка топологічних фотонно-кристалічних структур та дослідження топологічного поширення у фотонних кристалах на телекомунікаційних довжинах хвиль є сучасними тенденціями в розробці ФКХ, що створює нові можливості для розробки оптичних пристроїв, стійких до дефектів. ФКХ є перспективними для масового виробництва та комерціалізації завдяки їхній сумісності з сучасними технологіями мікроелектроніки шляхом інтеграції з кремнієвою фотонікою. Завдяки своїй здатності регулювати поширення світла та забезпечувати надзвичайно чутливе виявлення широкого спектру речовин та біологічних об'єктів, фотонно-кристалічні сенсори стають дедалі популярнішими в біомедичній та екологічній сферах.

1.11 Перспективи розвитку фотонно-кристалічних хвилеводів

Створення нових матеріалів, архітектур та вдосконалених технологій виробництва пов'язане з потенціалом розвитку ФКХ. Метою поточних досліджень є розробка перенастроюваних структур, характеристики яких можуть змінюватися у відповідь на зовнішні подразники, такі як температура, оптичне випромінювання або електричні поля.

Зменшення втрат, підвищення точності геометричних параметрів і зниження виробничих витрат є цілями розвитку технології виробництва. Хвилеводи зі спеціальними властивостями тепер можна виготовляти завдяки новим матеріалам, таким як композитні структури та метаматеріали.

Одним з найважливіших напрямків досліджень для створення складних оптичних систем на кристалі є інтеграція ФКХ з іншими оптичними та електронними компонентами. Це вимагає створення ефективних методів з'єднання з використанням активних елементів і звичайних хвилеводів. Розуміння основних фізичних процесів у ФКХ та створення нових ідей для керування світлом є метою теоретичних досліджень. Це охоплює дослідження квантових явищ у періодичних структурах, нелінійних ефектів і взаємодії світла з речовиною [20].

Для широкого впровадження ФКХ у комерційну сферу вирішальне значення мають стандартизація та метрологічне забезпечення. Інтеграція таких пристроїв у реальні системи стане значно простішою за наявності чітко визначених стандартів характеристик, методів вимірювання та критеріїв якості. Водночас зростає актуальність оцінки впливу виробництва і застосування ФКХ на навколишнє середовище. Для сталого розвитку цієї галузі необхідно впроваджувати екологічно безпечні технології виготовлення та експлуатації.

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР У COMSOL

2.1 Моделювання трикутної (гексагональної) фотонно-кристалічної структури та побудова моделі з трикутною ґраткою

COMSOL Multiphysics є сучасним інженерним програмним комплексом, який надає можливість виконувати моделювання та чисельні експерименти для широкого спектра фізичних процесів і явищ. Програмне забезпечення дозволяє проводити розрахунки у сферах електродинаміки, механіки, гідродинаміки, теплопередачі, а також у задачах, пов'язаних з акустикою та коливаннями. Завдяки COMSOL можна досліджувати як електромагнітні хвилі, так і процеси деформації, перенесення тепла, хімічні реакції, рух газів і рідин та інші складні явища.

У контексті досліджень фотонно-кристалічних структур ця програма є ефективним інструментом для аналізу їх характеристик і принципів роботи. Вона дозволяє врахувати складні електромагнітні взаємодії у таких середовищах, зокрема дисперсійні властивості, передачу хвиль, взаємодію з матеріалами різної природи. Це відкриває можливість як для створення нових типів фотонних структур, так і для оптимізації їх параметрів з метою підвищення ефективності.

Під час розробки фотонно-кристалічної структури у COMSOL Multiphysics застосовувався модуль Electromagnetic Waves, Frequency Domain (електромагнітні хвилі в частотній області). Даний модуль використовується для аналізу електромагнітних полів у спектральній області, що забезпечує можливість безпосереднього дослідження поведінки хвиль на різних частотах. Це особливо важливо у завданнях, де необхідно врахувати взаємодію хвиль із матеріалами та складними періодичними конфігураціями. Frequency Domain дозволяє оцінювати характеристики відбиття, поглинання, розсіювання та поширення хвиль, що робить його корисним при проектуванні антен,

оптичних і радіочастотних пристроїв, фільтрів та інших елементів сучасної електроніки.

Для чисельного розв'язання задачі було вибрано певні параметри системи (рис. 2.1).

Name	Expression	Value	Description
a0	1[m]	1 m	
a0divR	3.125	3.125	
R	a0/a0divR	0.32 m	
alpha	if(k<1,2/3*(1-k),if(k<2,0.5*(k-1),1/6*(k+1)))	0.66667	
beta	if(k<1,1/3*(1-k),if(k<2,0.5*(k-1),-1/6*(k-5)))	0.33333	
k	0	0	
kx	alpha*k0*sqrt(3)/2	4.1888 1/m	
ky	k0*(beta-0.5*alpha)	0 1/m	
k0	4*pi/sqrt(3)/a0	7.2552 1/m	
d	2*R/3	0.21333 m	

Рисунок 2.1 – Перелік параметрів системи

Геометрію проекту представлено на рис. 2.2. Її побудову виконано за допомогою таких базових функцій, як багатокутник, коло, дзеркало. Параметри багатокутника наведено на рис. 2.3.

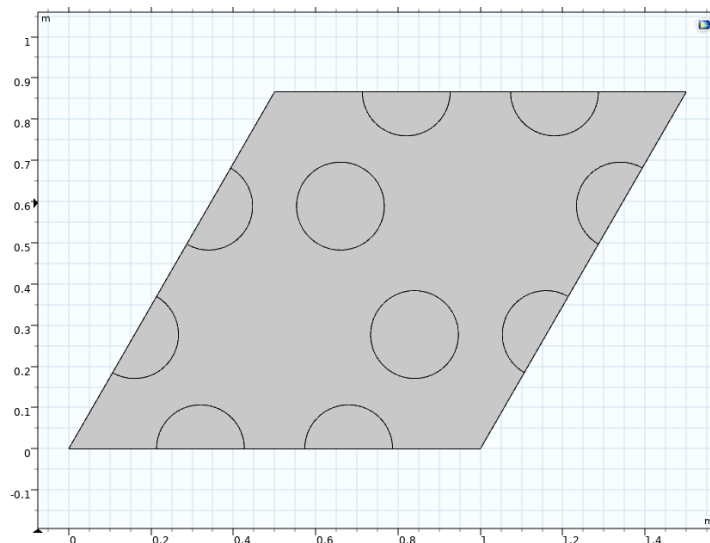


Рисунок 2.2 – Схема елементарної комірки фотонного кристалу з гексагональною решіткою

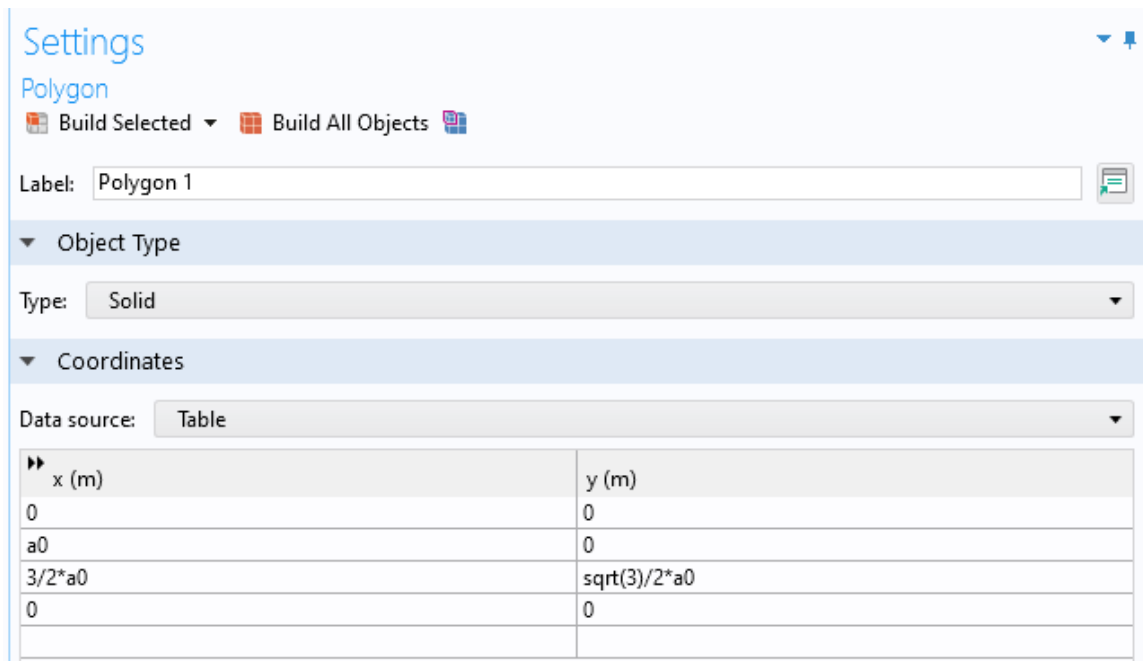


Рисунок 2.3 – Параметри багатокутника

На рис. 2.4 показані налаштування функції коло: радіус визначається як $d/2$, кут сектора дорівнює 180° , розташування за координатами: по осі $x = R$, по осі $y = 0$.



Рисунок 2.4 – Параметри першого кола

Налаштування наступних кіл здійснювалися за аналогічною методикою. Для другого кола задавалися параметри: радіус $d/2$, кут сектора 180° , координати розташування: $x = a_0 - R$, $y = 0$. Третє коло будувалося з тими ж характеристиками радіуса $d/2$, але з повним кутом сектора 360° , при цьому його координати визначалися як: $x = a_0 - 0,5 \cdot R$ та $y = \sqrt{3}/2 \cdot R$. Четверте коло також мало радіус $d/2$ і кут сектора 180° , координати при цьому становили: $x = a_0 + 0,5 \cdot R$ та $y = \sqrt{3}/2 \cdot R$. П'яте коло мало аналогічні параметри радіуса $d/2$ і кута сектора 180° , а його координати задавалися у вигляді: $x = 3/2 \cdot (a_0 - 1/3 \cdot R)$ та $y = \sqrt{3}/2 \cdot (a_0 - R)$. Для четвертого та п'ятого кіл додатково використовувався кут повороту $\text{Rotation Angle} = 60^\circ$, тоді як для решти кіл цей параметр дорівнював нулю.

На наступному етапі було використано функцію дзеркало (Mirror). У середовищі COMSOL ця функція застосовується для відображення побудованих геометричних об'єктів відносно заданої осі або площини, що дозволяє швидко створювати симетричні структури без необхідності повторного ручного моделювання елементів. Налаштування функції дзеркала наведені на рис. 2.5.

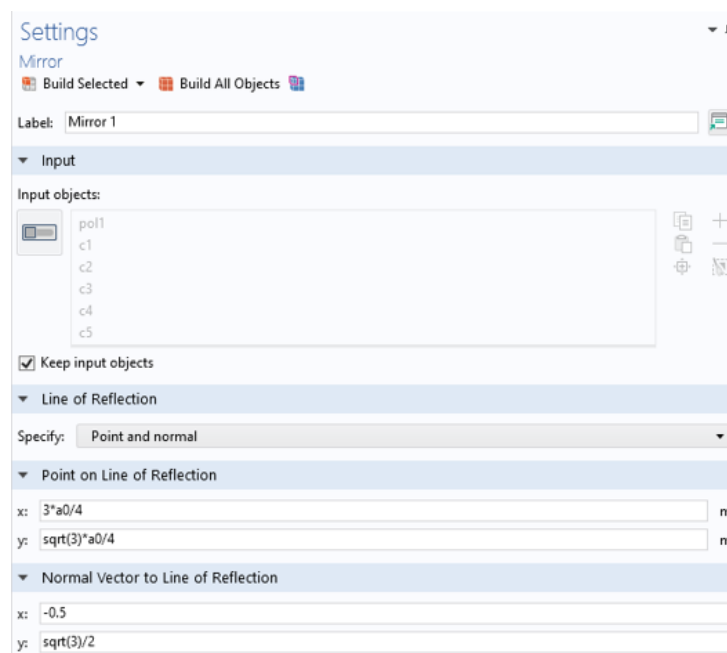


Рисунок 2.5 – Налаштування функції Mirror

Для моделювання було використано два матеріали — повітря та діелектрик із показником заломлення, дійсна частина якого дорівнює $\sqrt{11.7}$. Усі просторові області конструкції заповнювалися повітрям, тоді як отвори в структурі були заповнені діелектричним матеріалом. Такий підхід забезпечує коректне відтворення фізичних властивостей та відповідає реальним умовам його роботи.

На рис. (2.6, 2.7) зображено періодичні граничні умови, сформовані за допомогою функцій Periodic Condition 1 та Periodic Condition 2. У COMSOL функція periodic condition використовується для задання періодичних граничних умов Флоке, які дають можливість моделювати нескінченні або повторювані структури, використовуючи лише одну елементарну комірку. Це дозволяє істотно зменшити обчислювальні витрати та водночас забезпечити коректне відтворення поширення електромагнітних хвиль у фотонних кристалах.

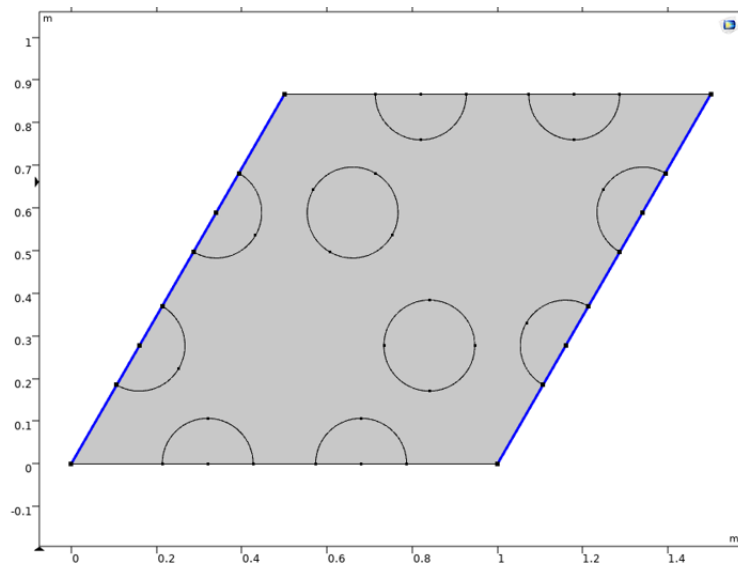


Рисунок 2.6 – Періодичні граничні умови, реалізовані за допомогою функції Periodic Condition 1

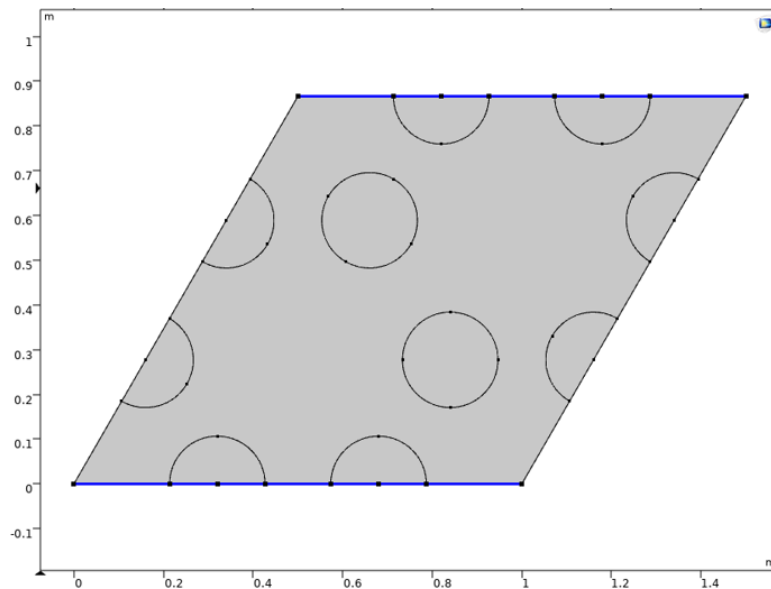


Рисунок 2.7 – Періодичні граничні умови, реалізовані за допомогою функції
Periodic Condition 2

На рис. 2.8 представлено розрахункову сітку моделі, побудовану за допомогою функції Physics-Controlled Mesh у COMSOL Multiphysics. Сітка є ключовим елементом чисельного моделювання, оскільки визначає розбиття геометрії на елементи, необхідні для розв’язання диференціальних рівнянь, що описують фізичні процеси.

Використання Physics-Controlled Mesh дозволяє автоматично підбирати розмір та тип елементів сітки відповідно до фізичних властивостей моделі, що забезпечує високу точність і ефективність розрахунків. Така сітка оптимально адаптована до особливостей моделювання хвильових процесів у структурі, що сприяє більш точному аналізу розподілу полів, характеристик пропускання та відбиття хвиль у заданому діапазоні частот. Функціональні можливості пакету дозволяють також задавати розрахункову сітку з налаштованими параметрами, що зазвичай використовується у більш складних проектах.

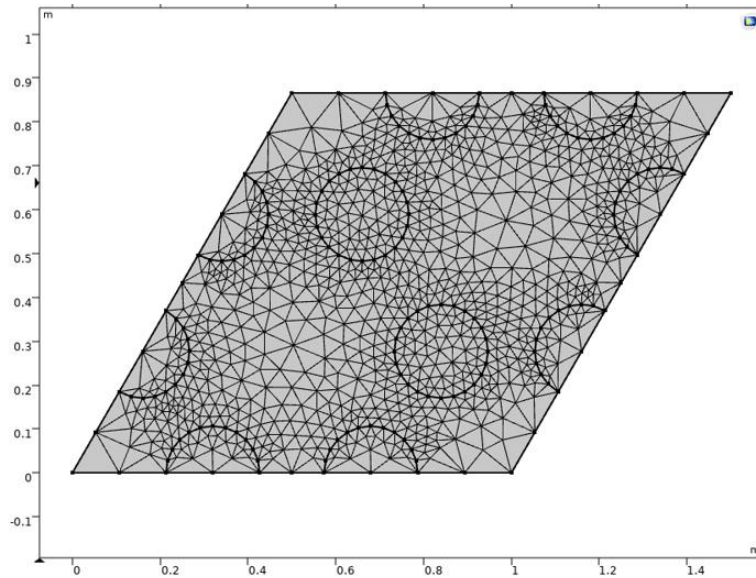


Рисунок 2.8 – Сітка моделі, побудована за допомогою функції Physics-Controlled Mesh у COMSOL Multiphysics

Аналогічна процедура побудови моделі застосовується й для структури з трикутною решіткою (рис. 2.9). Тут елементарна комірka містить лише один діелектричний циліндр.

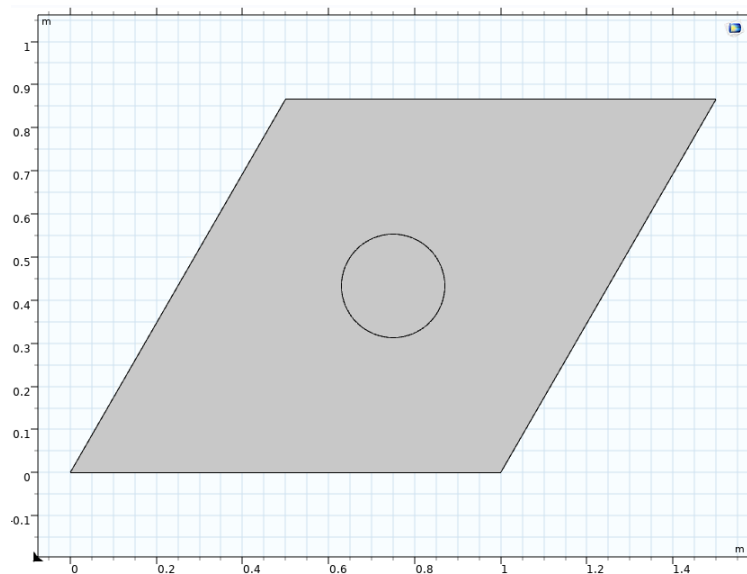


Рисунок 2.9 – Схема елементарної комірki фотонного кристалу з трикутною решіткою

На рис. 2.10 представлено результат формування розрахункової сітки для даної моделі. В області, де розташований циліндричний елемент структури, сітка має більшу густину. Це пов'язано з необхідністю підвищення точності розрахунків у області з більшою діелектричною проникністю. До того ж, ця область має криволінійні границі, що також обумовлює необхідність згущення сітки.

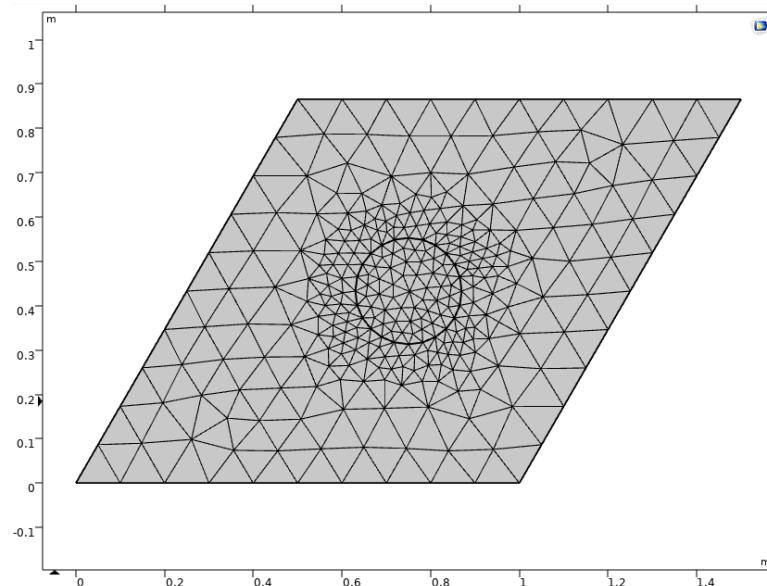


Рисунок 2.10 – Схема розрахункової сітки в межах елементарної комірки фотонного кристалу

2.2 Дисперсійні характеристики фотонних кристалів

Перед виконанням чисельного аналізу в COMSOL Multiphysics необхідно налаштувати параметричне дослідження, або Parametric Sweep (рис. 2.11). Ця функція дозволяє автоматично виконати серію розрахунків моделі при зміні одного або кількох параметрів у заданому діапазоні значень. Вона є особливо корисною для дослідження залежностей результатів моделювання від варіацій параметрів, таких як хвильові числа, частоти, температури тощо.

У даному випадку, в налаштуваннях Parametric Sweep обрано параметр k (характеризує хвильове число), для якого визначено діапазон значень від 0 до

3 із кроком 0,1. Це дозволяє провести аналіз поведінки моделі в усьому діапазоні хвильових чисел в межах першої зони Бріллюена, що є важливим для дослідження характеристик хвильових процесів у структурі.

Завдяки використанню Parametric Sweep можна отримати детальну інформацію про зміну характеристик моделі в залежності від варіацій параметра k , що сприяє глибшому розумінню фізичних процесів та оптимізації параметрів для досягнення бажаних результатів.

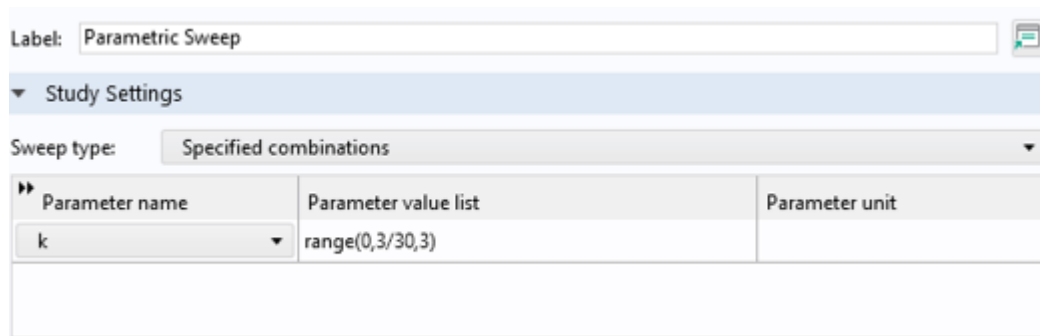


Рисунок 2.11 – Налаштування параметричного дослідження (Parametric Sweep)

На рис. 2.12 наведено вісім дисперсійних кривих, отриманих у результаті параметричного розрахунку. Криві відображають залежність частоти від хвильового вектора для різних мод у структурі з трикутною решіткою, елементарна комірка якої представлена на рис. 2.9.

Особливу увагу слід звернути на область між першою та другою дисперсійними кривими, де формується фотонна заборонена зона. У цьому діапазоні поширення хвиль у середовищі стає неможливим, що є ключовою властивістю фотонних кристалів. Наявність цієї забороненої зони підтверджує можливість ефективного керування хвильовими процесами та створення пристроїв, що базуються на селективному пропусканні та відбитті електромагнітних хвиль.

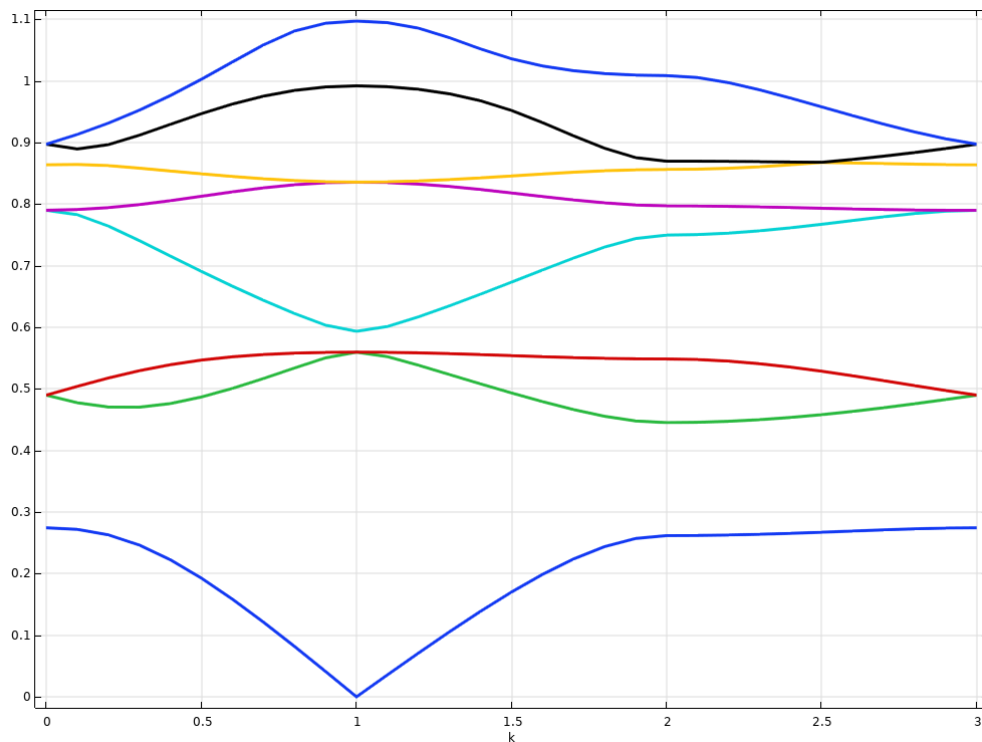


Рисунок 2.12 – Дисперсійна діаграма фотонного кристалу з трикутною решіткою

На рис. 2.13 представлено результати розрахунку просторових розподілів електричного поля, що відповідають власним режимам фотонного кристала. Таке моделювання дозволяє наочно відобразити характер локалізації електромагнітних хвиль у структурі та оцінити вплив геометрії решітки на формування резонансних мод. Це підтверджує існування резонансних станів у фотонному кристалі та наявність зон, де відбувається ефективна локалізація хвиль. Подібні результати узгоджуються з відомими теоретичними дослідженнями фотонних кристалів, у яких просторово-періодична діелектрична структура формує спектральні заборонені зони, аналогічні зонній структурі у твердих тілах.

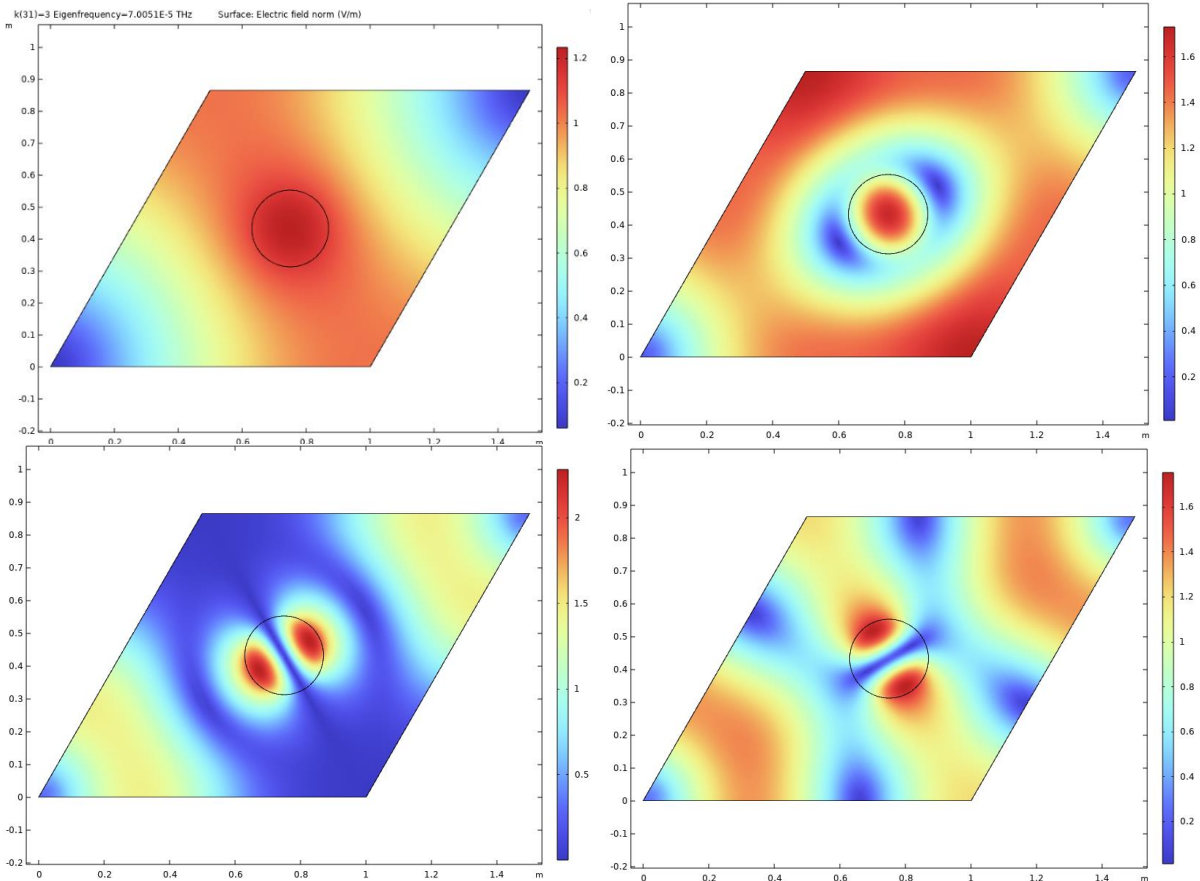


Рисунок 2.13 – Варіанти просторового розподілу електричного поля власних режимів фотонного кристалу з трикутною решіткою

Результати розрахунку дисперсійної діаграми фотонного кристалу з гексагональною решіткою представлені на рис. 2.14. На відміну від попередньої конфігурації фотонного кристалу, в даному випадку на дисперсійній діаграмі реалізується кілька заборонених зон. Більше того, з літератури відомо, що фотонний кристал на основі гексагональної решітки може мати одночасно заборонені зони для ТЕ та ТМ поляризацій випромінювання. В даній роботі ми обмежуємось розглядом лише ТМ поляризації, у випадку якої електричне поле має лише одну координатну компоненту, спрямовану перпендикулярно площині рисунку.

Таким чином, фотонні кристали з гексагональною решіткою можна використовувати для формування пристроїв, що мають кілька робочих частотних діапазонів.

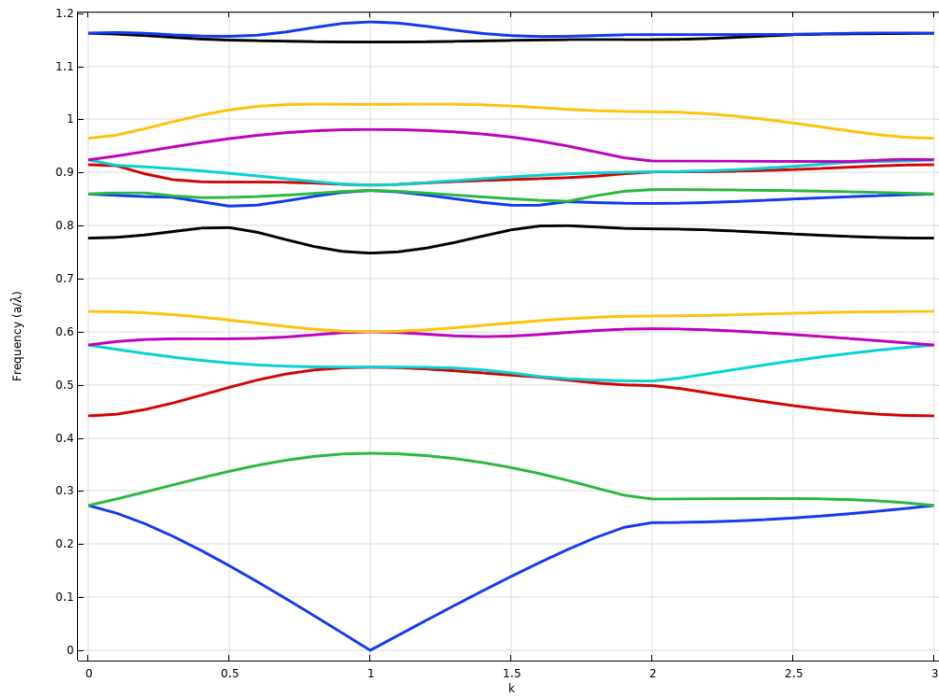


Рисунок 2.14 – Дисперсійна діаграма фотонного кристалу з гексагональною решіткою

На рис. 2.15 представлені приклади просторових розподілів електричного поля власних режимів такого фотонного кристалу.

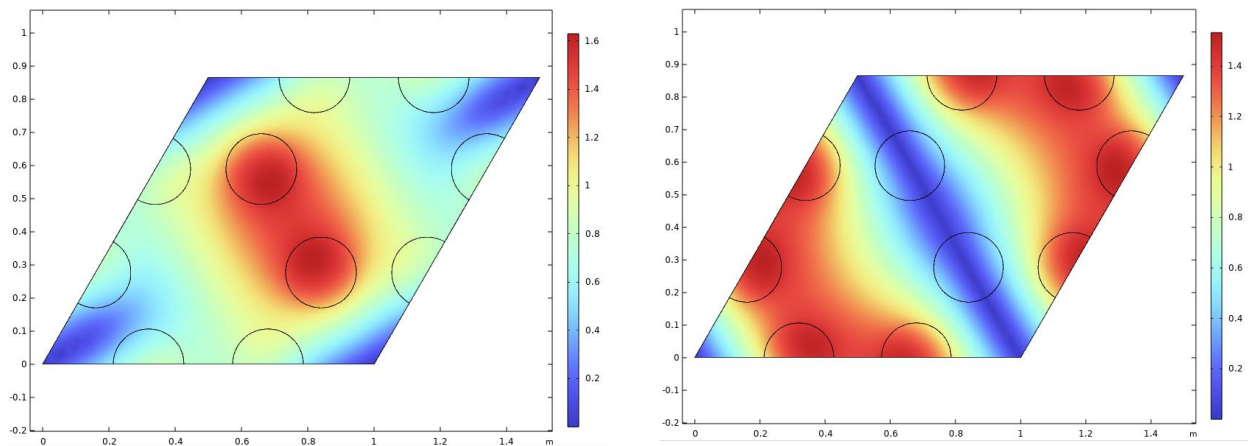


Рисунок 2.15 – Розподіл електричного поля власних режимів фотонного кристалу з гексагональною решіткою

2.3 Моделювання фотонно-кристалічних хвилеводів

На основі виявлених фотонних заборонених зон на дисперсійних діаграмах фотонних кристалів можливо побудувати хвилеводні структури. Саме наявність заборонених зон визначає умови формування каналів для спрямованого поширення електромагнітних хвиль, що дозволяє створювати хвилеводи зі специфічними пропускними властивостями.

Розглянемо фотонно-кристалічний хвилевід із трикутною симетрією ґратки (рис. 2.16). Така конфігурація забезпечує ефективне формування та керування розповсюдженням локалізованих мод у межах забороненої зони, а також створює можливості для компактної інтеграції хвилевідних структур у фотонні пристрої.

Хвилевід сформований шляхом видалення одного горизонтального ряду діелектричних циліндрів зі структури. Таким чином формується лінійний дефект періодичності, в межах якого відбувається локалізація енергії електромагнітного поля.

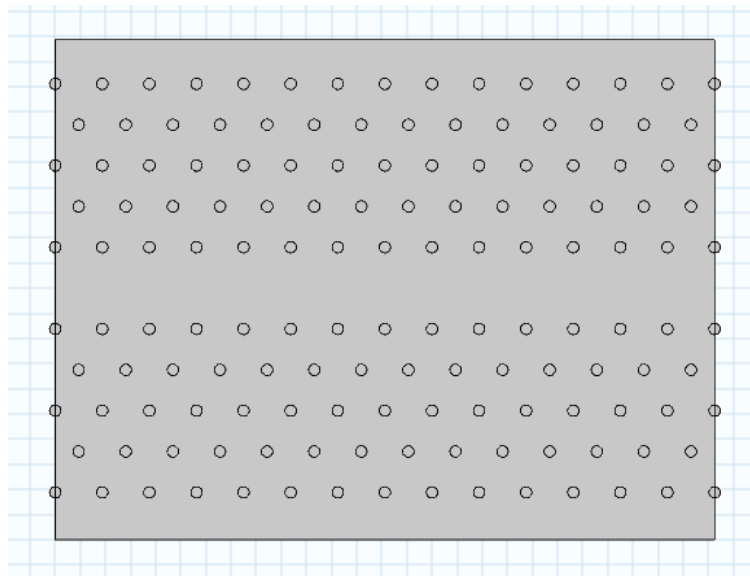


Рисунок 2.16 – Схема фотонно-кристалічного хвилеводу з трикутною симетрією

Для коректного чисельного аналізу була побудована сітка з локальним згущенням елементів у критичних областях моделі (рис 2.17). Це дозволяє отримати високу точність розрахунків без суттєвого збільшення обчислювальних витрат. Оскільки в даному випадку розглядається масив діелектричних циліндрів, розташованих у вакуумі, то цілком природньо, що в межах горизонтального хвилеводного каналу сітка є більш розрідженою, ніж в межах циліндрів.

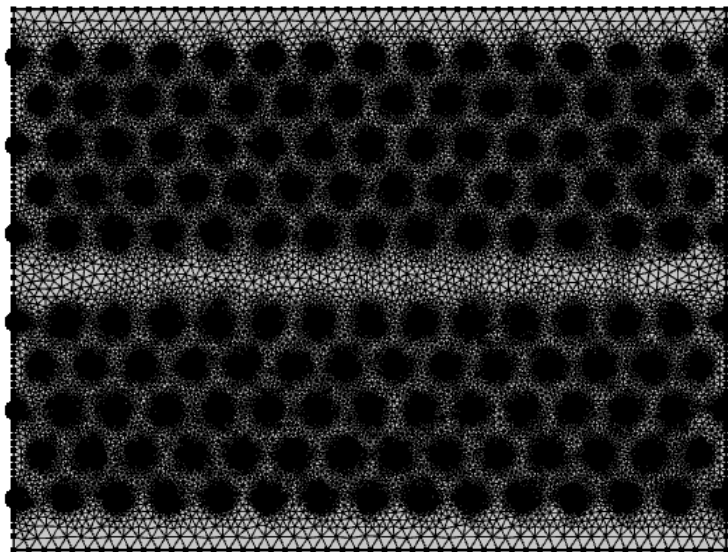


Рисунок 2.17 – Сітка фотонно-кристалічного хвилеводу з трикутною симетрією

На рис. 2.18 представлено зображення надкомірки, яка використовується для розрахунку дисперсійних характеристик фотонно-кристалічного хвилеводу. Видно, що, на відміну від звичайного фотонного кристалу, ця комірка містить кілька діелектричних циліндрів, розташованих по обидва боки від пустотілого хвилеводного каналу. Така конфігурація дозволяє побудувати періодичну структуру, для якої можуть бути застосовані періодичні граничні умови Флоке. Саме на застосуванні таких граничних умов базується алгоритм розрахунку дисперсійних характеристик, для реалізації якого необхідно забезпечити просторову періодичність фотонно-кристалічної структури.

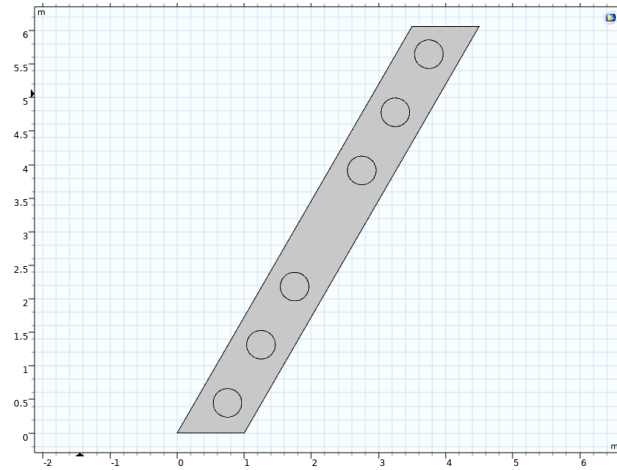


Рисунок 2.18 – Схематичне зображення надкомірки фотонно-кристалічного хвилеводу

Результати чисельних розрахунків дисперсійної діаграми фотонно-кристалічного хвилеводу представлені на рис. 2.19. Ця діаграма побудована не всіх напрямків хвильового вектора у першій зоні Бріллюена, як це робиться для фотонного кристалу. В даному випадку уздовж вісі абсцис відкладені значення хвильового вектора лише у напрямку поздовжньої осі хвилеводу (від 0 до 0,5 у нормованих одиницях).

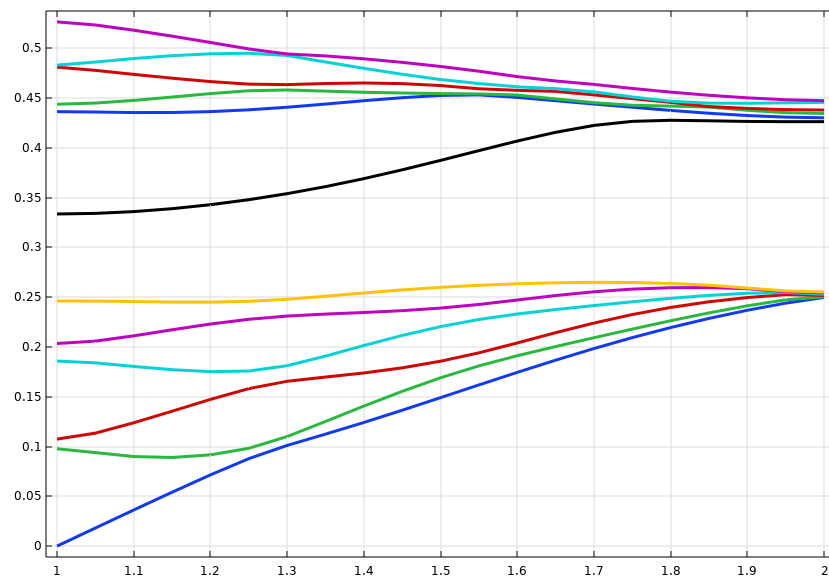


Рисунок 2.19 – Дисперсійна характеристика фотонно-кристалічного хвилеводу

З порівняння дисперсійних діаграм на рис. 2.12 та рис. 2.19 видно, що в фотонно-кристалічному хвилеводі в межах забороненої зони формується додаткова дисперсійна крива, яка відповідає хвилеводному режиму роботи структури. Оскільки в даному випадку така крива тільки одна, то можна стверджувати, хвилевід буде одномодовим.

На рис. 2.20 представлені зразки результатів розрахунку просторових розподілів електричного поля в надкомірці фотонно-кристалічного хвилеводу, які відповідають його власним режимам. Рис. 2.20, а відповідає режиму локалізації енергії поля в хвилеводному каналі, тобто хвилеводному режиму. Рис. 2.20 (б, в) відповідають іншим власним режимам структури, для яких така локалізація не відбувається.

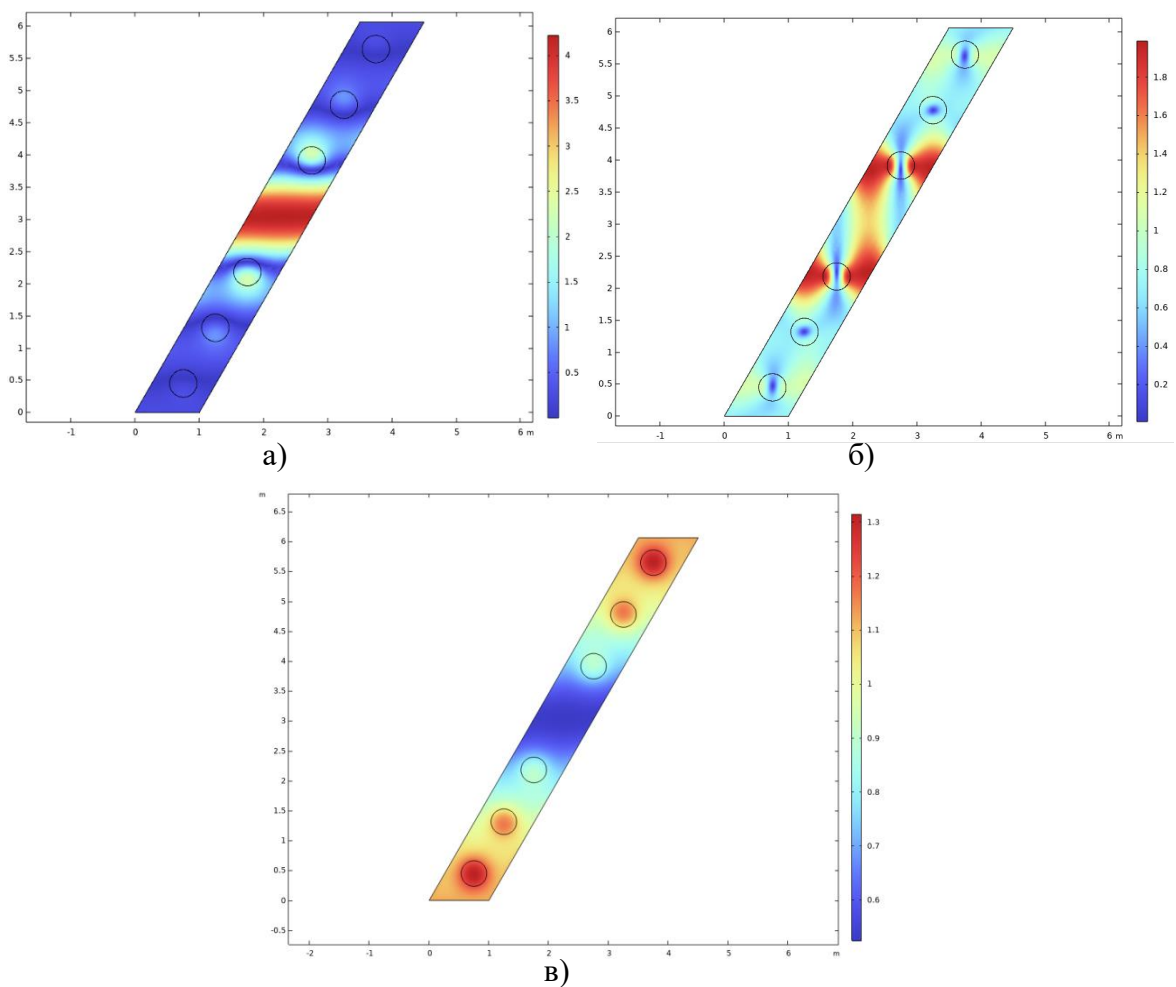


Рисунок 2.20 – Розподіли електромагнітного поля у надкомірці фотонно-кристалічного хвилевода

Наступним етапом дослідження фотонно-кристалічного хвилеводу є розрахунок його спектральної характеристики. Побудований при виконанні роботи розрахунковий проєкт дозволяє представляти цю характеристику як залежність щільності потужності електромагнітного поля від нормованої частоти a/λ . На рис 2.21 представлені результати чисельних розрахунків спектральної характеристики фотонно-кристалічного хвилеводу з трикутною решіткою діелектричних циліндрів.

З порівняння рис. 2.19 та рис. 2.21 видно, що спектральна характеристика добре узгоджується з дисперсійною діаграмою фотонно-кристалічного хвилеводу. Смуга пропускання на спектральній характеристиці практично співпадає із частотним діапазоном, який займає відповідна дисперсійна крива, розташована в межах фотонної забороненої зони.

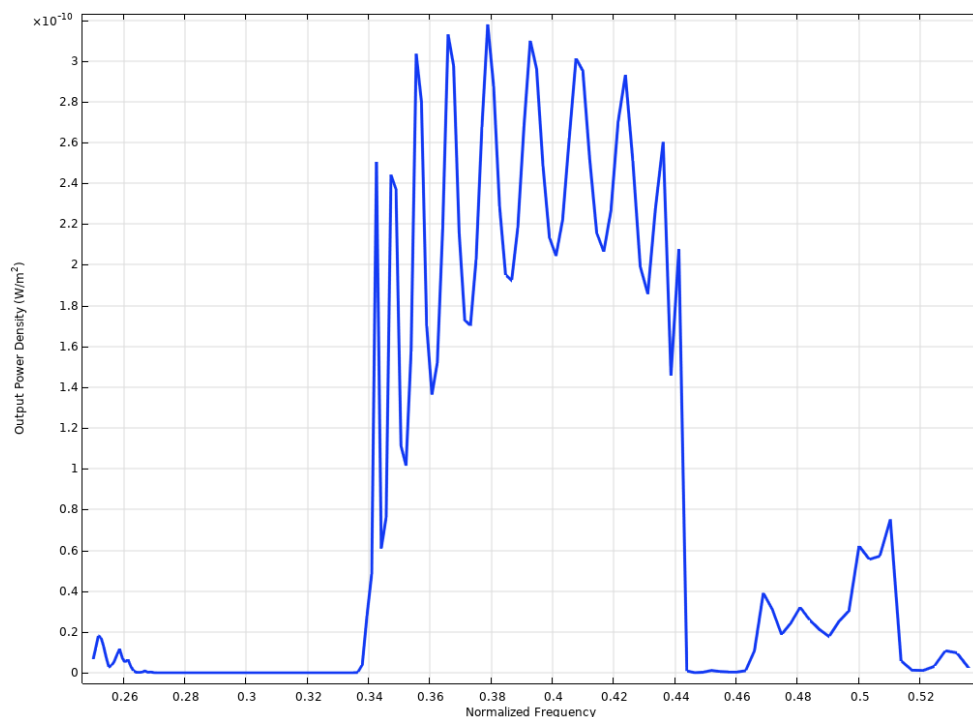


Рисунок 2.21 – Спектральна характеристика фотонно-кристалічного хвилеводу

З рис. 2.19 та рис. 2.21 також видно, що робочий діапазон фотонно-кристалічного хвилеводу дещо вужчий за фотонну заборонену зону. Отже, в

межах цієї зони хвилевід фактично представляє собою смуговий фільтр, характеристиками якого можна керувати через зміну параметрів системи.

Розрахунковий проєкт дозволяє отримувати також просторовий розподіл поля для різних частот хвилі, яка подається на вхід фотонно-кристалічного хвилеводу. На рис. 2.22 представлені розподіли електричного поля в фотонно-кристалічному хвилеводі для різних значень частоти сигналу.

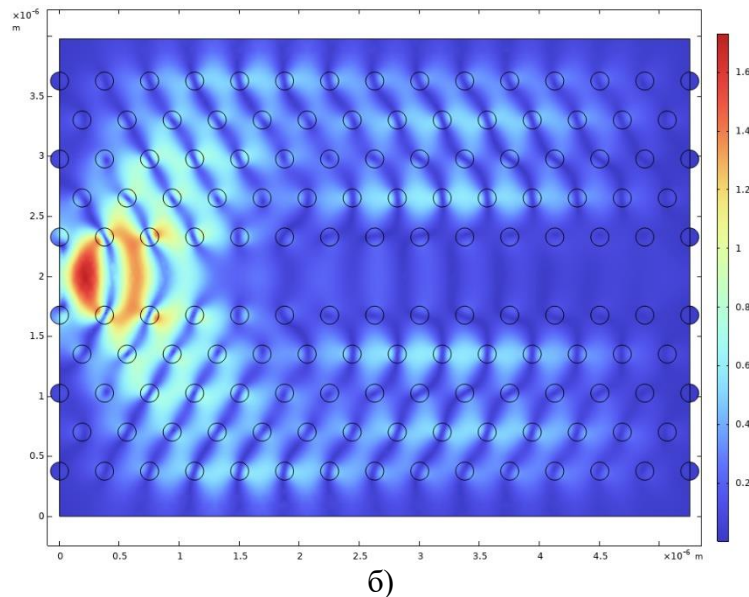
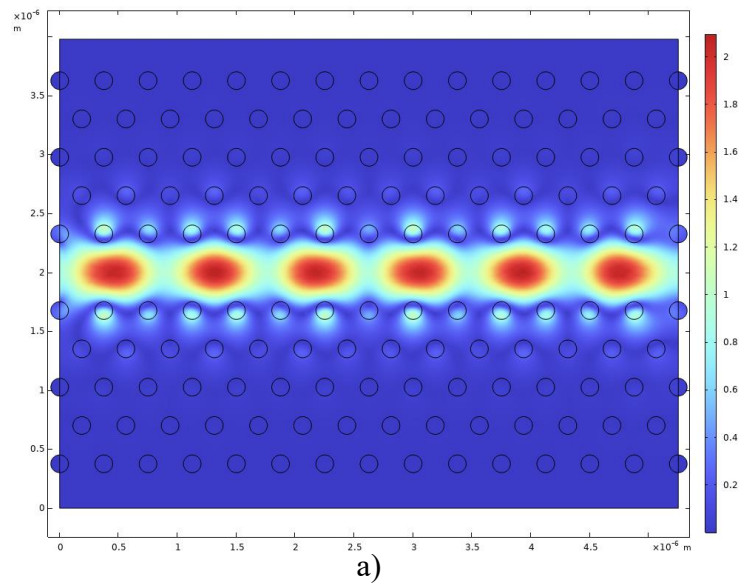


Рисунок 2.22 – Просторові розподіли поля в хвилеводі з трикутною решіткою

На рис. 2.22, а побудований розподіл поля для значення нормованої частоти $a/\lambda = 0,38$, яка знаходиться в межах смуги пропускання хвилеводу.

Цілком природньо, що в цьому випадку реалізується досить ефективна локалізація енергії поля в хвилеводному каналі. Поле в оболонці хвилеводу практично дорівнює нулю. Інша ситуація спостерігається на рис. 2.22, б, де представлений просторовий розподіл поля для значення $a/\lambda = 0,45$, яке знаходиться за межами смуги пропускання хвилеводу. Видно, що тут основна доля енергії поля розповсюджується в оболонці хвилеводу і не попадає на його вихід.

Розглянемо далі фотонно-кристалічний хвилевід, побудований на основі гексагональної решітки діелектричних циліндрів. Схема такого хвилеводу представлена на рис. 2.23.

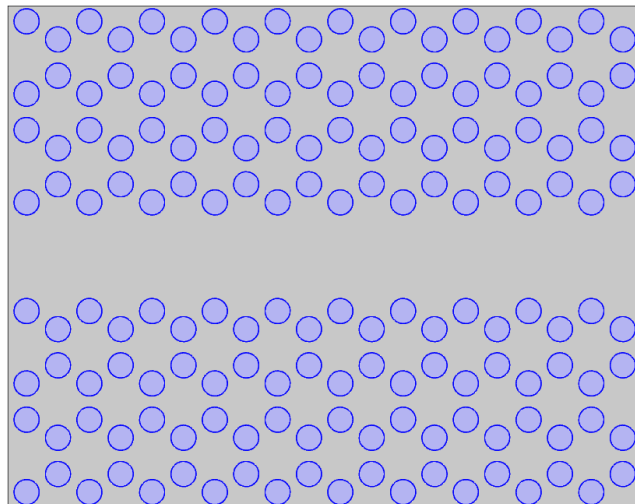


Рисунок 2.23 – Схема фотонно-кристалічного хвилеводу з гексагональною решіткою

З рисунку видно, що в даному випадку використовується симетрична схема хвилеводу. Це одна з можливих схем, які будуються шляхом формування лінійних дефектів періодичності базового фотонного кристалу з гексагональною решіткою та просторовим зсувом частин оболонки хвилеводного каналу.

Слід відзначити, що, як і у попередньому випадку, границі пустотілого хвилеводного каналу є періодичними. Це обумовлює неоднорідність смуг пропускання на спектральних характеристиках, що виглядає як осциляції вихідного сигналу в межах смуги пропускання (рис. 2.21).

Суттєвою відмінністю фотонного кристалу з гексагональною решіткою від кристалу з трикутною решіткою є те, що період структури не співпадає з відстанню між найближчими діелектричними циліндрами. В даному випадку він дорівнює відстані між центрами сусідніх шестикутників. Це призводить до того, що однакові нормовані значення частоти для двох конфігурацій фотонних кристалів відповідають різним абсолютним значенням частоти.

На рис. 2.24 представлені результати розрахунку спектральної характеристики фотонно-кристалічного хвилеводу, побудованого на основі гексагональної решітки.

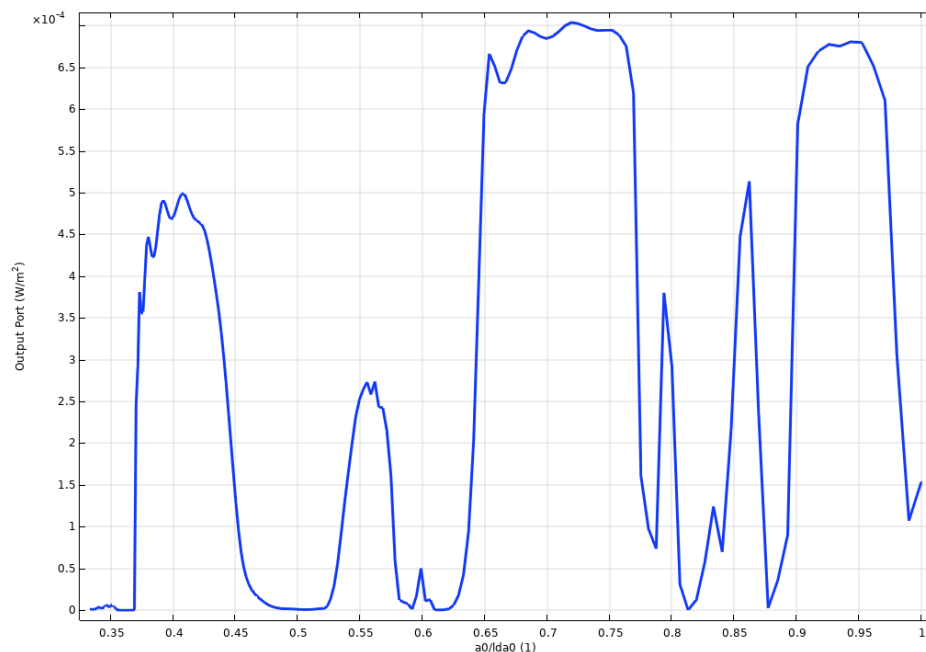
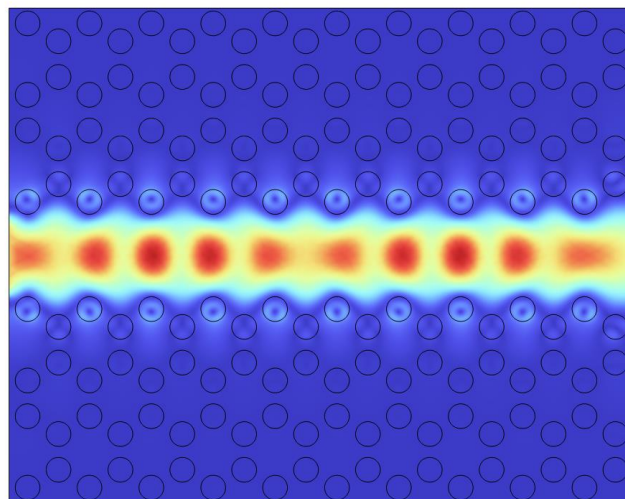


Рисунок 2.24 – Спектральна характеристика фотонно-кристалічного хвилеводу з гексагональною решіткою

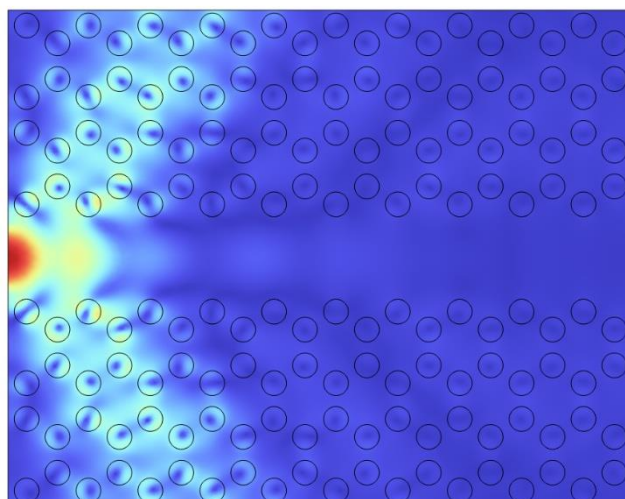
З рисунку видно, що даний фотонно-кристалічний хвилевід має кілька смуг пропускання. Це узгоджується з дисперсійною діаграмою базового

фотонного кристалу, яка представлена на рис. 2.14 і характеризується наявністю кількох фотонних заборонених зон. В даному випадку спостерігаються незначні осциляції потужності сигналу в смугах пропускання хвилеводу порівняно із попередньою конфігурацією хвилеводу. Це можна пояснити більш рівномірними границями хвилеводного каналу у структурі на основі гексагональної решітки.

На рис. 2.25 представлені результати розрахунків просторового розподілу електричного поля в хвилеводі з гексагональною решіткою для двох значень нормованої частоти.



а)



б)

Рисунок 2.25 – Просторові розподіли електричного поля в хвилеводі

Розподіл поля на рис. 2.25, а розрахований для значення нормованої частоти $a/\lambda = 0,7$, яке розташовується в межах смуги пропускання фотонно-кристалічного хвилеводу (рис. 2.21). Аналогічно попередній конфігурації хвилеводу, в даному випадку спостерігається ефективна локалізація поля в пустотілому хвилеводному каналі. Розподіл поля на рис. 2.25, б розрахований для значення $a/\lambda = 0,5$ за межами смуг пропускання хвилеводу. Тому тут в межах хвилеводного каналу поле практично дорівнює нулю, а енергія джерела випромінювання розсіюється в оболонці хвилеводу.

Таким чином, в роботі розроблено низку розрахункових проєктів для визначення основних електродинамічних характеристик фотонно-кристалічних хвилеводів двох базових конфігурацій – на основі трикутної та гексагональної решіток. Ці проєкти можуть бути застосовані для моделювання та розроблення різноманітних фотонно-кристалічних хвилеводних пристроїв.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано теоретичне та чисельне дослідження власних режимів фотонно-кристалічних хвилеводів із різною симетрією. Моделювання у середовищі COMSOL Multiphysics показало, що симетрія структури суттєво впливає на ширину фотонної забороненої зони, локалізацію моди та дисперсійні властивості хвилеводу.

Структури з трикутною решіткою демонструють ширшу зону заборони й ефективніше утримання світла в області дефекту, тоді як квадратна решітка є простішою у виготовленні та забезпечує стабільні режими поширення. Отримані результати підтвердили можливість керування оптичними характеристиками шляхом зміни геометрії фотонної решітки.

Дослідження є корисним для подальшої розробки фотонних інтегральних систем, сенсорів і нелінійно-оптичних пристроїв, а також для поглиблення розуміння фізичних процесів у фотонно-кристалічних хвилеводах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sukhoivanov I.A., Guryev I.V. Photonic Crystals: Physics and Practical Modeling. Springer, 2009. 242 p.
2. Novotny L., Hecht B. Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press, 2nd ed., 2012. 578 p.
3. Wang H., Vial A., et al. Topological photonic crystals: a review // Annual Review of Condensed Matter Physics. 2020. Vol. 11. P. 17–40.
4. Busch K., Lölkes S., Wehrspohn R., Föll H. Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization. Wiley, 2006. 380 p.
5. Yang Y., Yu L., Jiang X., Li Y., He X., Chen L., Zhang Y. Recent advances in photonic crystal-based chemical sensors // Chemical Communications. 2024. Vol. 60. P. 9177–9193.
6. Ramola A., Shakya A.K., Kumar V., Bergman A. Recent advances in photonic crystal fiber-based SPR biosensors: design strategies, plasmonic materials, and applications // Micromachines. 2025. Vol. 16, No. 7. Article 747.
7. Tang G.-J., He X.-T., Shi F.-L., Liu J.-W., Chen X.-D., Dong J.-W. Topological photonic crystals: physics, designs and applications // arXiv preprint. 2022.
8. Xu G., Xing H., Xue Z., Lu D., Fan J., Shum P.P., Cong L. Recent advances and perspective of photonic bound states in the continuum // arXiv preprint. 2023.
9. Chan C.T. Essay: Photonic Crystals as a Platform to Explore New Physics // Physical Review Letters. 2025. Vol. 135, No. 8. P. 080001.
10. Mandal S., et al. Photonic Bilayer Chern Insulator with Corner States // Physical Review Letters. 2025. Vol. 135, No. 016903.
11. Chen J., Zheng Y., Yang S., Shi F., Li Z.-Y., Qiu C.-W. One-Way Valley-Robust Transport in Edge-Tailored Photonic Crystals // Physical Review Letters. 2025. Vol. 134, No. 203803.

12. Yadav N., Liu M., Wu Y., Yadav A., Zheng H. AI-Based Self-Assembly of Photonic Crystals // *Nanoscale Advances*. 2025. Advance Article.
13. Jalali Mehrabad M., Mittal S., Hafezi M. Topological photonics: fundamental concepts, recent developments, and future directions // *arXiv preprint*. 2023.
14. Vaidya S., Ghorashi A., Christensen T., et al. Topological Phases of Photonic Crystals under Crystalline Symmetries // *arXiv preprint*. 2023.
15. Li Y., Yu L., Jiang X., He X., Chen L., Zhang Y., et al. Three-Dimensional Topological Photonic Crystals (Invited Review) // *Progress in Electromagnetics Research*. 2024. Vol. 181.
16. Wu H., Li X., Zhang X., et al. Topological photonic crystal sensors: fundamental principles and emerging applications // *Sensors (MDPI)*. 2025.
17. Liu B., Zhang Y., et al. Hybrid topological photonic crystals hosting multiple topological phases // *Nature Communications*. 2023.
18. Zhang Y., He X., et al. Photonic meta-crystals: bridging photonic crystals and metamaterials — a review // *OAE Publishing Inc*. 2024.
19. Sashkova Y.V., Odarenko E.N., Shmat'ko A.A., Shevchenko N.G. Analysis of Slow Wave Modes in Modified Photonic Crystal Waveguides Using the MPB Package // *IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. 2018, July 2–5, Kyiv, Ukraine. P. 164–167.
20. Ivzhenko L.I., Polevoy S.Yu., Odarenko E.N., Tarapov S.I. Dispersion properties of artificial topological insulators based on an infinite double-periodic array of elliptical quartz elements // *Радіофізика та Електроніка*. 2021. Vol. 26, No. 3. P. 11–17.