

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 перший (бакалаврський)
ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНІ ХВИЛЕВОДИ НА ОСНОВІ
БІПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТЮЛСу-22-1
Микита БІЛОУСЬКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»
(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 _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Білоуську Микиті Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Фотонно-кристалічні хвилеводи на основі біперіодичних структур _____

затверджена наказом університету від «23» _____ травня _____ 2025 р. № 409 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 _____ липня _____ 2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ фізичні властивості двовимірних фотонних кристалів та _____
хвилеводно-резонаторних структур на їх основі; методи та засоби чисельних _____
розрахунків електродинамічних характеристик фотонно-кристалічних структур; _____
конфігурації частотно-селективних фотонно-кристалічних пристроїв. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Аналітичний огляд науково-технічної літератури з питань моделювання _____
фотонно-кристалічних структур. _____

2 Ознайомлення із засобами чисельного моделювання фотонних кристалів. _____

3 Розроблення розрахункових проєктів. _____

4 Проведення чисельних розрахунків електродинамічних характеристик _____
фотонно-кристалічних структур з біперіодичними елементами. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про фотонно-кристалічні хвилеводи на основі біперіодичних структур	06.05.25–21.05.25	Виконано
2	Дослідження фотонно-кристалічних хвилеводів на основі біперіодичних структур	22.05.25–30.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів	02.06.25–11.06.25	Виконано
4	Аналіз результатів розрахунків	12.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–27.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	28.06.25–02.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	03.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–16.07.25	

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 50 с., 29 рис., 1 додаток, 20 джерел.

БІПЕРІОДИЧНА СТРУКТУРА, ДИСПЕРСІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ЗАБОРОНЕНА ЗОНА, СПЕКТРАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ФОТОННИЙ КРИСТАЛ, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИЙ ХВИЛЕВІД.

Об'єкт дослідження – фотонно-кристалічні хвилеводи з біперіодичними елементами.

Мета роботи – закріплення знань про фізичні процеси у фотонно-кристалічних структурах, їх будову, особливості, основні характеристики. А також набуття практичних навичок самостійного моделювання та розрахунку характеристик двовимірних фотонно-кристалічних структур із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення.

Методи дослідження – чисельні за допомогою спеціалізованих комп'ютерних пакетів MPB та MEER.

Проведене ознайомлення з принципами побудови двовимірних фотонно-кристалічних хвилеводів різних конфігурацій. Розроблено проекти для чисельних розрахунків дисперсійних, польових та спектральних характеристик фотонно-кристалічних структур, що мають властивості біперіодичності. Досліджено вплив конфігурації фотонно-кристалічних хвилеводів на їх електродинамічні характеристики та частотно-селективні властивості.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 50 p., 29 fig., 1 appendix, 20 sources.

BIPERIODIC STRUCTURE, DISPERSION CHARACTERISTICS, FORBIDDEN BAND, SPECTRAL CHARACTERISTICS, PHOTONIC CRYSTAL, PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE.

The object of research is photonic crystal waveguides with biperiodic elements.

The purpose of the work is to consolidate knowledge about physical processes in photonic crystal structures, their structure, features, main characteristics. As well as to acquire practical skills in independent modeling and calculation of the characteristics of two-dimensional photonic crystal structures using specialized software.

Research methods are numerical using specialized computer packages MPB and MEEP.

The principles of constructing two-dimensional photonic crystal waveguides of various configurations were introduced. Projects were developed for numerical calculations of dispersion, field and spectral characteristics of photonic crystal structures with biperiodic properties. The influence of the configuration of photonic crystal waveguides on their electrodynamic characteristics and frequency-selective properties was investigated.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Фотонно-кристалічні структури для фільтрації випромінювання.....	8
1.1 Фотонні кристали.....	8
1.2 Діелектричні фотонні кристали.....	10
1.3 Фотонні кристали з металевими та напівпровідниковими компонентами.....	12
1.4 Дефекти періодичності фотонних кристалів.....	14
1.4.1 Фотонно-кристалічні резонатори.....	14
1.4.2 Фотонно-кристалічні хвилеводи.....	15
1.4.3 Фотонно-кристалічні зв'язані системи.....	16
1.5 Фотонно-кристалічні вузькосмугові фільтри.....	18
2 Моделювання біперіодичних фотонно-кристалічних структур.....	27
2.1 Дисперсійні характеристики двовимірного фотонного кристалу.....	27
2.2 Дисперсійні характеристики модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів.....	31
2.3 Спектральні характеристики модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів.....	38
Висновки.....	47
Перелік джерел посилання.....	48
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	51

ВСТУП

Сучасні оптичні технології значною мірою базуються на використанні штучних матеріалів із унікальними властивостями, серед яких особливе місце займають фотонно-кристалічні структури (ФКС). Ці матеріали, що характеризуються періодичною діелектричною або напівпровідниковою структурою, здатні ефективно керувати поширенням світла завдяки формуванню заборонених фотонних зон – аналогу електронних заборонених зон у напівпровідниках. Такі властивості роблять ФКС перспективними для розробки нових поколінь оптичних пристроїв, зокрема хвилеводів, фільтрів, резонаторів, лазерів та сенсорів, що знаходять застосування в телекомунікаціях, медичній діагностиці, енергоефективних джерелах світла та інших галузях. Актуальність дослідження фотонно-кристалічних структур обумовлена їхньою здатністю замінити традиційні оптичні компоненти, забезпечуючи вищу ефективність, компактність та низькі втрати. Наприклад, фотонно-кристалічні хвилеводи дозволяють створювати ультракомпактні оптичні схеми, а фотонно-кристалічні фільтри забезпечують високу селективність у спектральному діапазоні, що є критично важливим для сучасних систем зв'язку.

В даній роботі розглянуті різні конфігурації фотонно-кристалічних хвилеводів з біперіодичними елементами, які демонструють частотно-селективні властивості. Чисельно розраховані дисперсійні та спектральні характеристики таких пристроїв.

1 ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНІ СТРУКТУРИ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

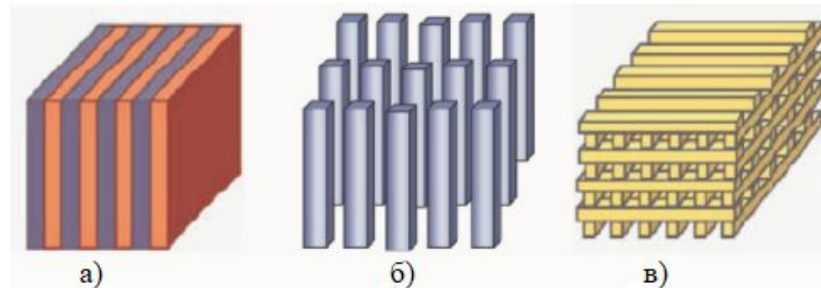
Фотонні кристали – це матеріали, структура яких дозволяє керувати поширенням світла на мікро- та нанорівні.

1.1 Фотонні кристали

Фотонні кристали – це середовища з просторово періодичною діелектричною функцією. Цієї періодичності можна досягти шляхом вбудовування періодичного масиву складових елементів з діелектричною проникністю ε_1 у фонове середовище, що характеризується діелектричною проникністю ε_2 . Для відповідних складових елементів використовувалися різні матеріали, включаючи діелектрики, напівпровідники, метали та надпровідники. Фотонні кристали привертають зростаючий інтерес завдяки різноманітним сучасним застосуванням. Наприклад, їх можна використовувати як частотні фільтри та хвилеводи.

Фотонна заборонена зона (ФЗЗ) у фотонних кристалах була отримана в результаті досліджень електромагнітних хвиль у періодичних середовищах. Ідея забороненої зони походить з фізики твердого тіла. Існують аналогії між звичайними кристалами та фотонними кристалами. Звичайні кристали мають періодичну структуру на атомному рівні, що створює періодичні потенціали для електронів з однаковою модуляцією. У фотонних кристалах діелектрики розташовані періодично, поширення фотонів значною мірою залежить від цієї структури. Властивості фотонів у фотонних кристалах мають спільні властивості з електронами у звичайних кристалах, оскільки хвильові рівняння в середовищі з періодичною діелектричною проникністю мають зонний спектр та хвильове рішення Блоха, подібно до електронів, описаних рівнянням Шредінгера з періодичним потенціалом.

Фотонні кристали можуть бути одно-, дво- або тривимірними, як показано на рисунку 1.1. У звичайних кристалах існують валентна зона та зона провідності через періодичне поле. Усі фотонні кристали, показані вище, мають два різних діелектричних середовища. Електрони не можуть рухатися всередині повністю заповненої валентної зони через принцип Паулі для електронів як ферміонів. Електрони можуть рухатися всередині кристала, якщо вони збуджені до зони провідності.



а) 1D багатосаровий; б) 2D масив діелектричних стрижнів; в) 3D «дровітня».

Рисунок 1.1 – Приклади фотонних кристалів різної розмірності.

Оскільки фотони є бозонами, усі зони в зонній структурі фотонних кристалів є зонами провідності. Якщо частота відповідає дозволений смузі, фотон може проходити через середовище. Якщо фотонна заборонена зона існує лише в частині зони Бріллюена, то ця щілина відповідає стоп-смузі. Іншими словами, фотони не можуть поширюватися з частотами всередині забороненої на хвильових векторах, де ця зона існує. Особливий інтерес представляє фотонний кристал, зонна структура якого має повну фотонну заборонену зону. ФЗЗ визначає діапазон частот, для яких світло не може існувати всередині кристала. Фотонні кристали з діелектричними, металевими, напівпровідниковими та надпровідними складовими елементами мають різні спектри фотонної смуги та пропускання. Розсіювання електромагнітної хвилі усіх цих фотонних кристалах різне. Фотонні кристали з металевими та надпровідними складовими елементами можуть бути

використані як частотні фільтри та хвилеводи для далекої інфрачервоної області спектра, тоді як діелектричні фотонні кристали можуть бути застосовані для пристроїв лише для оптичної області спектра.

Далі розглядається фотонна зонна структура двовимірних (2D) фотонних кристалів, утворених діелектричними, металевими та надпровідними складовими елементами, а також шарами графену.

1.2 Діелектричні фотонні кристали

Розглянемо двовимірні фотонні кристали з діелектричними складовими елементами, які обговорювалися в роботі. Рівняння Максвелла, за відсутності зовнішніх струмів та джерел, призводять до форми, що нагадує рівняння Шредінгера для магнітного поля $H(r)$ [1]:

$$\nabla \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla H(r) \right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2} \right) H(r) = 0, \quad (1.1)$$

де ω – кругова частота електромагнітної хвилі;

c – швидкість світла;

$\varepsilon(r)$ – діелектрична проникність, яка є періодичною функцією радіус-вектора у фотонному кристалі.

Рівняння (1.1) являє собою лінійну ермітову задачу на власні значення, розв'язки якої повністю визначаються властивостями макроскопічної діелектричної функції $\varepsilon(r)$.

Отже, фотони в цьому фотонному кристалі, що складається з періодичного масиву макроскопічних однорідних діелектричних складових елементів, можна описати з точки зору зонної структури, як і у випадку електронів. Особливий інтерес представляє фотонний кристал, зонна структура якого має повну фотонну заборонену зону.

Рисунок 1.2 представляє власні значення рівняння (1.1) для трикутної решітки повітряних стовпчиків ($\epsilon_{\text{air}} = 1$), просвердлених у діелектрику ($\epsilon = 13$) [2].

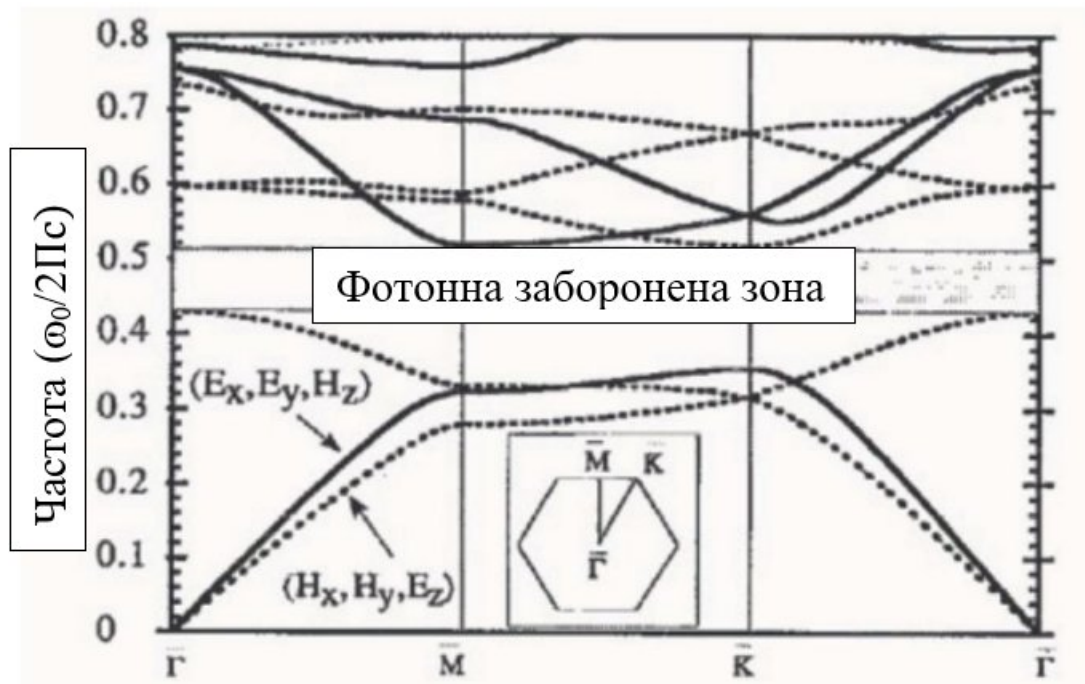


Рисунок 1.2 – Частоти найнижчих фотонних смуг для трикутної решітки повітряних стовпів ($\epsilon_{\text{air}} = 1$), просвердленої в діелектрику ($\epsilon = 13$)

Зонна структура зображена вздовж спеціальних напрямків площинної зони Бріллюєна ($k_z = 0$), як показано на нижній вставці. Радіус повітряних стовпів становить $r = 0,48a$, де a – площинна постійна решітки. Суцільні (пунктирні) лінії показують частоти смуг, електричне поле яких паралельне (перпендикулярне) площині.

Відомі результати дослідження різних видів двовимірних діелектричних фотонних кристалів, включаючи квадратні, трикутні та стільникові двовимірні решітки [1, 2]. Розглядалися діелектричні стрижнів повітрі, а також повітряні стовпчики, просвердлені в діелектрику. При діелектричному контрасті GaAs ($\epsilon = 13$) єдиною комбінацією, яка мала ФЗЗ в обох поляризаціях, була трикутна решітка повітряних стовпчиків у діелектрику.

Фотонна зонна структура в 2D діелектричному масиві була досліджена за допомогою методу когерентної мікрохвильової перехідної спектроскопії (COMITS) [3]. Масив, досліджений у [3], складається з алюмокерамічних стрижнів, розташованих у регулярній квадратній решітці. Дисперсійне співвідношення для електромагнітних хвиль у цьому фотонному кристалі було визначено безпосередньо за допомогою фазової чутливості COMITS. Діелектричні фотонні кристали можуть бути застосовані як частотні фільтри для оптичної області спектру, оскільки поширення світла заборонено у фотонному кристалі на частотах, що відповідають ФЗЗ в оптичному діапазоні.

1.3 Фотонні кристали з металевими та напівпровідниковими компонентами

Фотонні зонні структури квадратної гратчастої матриці металевих або напівпровідникових циліндрів та гранецентрованої кубічної гратчастої матриці металевих або напівпровідникових сфер досліджувалися в роботах [4, 5]. Вважається, що частотно-залежна діелектрична функція металу або напівпровідника має форму Друде для вільних електронів виду:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \# (1.2)$$

де ω_p – плазмова частота носіїв заряду.

Метод розкладання по плоских хвилях використовується для перетворення векторного рівняння електромагнітної хвилі в матричне рівняння. Частоти електромагнітних мод знаходяться як нулі визначника матриці рівняння.

На рисунку 1.3 [4] показано результати числових розрахунків фотонної зонної структури для 2D фотонного кристала, утвореного квадратною граткою металевих циліндрів з коефіцієнтом заповнення $f = 70\%$.

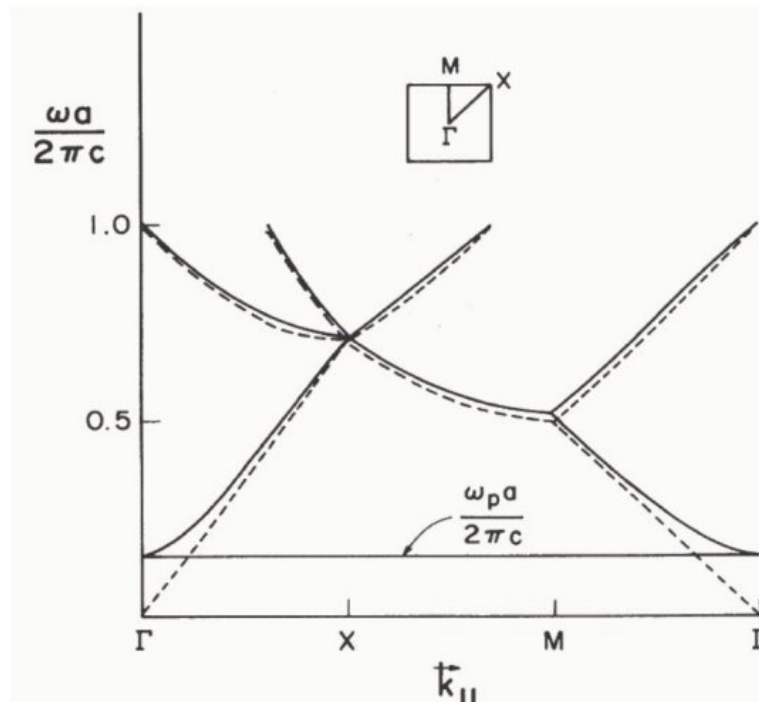


Рисунок 1.3 – Зонна структура для квадратної решітки з металевих циліндрів з коефіцієнтом заповнення $f = 70\%$. Показані лише результати для ω і ω_p

Тут коефіцієнт заповнення f визначається як $f = S_{\text{cyl}}/S = \pi r^2/a^2$, де S_{cyl} – площа поперечного перерізу циліндра в площині, перпендикулярній до осі циліндра, S – загальна площа, зайнята елементарною коміркою реального простору, r – радіус циліндрів.

Фотонні кристали з металевими та напівпровідниковими складовими елементами можуть бути використані як частотні фільтри та хвилеводи для далекого інфрачервоного діапазону спектру, оскільки ФЗЗ у цих фотонних кристалах відповідає частотам у далекому інфрачервоному діапазоні. Фотонні щілини утворюються на частотах ω , на яких діелектричний контраст, тобто різниця показників заломлення компонентів, є достатньо великим. Однак, затухання електромагнітних хвиль у металах через скін-ефект може пригнічувати багато потенційно корисних властивостей металевих фотонних кристалів.

1.4 Дефекти періодичності фотонних кристалів

У двовимірних фотонних кристалах можуть бути введені два типи дефектів періодичності: точкові дефекти та лінійні дефекти, відомі як порожнини та хвилеводи відповідно.

1.4.1 Фотонно-кристалічні резонатори

Фотонно кристалічна порожнина – це просторове збурення системи, яке порушує періодичність її діелектричної функції. Це може бути зроблено шляхом видалення однієї або кількох діелектричних елементів, діелектричного стрижня або отвору в структурі, або заміною їх іншими елементами, розмір, форма або діелектрична проникність яких відрізняються від оригіналу.

Фактично, якщо розроблений дефект має належний розмір, форму та діелектричну проникність для підтримки електромагнітної моди в межах фотонної забороненої зони, світло не може вийти з неї, і воно затримується в порожнині, утворюючи оптичний резонатор, як показано на рисунку 1.4. Дві найважливіші характеристики фотонно-кристалічних резонаторів це об'єм моди та коефіцієнт якості (добротність) Q .

Об'єм моди є мірою того, наскільки щільно мода локалізована в резонаторі. Його можна визначити за допомогою діелектричної функції та функції поля електромагнітного профілю моди.

Коефіцієнт якості (добротність) Q – це безрозмірна величина, яка пов'язує вихідну потужність та електромагнітну енергію, локалізовану в резонаторі. Також її можна розглядати як міру кількості оптичних періодів, що минають до того, як енергія згасає, тобто часу життя електромагнітних мод у порожнині. Коефіцієнт якості фотонно-кристалічної порожнини обчислюється за допомогою наступного співвідношення:

$$\frac{1}{Q} = \frac{P}{\omega_0 W}, \quad (1.3)$$

де P – вихідна потужність;

ω_0 – резонансна частота;

W – електромагнітна енергія, локалізована в резонаторі.

Високий Q означає довший час життя електромагнітних хвиль всередині дефекту.

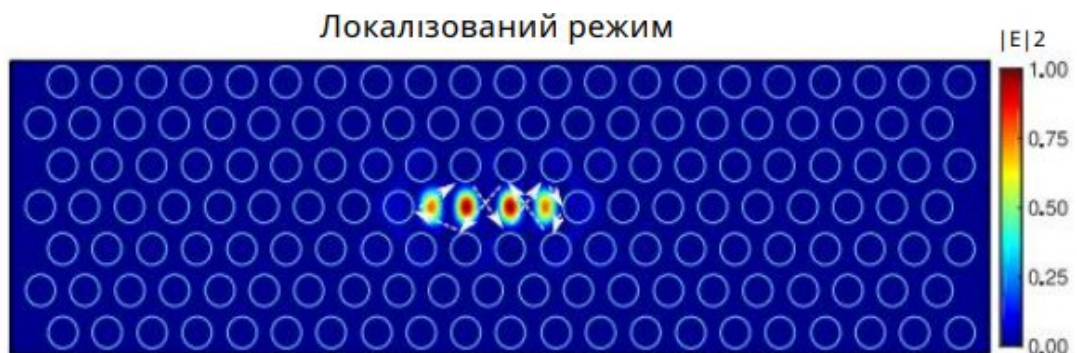


Рисунок 1.4 – Схема фотонно-кристалічного резонатора та нормалізований розподіл інтенсивності локалізованої моди

Зокрема, високі значення добротності були досягнуті у двовимірних фотонних кристалах за допомогою резонатора $L3$. Він створюється шляхом видалення трьох отворів або стрижнів в одній лінії [6].

Такий тип порожнини має важливі застосування для низькопорогових лазерів, фільтрів, сенсорів, а також перемикачів та інтегрованої оптичної обробки сигналів при інтеграції з хвилеводами [7–9].

1.4.2 Фотонно-кристалічні хвилеводи

Ще один фундаментальний тип просторового збурення у фотонно-кристалічній структурі це хвилевід. По суті, хвилевід у двовимірному фотонному кристалі – це лінійний дефект, створений шляхом видалення або зміни властивостей цілого діелектричного ряду чи стовпця, як показано на рисунку 1.5.

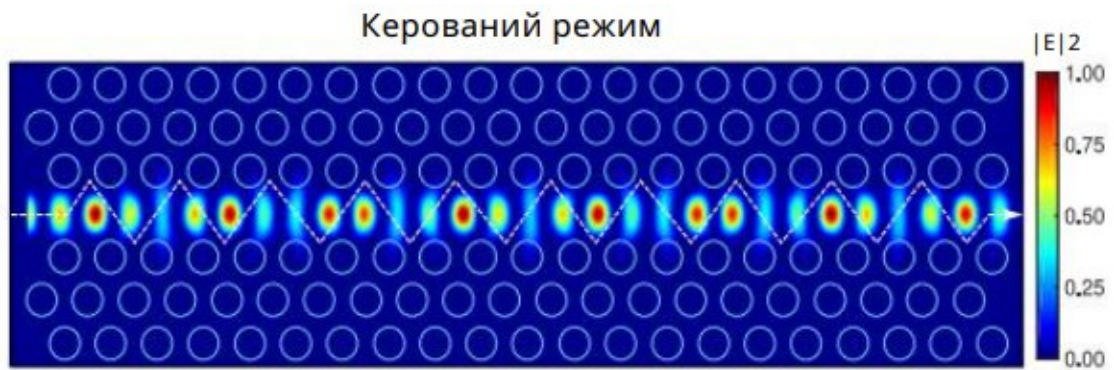


Рисунок 1.5 – Фотонно-кристалічний хвилевід. Схематичне зображення та нормалізований розподіл інтенсивності керованих мод у фотонно-кристалічному хвилеводі

Ключова відмінність між резонаторами та хвилеводами полягає в тому, що для перших електромагнітні моди можна локалізувати щоразу, коли їхня частота знаходиться в фотонній забороненій зоні, тоді як для другого поведінка режиму залежить від його частоти та значення хвильового вектору. Таким чином, керований хвилеводний режим потребує лише комбінацію хвильового вектору та частоти ФЗЗ структури. За цієї умови збереження хвильового вектору вздовж лінійного дефекту дозволяє поширення електромагнітної моди. Користуючись цим, фотонно-кристалічні хвилеводи використовуються для направлення електромагнітних хвиль з дуже високою ефективністю, що дозволяє створювати оптичні пристрої, що працюють у режимі низьких втрат та низького енергоспоживання. Це може використовуватися, наприклад, в телекомунікаційних системах.

1.4.3 Фотонно-кристалічні зв'язані системи

Зв'язана система – це така система, в якій робота кожного компонента описується відповідно до поведінки інших елементів, що входять до складу системи.

Хвилеводи та резонатори можуть утворювати пов'язану систему в фотонних кристалах для створення ефективних пристроїв з властивостями

частотних фільтрів. Існує дві можливі конфігурації для з'єднання фотонно-кристалічних хвилеводів та резонаторів: з боковим зв'язком та безпосередньо пов'язані.

У системі, де безпосередньо пов'язані фотонно-кристалічний хвилевід з резонатором, фотонно-кристалічний резонатор розміщено на одній лінії з хвилеводом, як показано на рисунку 1.6.

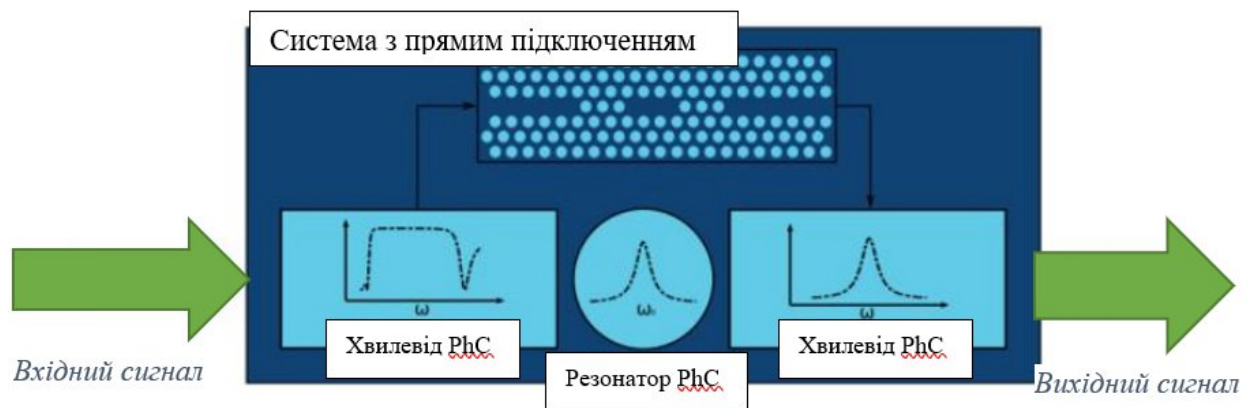


Рисунок 1.6 – Зображення безпосередньо пов'язаного хвилеводу з резонатором

Таким чином, світло з вхідного хвилеводу потрапляє в резонатор, а з резонатора, у свою чергу, потрапляє у вихідний хвилевід що дозволяє передавати частоти поблизу резонансних частота резонатора. Ця система діє як вузькосмуговий фільтрувальний пристрій. Спектр пропускання цієї системи можна оцінити за допомогою наступної функції:

$$T(\omega) = \frac{\delta}{\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)^2 + \delta}, \quad (1.4)$$

де ω_0 – резонансна частота резонатора

δ – величина, пов'язана з добротністю резонатора як: $1/Q^2$.

З іншого боку, у системі з боковим зв'язком хвилеводу та резонатора, показаний на рисунку 1.7, фотонно-кристалічний резонатор розміщений на

лінії або вище, або нижче від хвилеводу. Таким чином, резонатор з'єднується з вхідним та вихідним хвилеводами, відбиваючи навколишні частоти резонансної частоти резонатора [1, 10]. Слід відзначити, що в такій конфігурації можливе розміщення кількох резонаторів по обидва боки від фотонно-кристалічного хвилеводу.

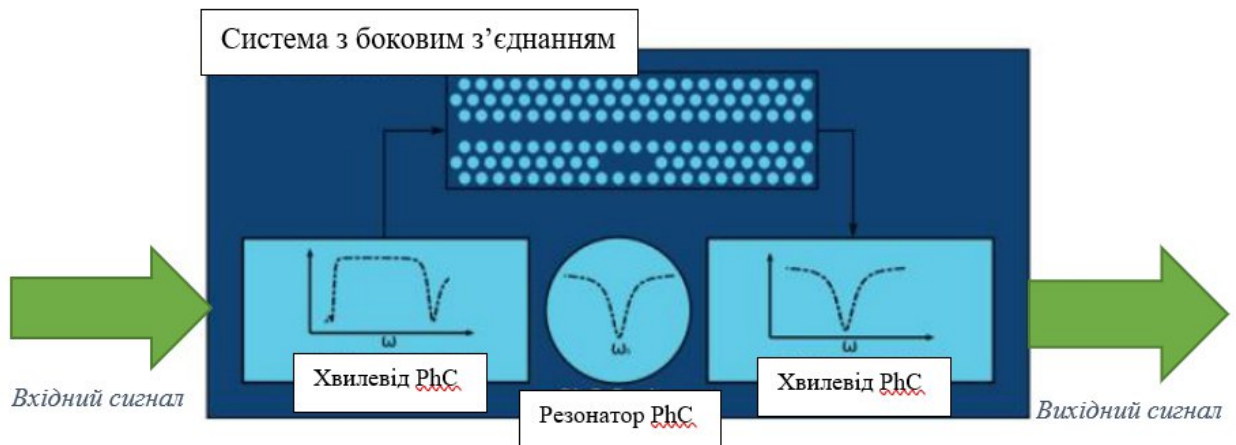


Рисунок 1.7 – Зображення бокового зв'язку хвилевід-резонатор

Для такого типу конфігурації, спектр пропускання можна обчислити рівнянням:

$$T(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)^2 + \delta} . \quad (1.5)$$

Ці пов'язані системи успішно використовуються для посилення нелінійних ефектів, частотних фільтрів, абсорбційних пристроїв та різноманітних сенсорів [11].

1.5 Фотонно-кристалічні вузькосмугові фільтри

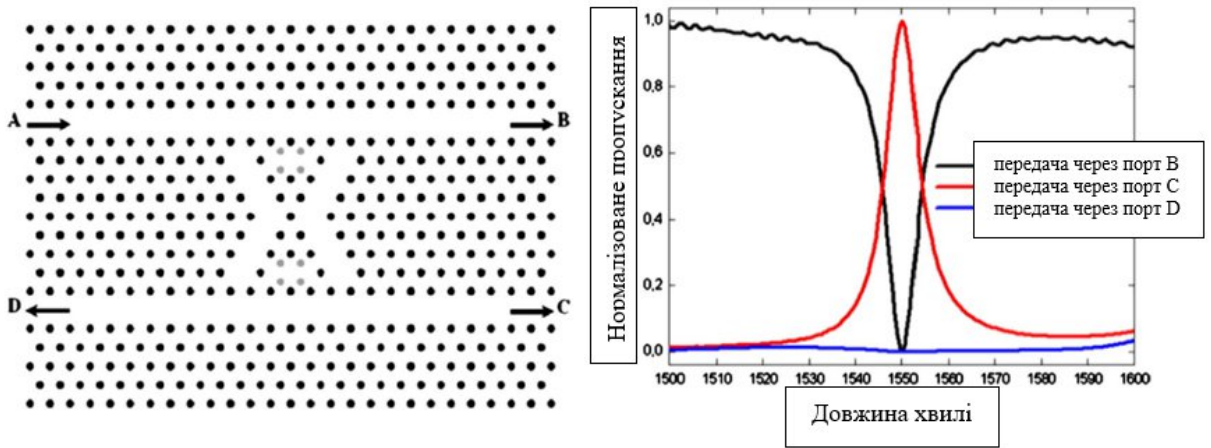
Як правило, використання фотонно-кристалічних вузькосмугових фільтрів вводу-виводу покращує добротність пристроїв завдяки гнучкій

конфігурації. Тому існує досить велика зацікавленість у розробці фотонно-кристалічних фільтрів через їх ультракомпактні компоненти та можливість масштабування пристроїв [12].

Розглянемо Х-подібний кільцевий резонатор, який показано на рис. 1.8 [13]. Для покращення селективності за довжиною хвилі вісім діелектричних стрижнів розсіювача введено в систему над та під резонатором. Крім того, структура з ФЗЗ підходить для застосування в телекомунікаційних мережах, оскільки для ТМ поляризації реалізується лише одна ФЗЗ. Як показано на рис. 1.8, а, трикутна решітка з кремнієвих стрижнів ($n_{\text{si}} = 3,46$) занурена в повітря ($n_{\text{air}} = 1$). Радіуси стержнів дорівнюють $r = 0,2a$ та постійна ґратки $a = 607,6$ нм.

Існує відповідний діапазон ФЗЗ від $0,337(a/\lambda)$ до $0,442(a/\lambda)$ і цей діапазон пропонує для практичних застосувань. Для забезпечення селективності за довжиною хвилі та покращення ефективності передачі використовуються розсіювальні та дефектні стрижні. Також використовується вісім розсіювальних стрижнів у верхньому та нижньому резонаторах (позначені сірим кольором).

Радіуси розсіювальних стрижнів становлять $r_s = 0,965r$ відповідно. Вхідний та вихідний кінець хвилеводів закриті. Як показано на рис. 1.8 (а, б), додавання розсіювальних стрижнів призводить до зростання ефективності проходження майже до 100 % та добротності до 196 на довжині хвилі сигналу $\lambda = 1550$ нм.



а)

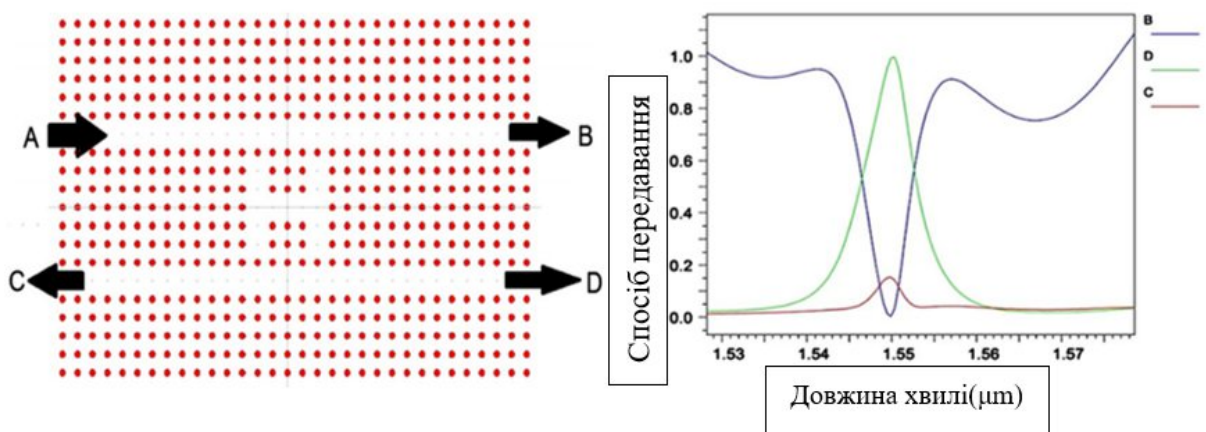
б)

а) схема Х-подібного резонатора;

б) спектр пропускання пристрою на різних портах.

Рисунок 1.8 – Х-подібний кільцевий резонатор

На рисунку 1.9 представлено Н-подібний фільтр з кількома каналами [14]. Фотонний кристал побудований на основі квадратної решітки діелектричних циліндрів, а Н-подібний фільтр розміщений між двома хвилеводами, як показано на рис. 1.9, а.



а)

б)

а) схема Н-подібного фільтру вводу-виводу на чотири порти;

б) спектральна характеристика цього фільтра.

Рисунок 1.9 – Н-подібний фільтр з кількома каналами

Показник заломлення, радіус та постійна решітки діелектричних стрижнів становлять 4,1; 94 нм та 500 нм відповідно. Діапазон фотонної забороненої зони для ТМ поляризації випромінювання становить $0,25 < (a/\lambda) < 0,4$, що дорівнює $1250 \text{ нм} < l < 2000 \text{ нм}$.

На рис. 1.9, б показано, що всі довжини хвиль виходять з порту В окрім довжин хвиль біля $\lambda = 1550 \text{ нм}$. Ця резонансна довжина хвилі проходить через другий хвилевід і виходить з порту D. Ефективність і добротність складають майже 100 % і 221 відповідно. Для деякого покращення характеристик фільтру було змінено два параметри: показник заломлення та радіус діелектричних стрижнів. Тоді коефіцієнт передачі і добротність збільшилися до 100 % і 230 відповідно. Така структура каналного дільника має кращі характеристики порівняно з Х- і Т-подібними каналними дільниками [13, 15]. Н-подібна структура використовується як з'єднувальний елемент оптичного фільтра в оптичних мережах зв'язку.

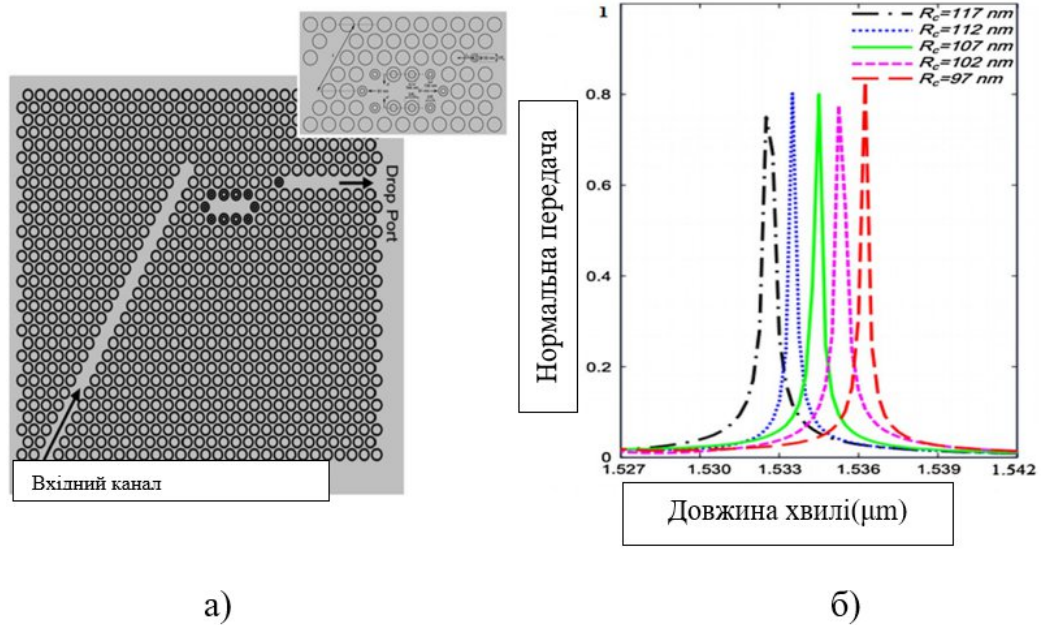
На рисунку 1.10 представлено схему та характеристики вузькосмугового фільтра, в якому використовується одна порожнина і два хвилеводи [16]. Крім того, видалені два ряди кремнієвих стрижнів як вхідні і вихідні порти. Структура виготовлена з двох пластин SiO_2 зверху і знизу від пластини Si з отворами для повітря в трикутній решітці, як показано на рис. 1.10, а.

Радіус отворів у Si пластині, показник заломлення SiO_2 і Si біля повітряних отворів становлять $r = 0,36a$ ($a = 540 \text{ нм}$), 3,518 та 1,44 відповідно. Існує широкий діапазон для роботи в одномодовому режимі в межах нормованої частоти $0,279 < (a/\lambda) < 0,391$.

Порожнина складається з шести кілець з внутрішнім радіусом 65 нм і зовнішнім радіусом, який називається R_c , і чотирьох кілець з внутрішнім радіусом 97 нм і зовнішнім радіусом R_m , як показано на рис. 1.10, а. У просторі між внутрішнім і зовнішнім кільцями знаходиться повітря. Два кільця на кінцях порожнини зсунуті на $d = 81 \text{ нм}$ назовні.

Також введено кільце з внутрішнім радіусом $R_o = 65 \text{ нм}$. Результати чисельних розрахунків показують, що коли кінець вхідного хвилеводу

заблоковано, ефективність фільтрації зменшується. Відстань між закритими кінцями вхідного каналу становить $L = 16,2$ мкм.



- а) конструкція вузькосмугового фільтра та резонансної порожнини;
 б) вихідний сигнал фільтра з різними значеннями R_c .

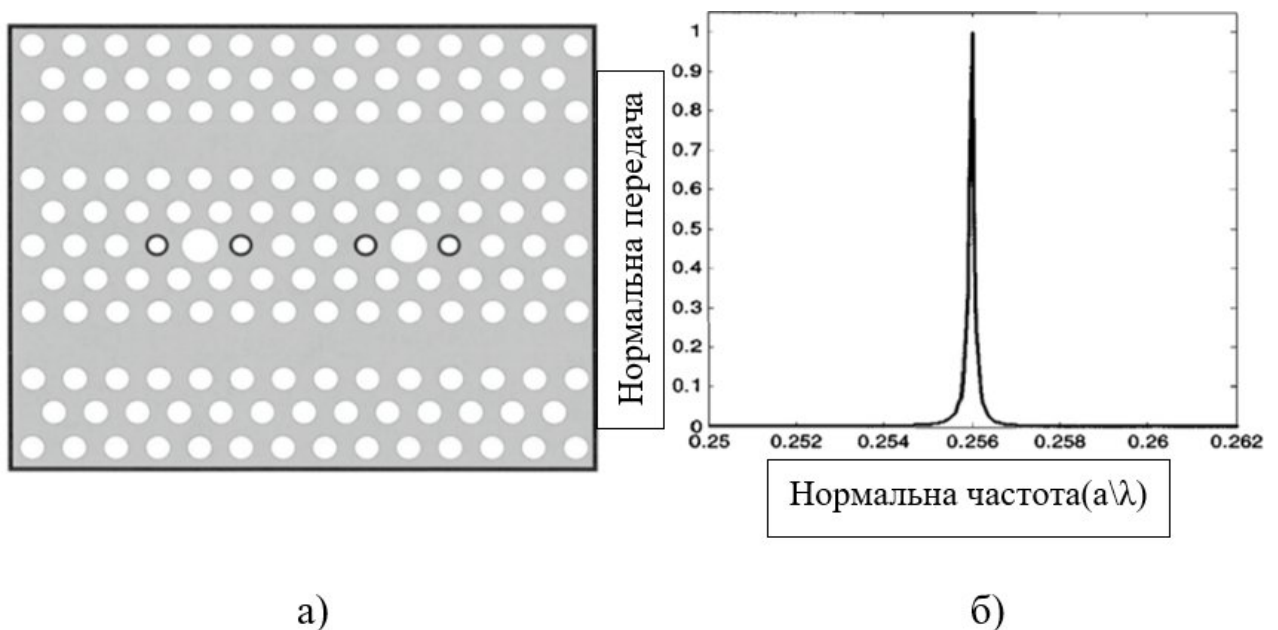
Рисунок 1.10 – Схема та характеристики вузькосмугового фільтра

Також досліджувалися структурні параметри, такі як « R_m », « R_c », « L », « L_0 » та « R_0 ». Як показано на рис. 1.10, б, результати, отримані для значення $R_c = 97$ нм, показують, що ефективність фільтра, добротність і мінімальна ширина лінії становлять 84,98 %, 5689,81 і 0,27 відповідно. Запропонований фільтр підходить для телекомунікаційних мереж.

В роботі [17] представлено вузькосмуговий фільтр вводу-виводу, в якому застосовується двовимірний фотонний кристал на основі трикутної решітки з повітряними отворами в Ga(Al)As ($n_{\text{Ga(Al)As}} = 3,32$). Як показано на рис. 1.11, а, каналний фільтр складається з двох хвилеводів і двох порожнин.

У запропонованій структурі для уникнення випадкового виродження частоти змінено радіус повітряних отворів у резонаторі.

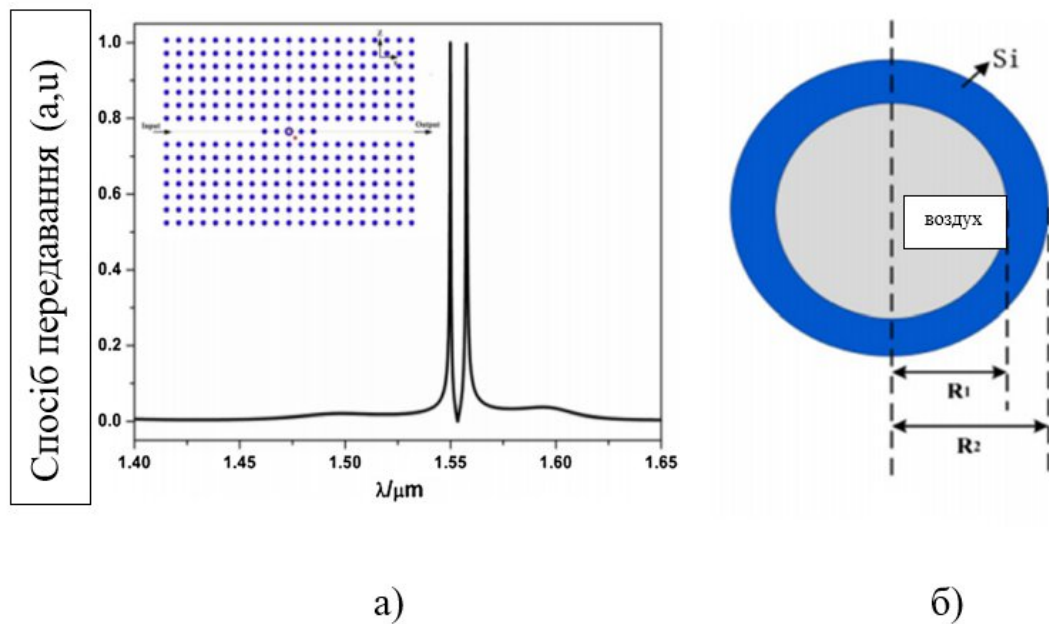
Повітряні отвори в фотонному кристалі мають розмір $R = 0,36a$, де $a = 400$ нм. Діаметр повітряних отворів з товстим колом і двома порожнинами становить $R_c = 0,55a$ і $R_w = 0,3a$ відповідно. Для того, щоб досягти максимальної ефективності каналу, відстань між двома порожнинами вказана як « $5a$ ». Як показано на рис. 1.11, б, в цій ситуації ефективність фільтрації і добротність складають більше за 98 % і 1500, відповідно. Всі параметри конструкцій, включаючи діаметри повітряних отворів, порожнин, робочу довжину хвилі та інші конструктивні параметри застосовуються в технології нановиробництва за допомогою електронно-променевої літографії.



- а) схема каналного вузькосмугового фільтра з трикутною решіткою;
 б) нормований коефіцієнт пропускання цього фільтра.

Рисунок 1.11 – Схема та характеристики каналного фотонно-кристалічного фільтра

На рисунку 1.12 представлений регульований двохвильовий фільтр на основі двовимірного фотонного кристала з кільцевим стрижнем [18]. Ця конструкція складається з кремній-повітряної решітки, яка містить внутрішній і зовнішній кільцевий стрижень, має $R_2 = 1,6R$ і $R_1 = 0,6R_2$, відповідно. Кільцевий стрижень і чотири кремнієві стрижні розміщені в центрі хвилеводу. Як показано на рис. 1.12, а, стрижень збурення розташований між кільцевим стрижнем і кремнієвим стрижнем під певним кутом φ .



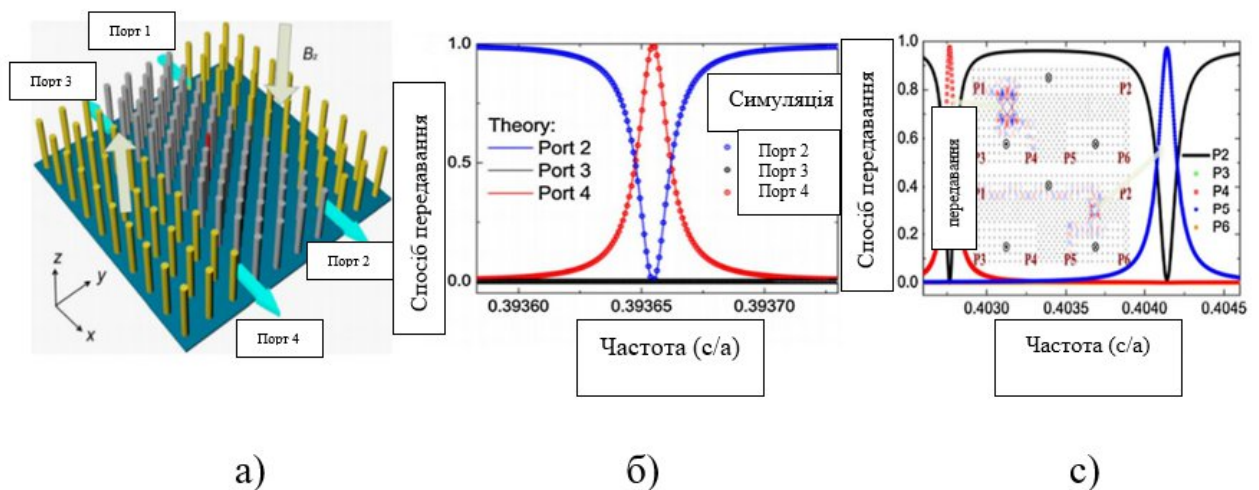
а) схема двохвильового вузькосмугового фільтра та його спектральна характеристика; б) співвідношення R_1 та R_2 .

Рисунок 1.12 – Регульований двохвильовий фільтр на основі двовимірного фотонного кристала з кільцевим стрижнем

Збільшуючи співвідношення R_p/R та показник заломлення стрижня збурень, можна досягти збільшення розділення зон. Також збільшується відстань між стрижнем збурень (червоний) та сусідніми стрижнями, а розділення зон стає вузьким. Як показано, змінюючи радіус, показник

заломлення, відстань між кільцевим стрижнем та кут нахилу стрижня збурень, величина пропускання змінюється.

В роботі [19] розроблено невзаємний фотонний кристалічний фільтр вводу-виводу у двовимірному форматі. Ця структура складається з двох невзаємних хвилеводів з двома різними матеріалами в квадратній решітці. Як показано на рис. 1.13, а, конструкція включає залізо-ітрієвий гранат (жовті стрижні) та глиноземний стрижень (сірі стрижні) з $\varepsilon = 15$ та $\varepsilon = 10$ відповідно. Радіус стрижнів становить $0,15385a$, де « a » – постійна решітки, яка складає 26 мм. Розроблена структура та пропускання невзаємних хвилеводів показані на рис. 1.13, б. У цьому випадку резонансна частота становить $f_0 = 0,3937(c/a)$, а коефіцієнт якості – 269,56.



а) схема фотонно-кристалічної структури; (б) нормалізоване пропускання одного резонатора, подвійного резонатора з двома взаємними хвилеводами та спектрами пропускання з двома резонансними частотами.

Рисунок 1.13 – Невзаємний фотонний кристалічний фільтр вводу-виводу у двовимірному форматі

Радіус центрального стрижня (стрижень з червоного оксиду алюмінію) становить $r = 0,0615a$. Для досягнення двох резонансних частот та

покращення характеристик цього фільтра введено два резонатори з $r_{o1} = 0,0423a$ та $r_{o2} = 0,0385a$. Падаюче світло потрапляло в порт 1. Як показано на рис. 1.13, в, вихідні частоти становлять $0,4028 (c/a)$ та $0,404 (c/a)$ для портів 4 та 5 відповідно. Цей фільтр використовується для мультиплексування з поділом довжин хвиль та в інших інтегрованих фотонних технологіях.

2 МОДЕЛЮВАННЯ БІПЕРІОДИЧНИХ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР

Дослідження електродинамічних властивостей фотонно-кристалічних структур базується на результатах розрахунків дисперсійних характеристик ідеалізованого (нескінченного) фотонного кристалу. Це дозволяє визначити границі фотонних заборонених зон, в яких неможливе розповсюдження електромагнітних хвиль в будь-якому напрямку.

Наявність фотонних заборонених зон дозволяє реалізувати концентрацію електромагнітної енергії в просторових областях, які утворені дефектами періодичності фотонних кристалів. Такі дефекти є основою для формування хвилеводів та резонаторів, а також інших фотонно-кристалічних структур.

2.1 Дисперсійні характеристики двовимірного фотонного кристалу.

Розглянемо характеристик власних режимів двовимірного фотонного кристалу, який сформований масивом діелектричних стрижнів, розташованих в решітці з квадратною елементарною коміркою. Вважається, що діелектричні стрижні оточені вакуумом з одиничним показником заломлення. Діелектрична проникність стрижнів дорівнює 12, що відповідає кремнію або арсеніду галію в інфрачервоному діапазоні. Радіус стрижнів r , нормований на період решітки L , дорівнює 0,2.

Схематичне зображення такого фотонного кристалу представлено на рисунку 2.1, де зображено по три просторові періоди структури уздовж осей декартової системи координат. Білий колір на рисунку 2.1 відповідає вакууму, а чорний колір – діелектрику. Стрижні є нескінченними у напрямку, перпендикулярному до площини рисунку. Саме тому така структура ідентифікується як двовимірна.

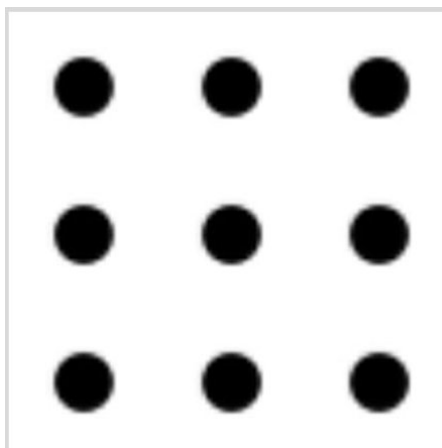


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення двовимірного фотонного кристалу

Для розрахунку дисперсійних характеристик двовимірного фотонного кристалу використовувався спеціалізований пакет MIT Phonic Bands, який має відкритий вихідний код. Це програмне забезпечення базується на методі розкладання по плоским хвилям і є досить широко застосовуваним для розрахунку характеристик власних режимів різноманітних періодичних структур [20].

Пакет MIT Phonic Bands зазвичай використовується в операційній системі Linux, але є можливість використання on-line версії цієї програми на науковому порталі pano.org. Саме таким чином проводились чисельні розрахунки в даній роботі.

Для двовимірних фотонних кристалів існує можливість проведення розрахунків дисперсійних характеристик для двох різних поляризацій випромінювання, які називаються TE та TM. Ці поляризації відрізняються напрямками координатних компонентів електромагнітного поля. Для TE поляризації магнітне поле спрямоване уздовж осей діелектричних стрижнів, тобто перпендикулярно площині рисунку на рисунку 2.1. В цьому випадку електричне поле знаходиться в площині цього рисунку і має дві координатні компоненти.

Для ТМ поляризації, навпаки, електричне поле спрямоване перпендикулярно площині рисунку, а магнітне поле розташоване в цій площині.

На рисунку 2.2 представлено результати розрахунку дисперсійних характеристик двовимірного фотонного кристалу для ТЕ поляризації випромінювання. Уздовж осі абсцис відкладаються значення хвильового числа в межах першої зони Бриллюена. Уздовж осі ординат відкладається безрозмірна частота випромінювання, яка дорівнює відношенню періоду структури до довжини хвилі.

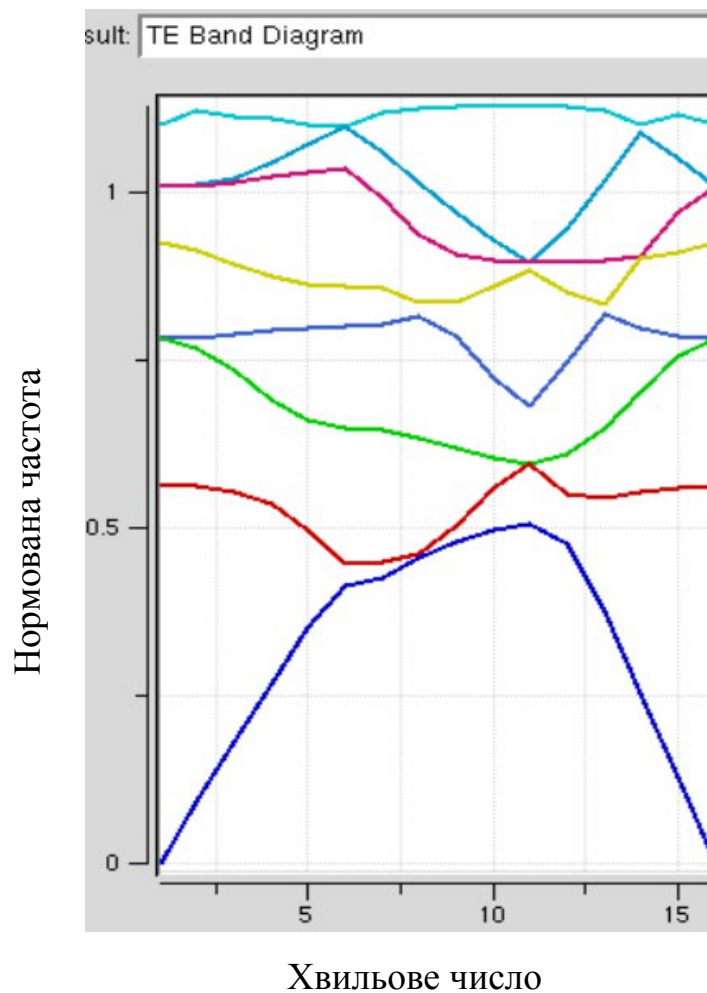


Рисунок 2.2 – Дисперсійна характеристика фотонного кристалу для ТЕ поляризації електромагнітного випромінювання

Точки, з яких складаються дисперсійні криві на рисунку 2.2, відповідають хвильовим власним режимам фотонного кристалу. Координати цих точок визначають напрямок розповсюдження хвиль у фотонному кристалі та частоту цих хвиль. З рисунку 2.2 видно, що хвильові режими для даного фотонного кристалу існують для всіх значень частоти в розглянутому діапазоні. Це означає, що фотонний кристал не має частотних заборонених зон для ТЕ поляризації випромінювання.

На рисунку 2.3 представлено результати розрахунку дисперсійних характеристик для ТМ поляризації випромінювання.

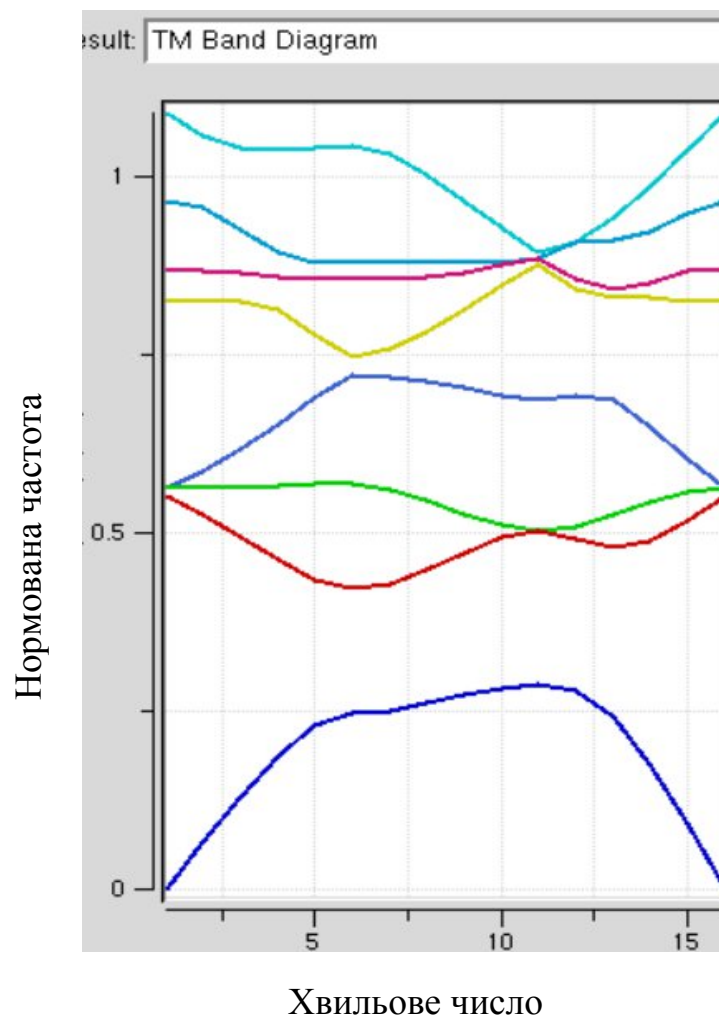


Рисунок 2.3 – Дисперсійна характеристика фотонного кристалу для ТМ поляризації електромагнітного випромінювання

На рисунку видно, що між першою та другою дисперсійними кривими існує частотний зазор, в якому немає хвильових режимів. Це і є фотонна заборонена зона, яку можна використовувати для формування різноманітних фотонно-кристалічних пристроїв.

Отже, в результаті проведення чисельних розрахунків дисперсійних характеристик двовимірного фотонного кристалу визначено поляризацію випромінювання, для якої дана структура має фотонну заборонену зону. Саме така поляризація буде використовуватися в подальших дослідженнях фотонно-кристалічних структур.

2.2 Дисперсійні характеристики модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів

На основі дослідженого двовимірного фотонного кристалу сформуємо хвилевід на основі лінійного дефекту періодичності. Схематичне зображення такого хвилеводу представлено на рисунку 2.4. Тут також показано три періоди структури по двох координатних осях. Видно, що хвилеводний канал сформований біперіодичною структурою, в якій чергуються діелектричні стрижні з різними діаметрами. В цьому випадку поряд із періодом базового фотонного кристалу існує просторовий період розміщення діелектричних стрижнів більшого діаметру, який удвічі більший за базовий період.

На рисунку 2.4 видно, що структура складається не з одного, а з нескінченної кількості хвилеводних каналів, розділених решіткою з діелектричних стрижнів. Це звичайний результат застосування так званого методу надкомірки, який дозволяє проводити розрахунки власних режимів для структур з порушеннями періодичності. В пакеті MIT Phonic Bands існує можливість реалізації такого підходу через визначення елементарної комірки періодичної структури збільшеного розміру, яка містить дефект періодичності.

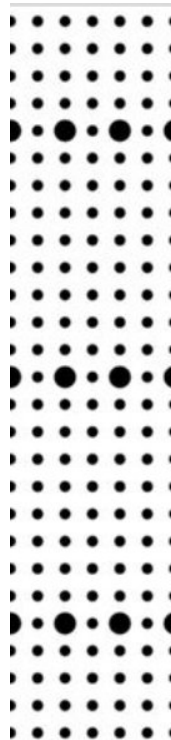


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення фотонно-кристалічної структури, яка використовується для розрахунку дисперсійних характеристик хвилеводу.

На рисунку 2.5 представлена дисперсійна характеристика фотонно-кристалічного хвилеводу з біперіодичною структурою в хвилеводному каналі. Ця характеристика побудована відносно компоненти хвильового вектора, спрямованої уздовж хвилеводу. Тобто, відносно постійної розповсюдження в межах першої зони Бриллюена.

На цьому рисунку видно значно більше дисперсійних кривих порівняно із характеристиками нескінченного фотонного кристалу. Це викликано збільшеними розмірами елементарної комірки періодичної структури. Цілком природньо, що більша комірка має більше власних режимів аналогічно тому, як більший резонатор має більшу кількість мод в певному частотному діапазоні.

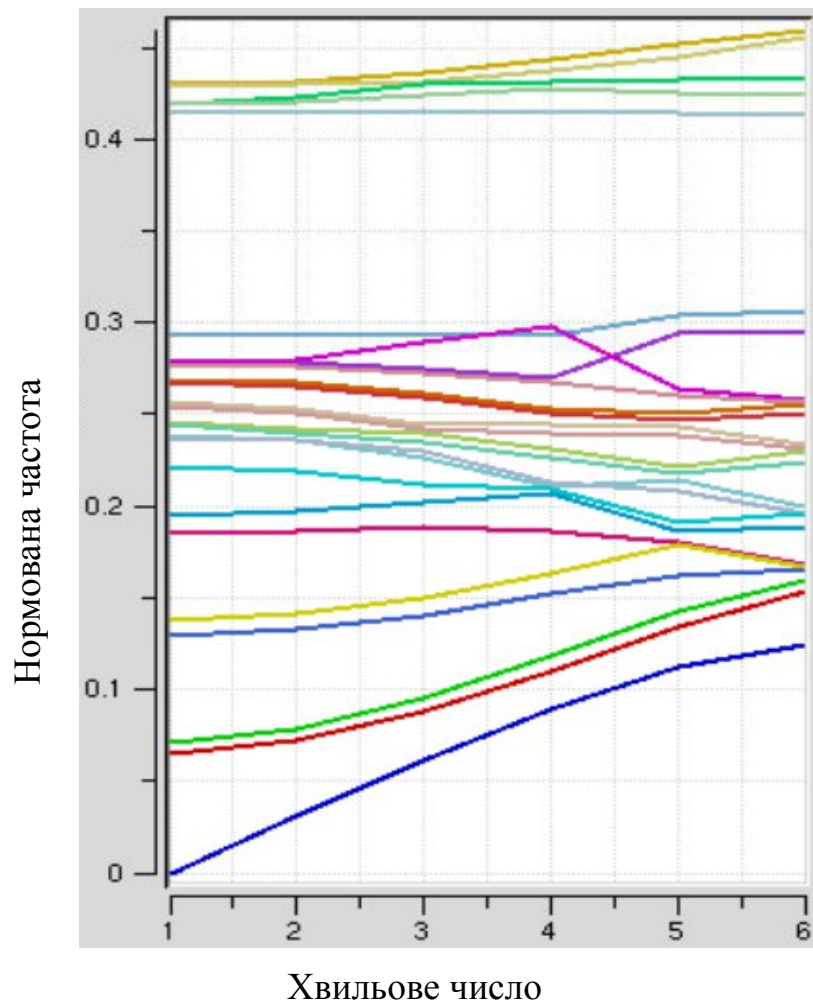


Рисунок 2.5 – Дисперсійна характеристика фотонно-кристалічного хвилеводу для ТМ поляризації випромінювання.

На рисунку видно, що хвилеводні режими структури розташовуються біля країв забороненої зони базового фотонного кристалу (рис. 2.3). Відповідні дисперсійні криві дуже подібні до горизонтальних ліній. Це означає, що хвилеводні режими структури реалізуються у дуже вузьких частотних діапазонах. Така ситуація є характерною для резонансних структур, де дисперсійні криві власних режимів представляють собою горизонтальні лінії. Таким чином, фотонно-кристалічний хвилевід з біперіодичною структурою в хвилеводному каналі має властивості вузькосмугового фільтру. Дійсно, в цьому випадку досліджувану фотонно-кристалічну структуру можна

характеризувати як хвилевід на ланцюжку зв'язаних резонаторів. Цей ланцюжок сформований біперіодичною структурою.

На рисунку 2.6 представлені результати чисельних розрахунків просторових розподілів електричного поля в досліджуваній структурі. Ці просторові розподіли відповідають хвилеводним режимам структури, які характеризуються концентрацією енергії поля в хвилеводному каналі. З рисунків видно, що діелектричні стрижні зі збільшеним діаметром можна розглядати як діелектричні резонатори, які характеризуються різними просторовими розподілами поля для різних резонансних режимів. Зокрема, в даному випадку видно дипольні та квадрупольні варіанти збудження діелектричних резонаторів.

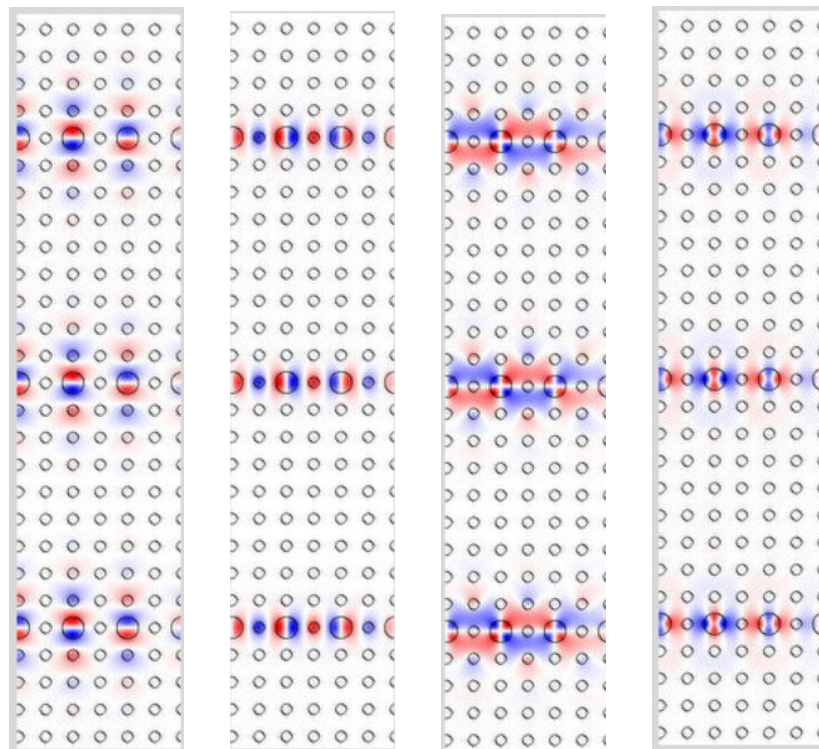


Рисунок 2.6 – Просторові розподіли електричного поля для хвилеводних режимів фотонно-кристалічної структури

Розглянемо далі модифікований фотонно-кристалічний хвилевід з пустотілим каналом та біперіодичною структурою. Схема такого пристрою представлена на рисунку 2.7. Тут також показано по три надкомірки структури уздовж осей декартової системи координат.

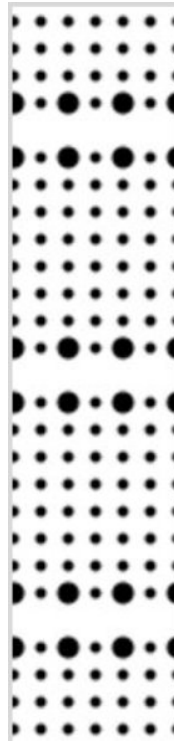


Рисунок 2.7 – Схематичне зображення біперіодичної фотонно-кристалічної структури

Видно, що в даному випадку біперіодичні елементи, які представляють собою ланцюжки діелектричних циліндрів з різними радіусами, розташовані на краях пустотілого хвилеводного каналу. Отже, ці елементи знаходяться в області інтенсивного електромагнітного поля і можуть досить суттєво впливати на електродинамічні характеристики фотонно-кристалічного хвилеводу. Крім того, в цій модифікації фотонно-кристалічного хвилеводу реалізується періодична зміна ширини пустотілого каналу, що також може бути суттєвим фізичним фактором.

На рисунку 2.8 представлено дисперсійну діаграму модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу, розраховану в програмному пакеті МРВ (MIT Photonic Bands).

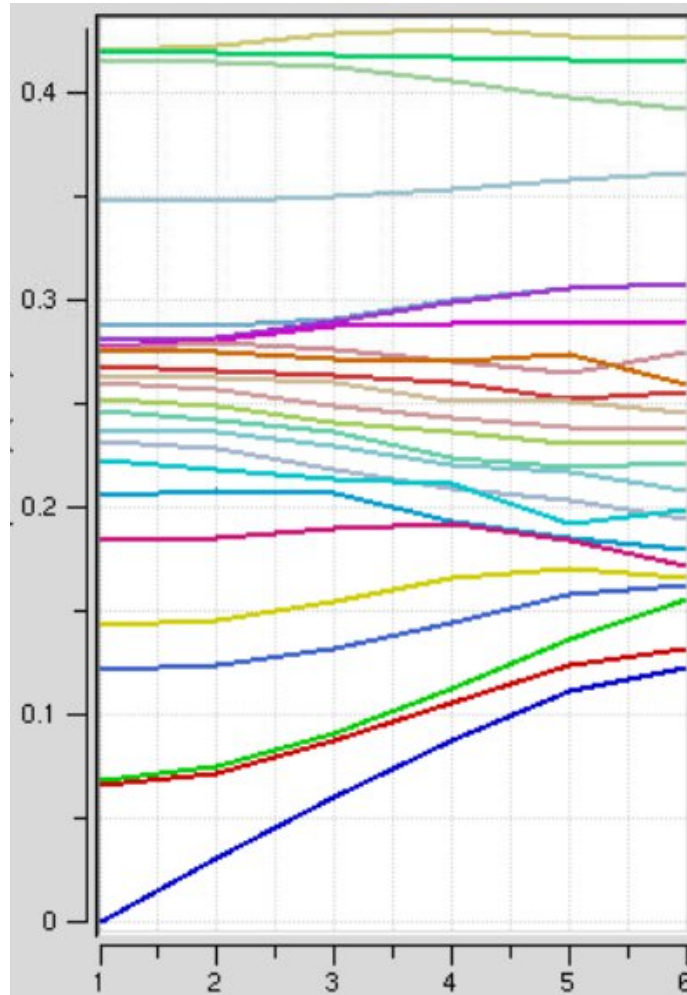


Рисунок 2.8 – Дисперсійна діаграма фотонно-кристалічного хвилеводу

Порівняння з рисунком 2.5 показує, що в даному випадку посередині забороненої зони фотонного кристалу існує дисперсійна крива, яка відповідає хвилеводному режиму. Ця крива має невелику першу похідну, що свідчить про незначну групову швидкість та досить вузький частотний діапазон даного власного режиму. Інші хвилеводні режими реалізуються на краях забороненої зони подібно до попередньо розглянутої конфігурації модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу.

Отже, зміна конфігурації фотонно-кристалічного хвилеводу та розташування біперіодичних елементів досить суттєво впливають на дисперсійні характеристики системи.

На рисунку 2.9 представлено результати розрахунків просторових розподілів електричного поля для хвилеводних мод структури, які характеризуються локалізацією енергії в межах хвилеводного каналу.

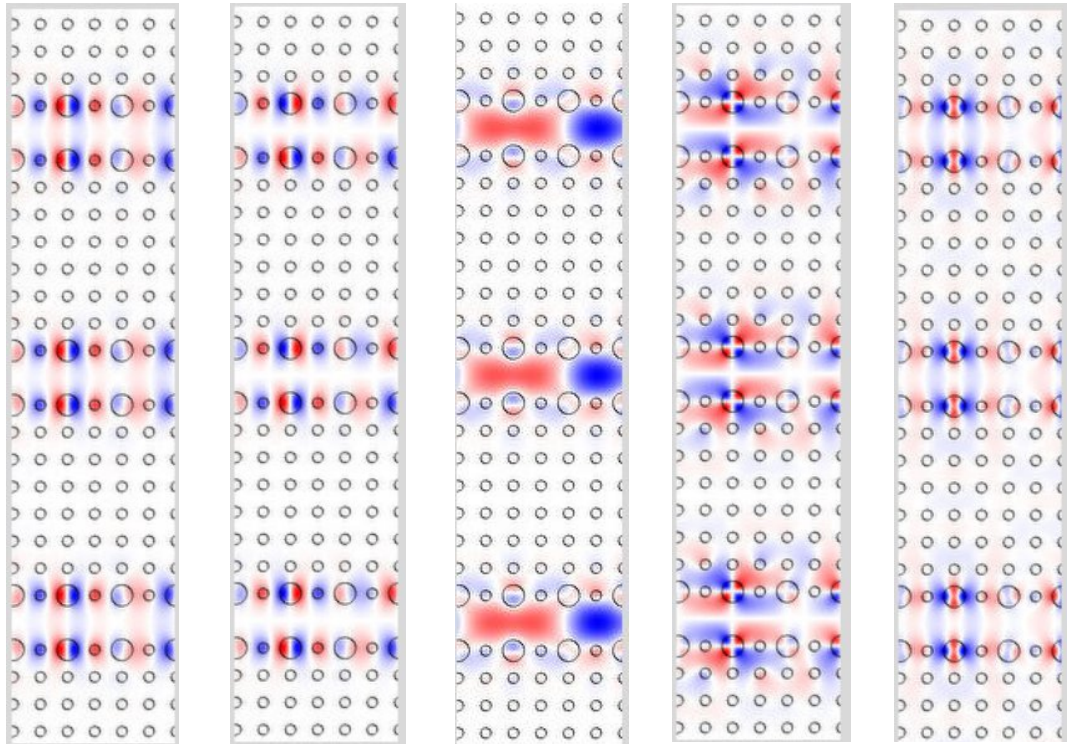


Рисунок 2.9 – Просторові розподіли електричного поля хвилеводних мод досліджуваної структури

Тут також видно різні розподіли поля в діелектричних циліндрах збільшеного діаметру, як і в попередній структурі. Але в даному випадку існує власний режим фотонно-кристалічного хвилеводу, для якого значна доля електромагнітної енергії концентрується в пустотілому хвилеводному каналі. Саме цей режим відповідає дисперсійній кривій на рисунку 2.8, яка розташована посередині забороненої зони фотонного кристалу.

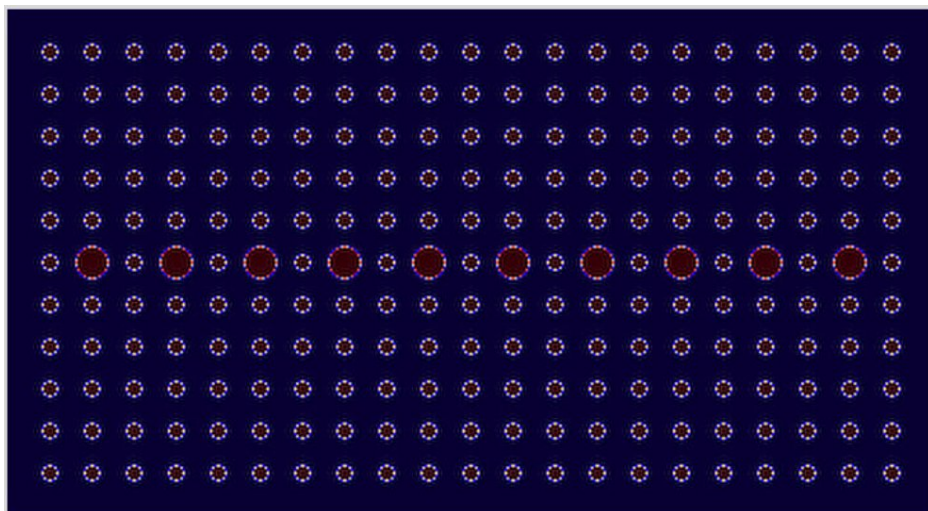
2.3 Спектральні характеристики модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів

Проведений аналіз дисперсійних характеристик модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів з біперіодичними структурами свідчить про можливість їх використання для побудови вузькосмугових частотно-селективних пристроїв. Для перевірки цього припущення були проведені чисельні розрахунки спектральних характеристик кількох конфігурацій фотонно-кристалічних хвилеводів.

Для проведення чисельних розрахунків використовувався пакет MEER, що вільно розповсюджується. Цей пакет використовує добре відомий та апробований метод скінченних різниць у часовій області (FDTD).

Модель фотонно-кристалічної структури в пакеті MEER представляє собою обмежену область розрахунку, по краям якої розташовані узгоджувальні поглинаючі шари. Отже, в цьому випадку розглядається скінченна фотонно-кристалічна структура на відміну від пакету MPB.

На рисунку 2.10 представлена схема першого варіанту фотонно-кристалічного хвилеводу, де біперіодична структура розташована в центрі каналу.



Рисунки 2.10 – Схема фотонно-кристалічного хвилеводу

Для розрахунку спектральних характеристик необхідно задати в моделі джерело випромінювання та детектор. Зазвичай ці елементи розташовуються на протилежних краях хвилеводного каналу. В даному випадку джерело випромінювання було розташоване на лівому кінці фотонно-кристалічного хвилеводу, а детектор – на правому кінці. Використовувалося Гаусове джерело випромінювання, яке має спектр певної ширини. Саме на цій ділянці спектру розраховується необхідна характеристика.

На рисунку 2.11 представлені результати розрахунку спектральної характеристики, де в налаштуваннях графіку виставили діапазон частот від 0,26 до 0,3. Слід відзначити, що уздовж осі ординат відкладено не коефіцієнт проходження через хвилевід, а деяку нормовану потужність електромагнітного поля, яка підраховується в області детектора.

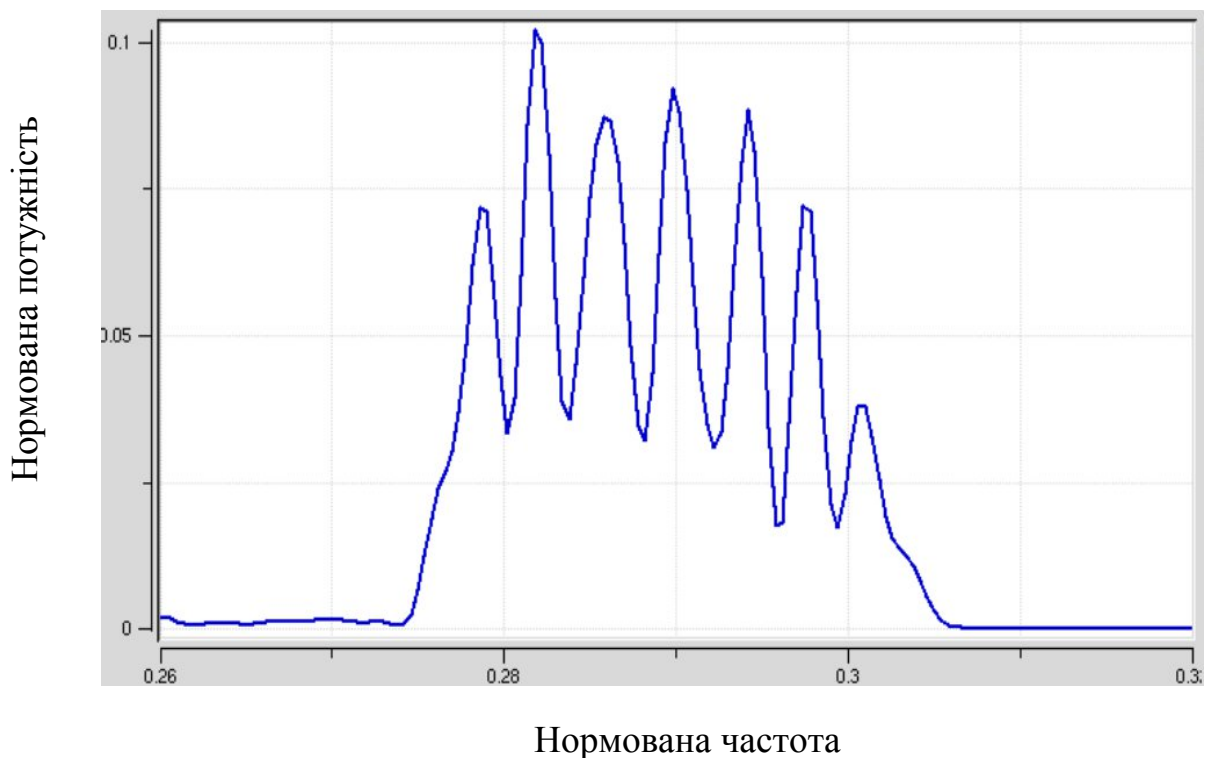


Рисунок 2.11 – Спектральна характеристика модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу

Дана спектральна характеристика побудована в низькочастотній частині забороненої зони базового фотонного кристалу, де спостерігається найбільше проходження електромагнітної енергії через хвилевід. З рисунку видно, що характеристика представляє собою послідовність вузькосмугових піків пропускання, які відповідають різним модам фотонно-кристалічного хвилеводу.

Отже, на основі такого модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу може бути сформований багатоканальний вузькосмуговий фільтр. Такі фільтри знаходять застосування в сучасних телекомунікаційних системах.

Розглянемо далі іншу схему модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу з біперіодичними структурами, яка містить пустотілий канал. Дисперсійна характеристика такого хвилеводу представлена на рисунку 2.8. В цьому випадку дисперсійні криві хвилеводних власних режимів структури розташовуються на краях фотонної забороненої зони та в її центрі. Тому спектральну характеристику необхідно розраховувати в більш широкому частотному діапазоні.

На рисунку 2.12 представлена схема модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу, яка використовується для побудови моделі в пакеті МЕЕР. Видно, що довжина хвилеводу складає 20 періодів базового фотонного кристалу, або 10 періодів решітки, побудованої з діелектричних циліндрів збільшеного діаметру.

Розташування Гаусового джерела випромінювання та детектора аналогічне попередній моделі модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу. Відмінність полягає лише в поперечних розмірах джерела випромінювання та детектора. Це викликано різними поперечними розмірами хвилеводних каналів різних конфігурацій модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів.

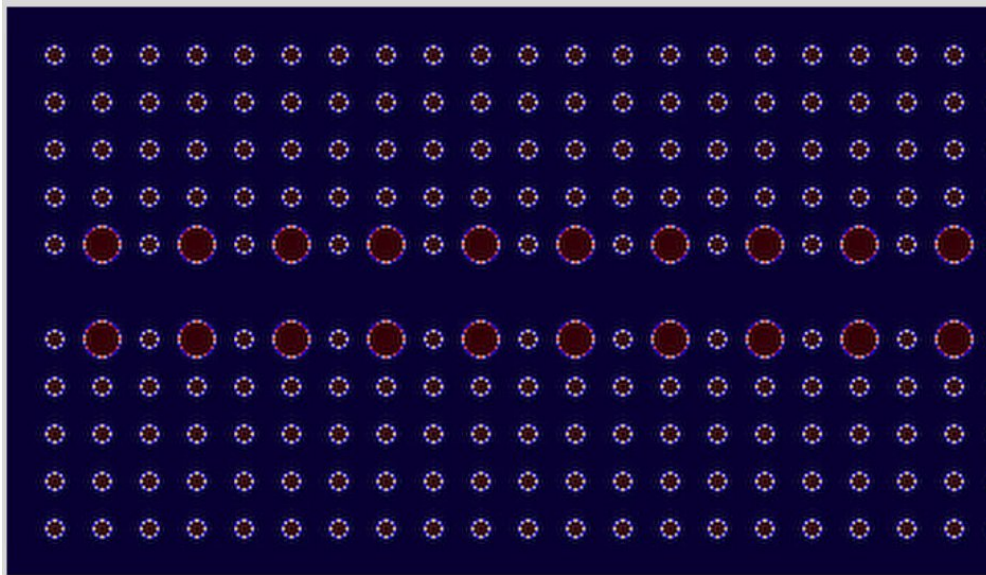


Рисунок 2.12 – Схема модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу

Результати розрахунків спектральної характеристики фотонно-кристалічного хвилеводу представлені на рисунку 2.13. Як відзначалося раніше, в даному випадку розглядається більш широкий діапазон частот, який охоплює всю заборонену зону базового фотонного кристалу. Слід зазначити, що для досягнення цієї мети необхідно встановлювати ширину спектру джерела випромінювання дещо більшою, ніж ширина фотонної забороненої зони. Це обумовлено Гаусовою формою спектру джерела випромінювання, яка характеризується низькими рівнями потужності при наближенні до країв частотного інтервалу.

Крім того, за визначенням Гаусове джерело випромінювання формує імпульсний сигнал, що накладає певні вимоги до часу розрахунку спектральної характеристики фотонно-кристалічного хвилеводу. Цей час повинен бути більшим за час повного проходження імпульсу випромінювання через хвилеводний канал. Тобто на детекторі повинен бути зафіксований весь імпульс випромінювання для уникнення помилок в оцінці величини нормованої потужності на виході хвилеводу.

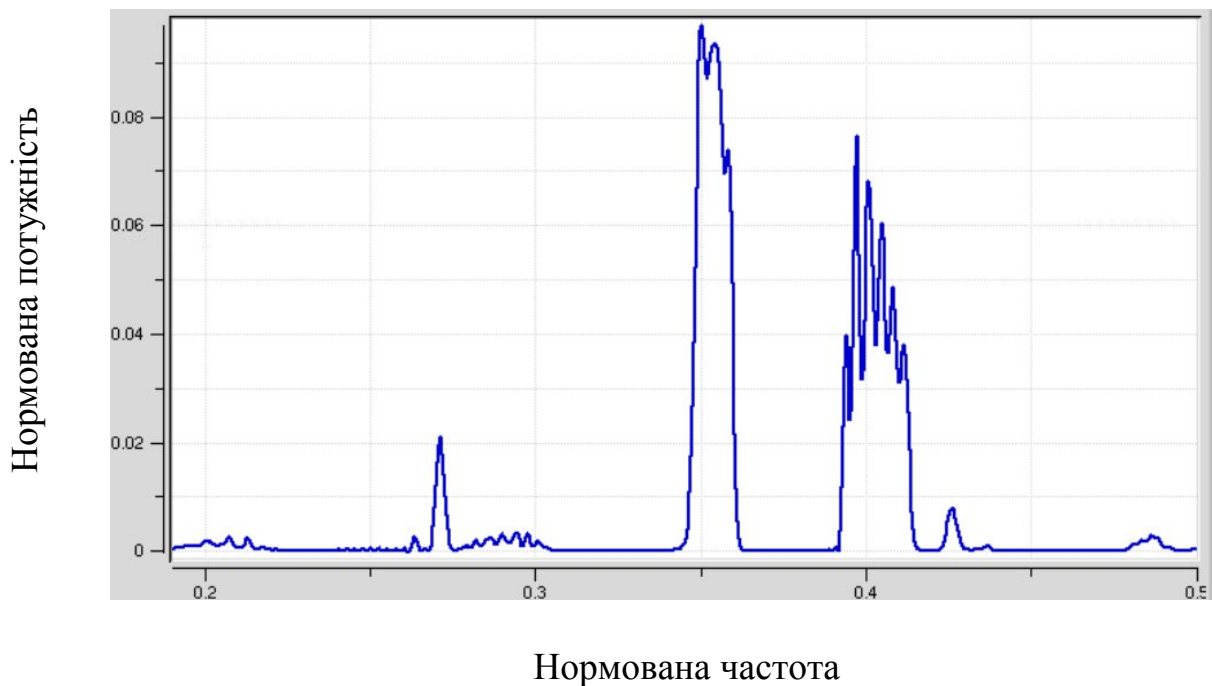


Рисунок 2.13 – Спектральна характеристика модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу

На рисунку видно три групи максимумів проходження електромагнітного сигналу через фотонно-кристалічний хвилевід. Цей результат узгоджується з дисперсійними характеристиками цього пристрою, де хвилеводні режими спостерігаються в середині фотонної забороненої зони та на її краях.

Слід відзначити, що амплітуди максимумів проходження на краях фотонної забороненої зони менші за амплітуду посередині цієї зони. Це обумовлено, перш за все, Гаусовою формою огиначаючої спектру джерела випромінювання. Ця огиначаюча має максимум в центральній частині спектру випромінювання, яка приблизно співпадає з центром фотонної забороненої зони. Для оцінки та порівняння амплітуд проходження сигналу на різних ділянках фотонної забороненої зони слід провести чисельні розрахунки послідовно зміщуючи центральну частоту спектру джерела випромінювання в межах забороненої зони.

Смуги пропускання фотонно-кристалічного хвилеводу на рисунку 2.13 мають різну ширину. Цей результат обумовлений різними формами дисперсійних кривих, які відповідають хвилеводним режимам структури. Чим ближча форма дисперсійної кривої до горизонтальної лінії, тим вужча буде смуга пропускання хвилеводу. Найбільш широка смуга пропускання реалізується на високочастотному краю фотонної забороненої зони. Тут ми маємо відповідну дисперсійну криву, яка охоплює певний частотний діапазон (див. рис. 2.8).

Таким чином, дана конфігурація модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу дозволяє реалізовувати смуги пропускання різної ширини на різних ділянках частотного спектру.

Розглянемо далі ще одну конфігурацію модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу на основі двовимірного фотонного кристалу. Схема цього хвилеводу представлена на рисунку 2.14. В даному випадку біперіодичні структури розміщені на певній відстані від пустотілого хвилеводного каналу, яка дорівнює двом періодам базового фотонного кристалу. Тобто реалізується послаблений електромагнітний зв'язок між полем хвилеводного режиму та біперіодичними структурами.

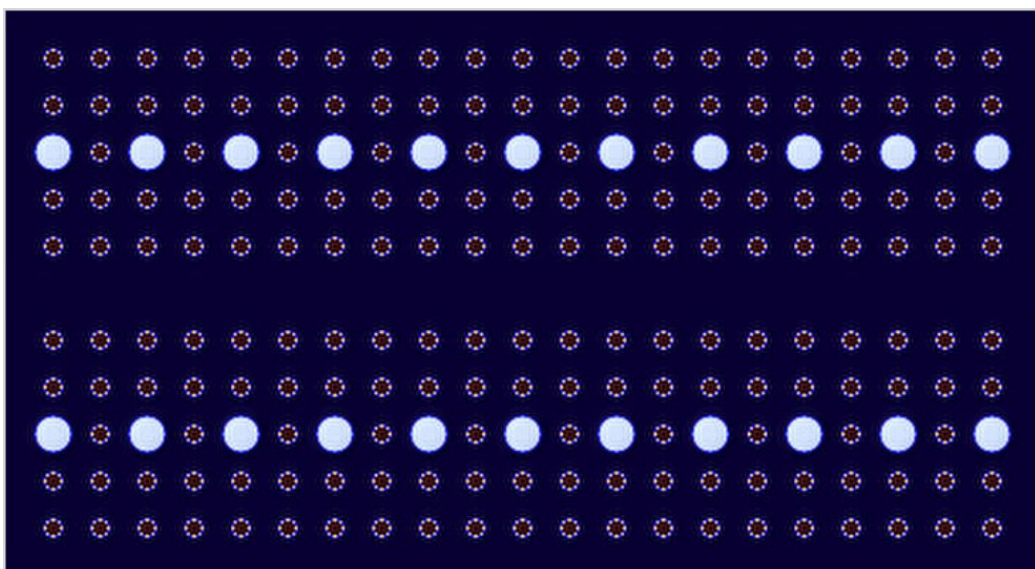


Рисунок 2.14 – Схема модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу

Модифікований фотонно-кристалічний хвилевід, представлений на рисунку 2.14, також може бути застосований як частотно-селективний пристрій. Цей висновок підтверджується спектральною характеристикою, представленою на рисунку 2.15.

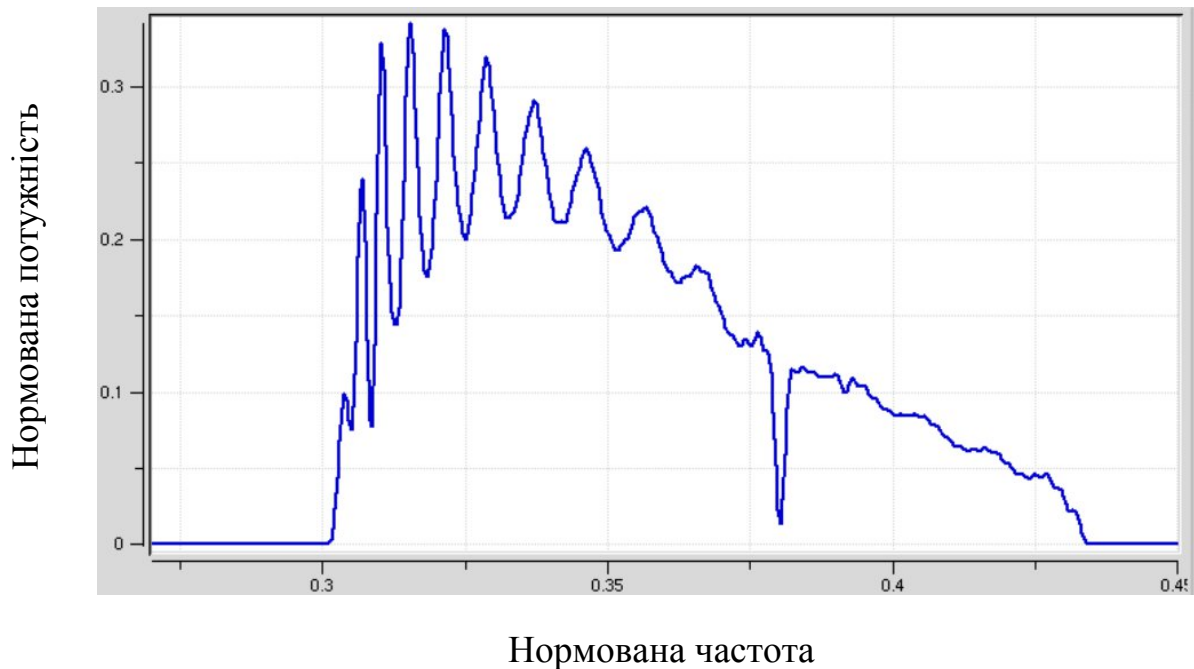


Рисунок 2.15 – Спектральна характеристика модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу

Тут ми бачимо досить широку смугу пропускання фотонно-кристалічного хвилеводу з характерними осциляціями потужності на виході каналу. На певній частоті спостерігається резонансне зменшення пропускання хвилеводу. Таким чином, на основі такого пристрою можна формувати вузькосмугові загороджувальні фільтри.

Резонансне зменшення потужності сигналу на виході хвилеводу обумовлене резонансним збудженням біперіодичних структур. Ці структури представляють собою ланцюжки зв'язаних резонаторів, які формуються діелектричними циліндрами збільшеного радіусу. Зрозуміло, що зміна матеріальних параметрів та геометричних розмірів цих циліндрів буде призводити до зміни резонансних властивостей біперіодичних структур. В

свою чергу, це явище буде призводити до зміни спектральних характеристик фотонно-кристалічної структури в цілому.

Розглянемо випадок, коли діелектрична проникність циліндрів збільшеного радіусу змінилася на одиницю (з 6 до 7). Результати розрахунку спектральних характеристик модифікованого фотонно-кристалічного хвилеводу представлені на рисунку 2.16 (темно-синя товста крива). Для порівняння на цьому ж рисунку представлені результати розрахунку попереднього варіанту спектральної характеристики (тонка голуба крива).

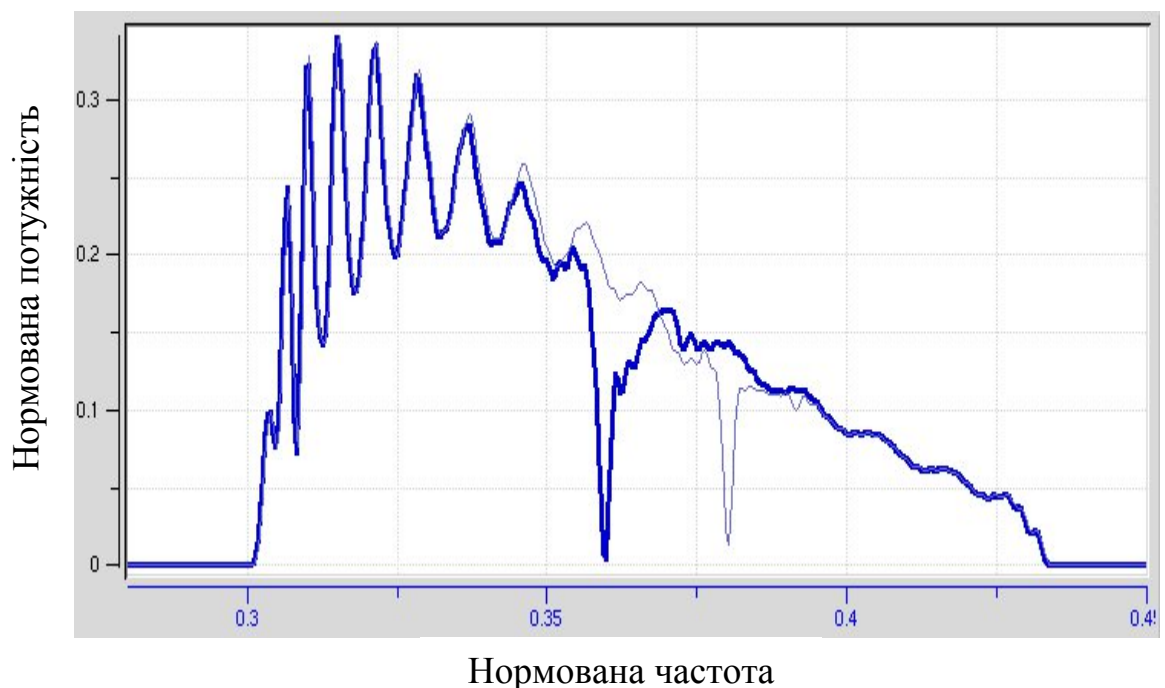


Рисунок 2.16 – Спектральні характеристики модифікованих фотонно-кристалічних хвилеводів

З рисунку видно, що збільшення діелектричної проникності циліндрів збільшеного радіусу призводить до суттєвого зсуву резонансної частоти біперіодичної структури в бік менших частот. Крім того, спостерігається зменшення потужності сигналу на виході хвилеводу для резонансної частоти. Ця потужність зменшується практично до нуля. Це свідчить про більш

ефективну взаємодію поля хвильоводної моди з біперіодичними структурами. Також можна відзначити, що добротність резонансу змінюється несуттєво.

Таким чином, розглянута конфігурація фотонно-кристалічного хвильоводу з біперіодичними елементами характеризується високою чутливістю до зміни діелектричної проникності (або показника заломлення) елементів зі збільшеним діаметром. Ця властивість може бути застосована, з одного боку, для створення керованих вузькосмугових загороджувальних фільтрів, а з іншого – для розроблення високочутливих сенсорів показника заломлення.

ВИСНОВКИ

Розглянуто основні фізичні принципи функціонування фотонних кристалів як періодичних структур різної розмірності, виготовлених з діелектричних, металевих та напівпровідникових елементів. Фізичні властивості фотонних кристалів визначаються не тільки матеріальними параметрами їх складових, а також конфігурацією елементів.

Фотонні кристали можуть застосовуватися для формування базових елементів пристроїв фотоніки, а саме хвилеводів та резонаторів. Спектральні властивості фотонних кристалів дозволяють створювати оптичні резонатори з досить значними значеннями добротності через ефективну локалізацію електромагнітної енергії в дефектах періодичності. Ті ж механізми локалізації енергії, обумовлені існуванням фотонних заборонених зон у фотонних кристалів, дозволяють формувати хвилеводні структури довільної конфігурації.

Розглянуто можливі схеми побудови вузькосмугових фільтрів із застосуванням фотонно-кристалічних структур, що містять біперіодичні елементи. Показано можливості покращення експлуатаційних характеристик частотно-селективних пристроїв через модифікацію структури фотонно-кристалічних хвилеводів з біперіодичними елементами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn I. N., Meade R. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. 2nd ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2008. 305 p.
2. Meade R. D., Brommer K. D., Rappe A. M., Joannopoulos J. D. Existence of a photonic band gap in two dimensions // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 61. P. 495–497.
3. Robertson W. M., Arjavalingam G., Meade R. D., Brommer K. D., Rappe A. M., Joannopoulos J. D. Measurement of photonic band structure in a two-dimensional periodic dielectric array // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. P. 2023–2026.
4. McGurn A. R., Maradudin A. A. Photonic band structures of two- and three-dimensional periodic metal or semiconductor arrays // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 48. P. 17576–17579.
5. Kuzmiak V., Maradudin A. A. Photonic band structures of one- and two-dimensional periodic systems with metallic components in the presence of dissipation // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 55. P. 7427–7444.
6. Akahane Y., Asano T., Song B.-S., Noda S. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal // Nature. 2003. Vol. 425, No. 6961. P. 944–947.
7. Asano T., Song B.-S., Tanaka Y., Noda S. Investigation of a channel-add/drop-filtering device using acceptor-type point defects in a two-dimensional photonic-crystal slab // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83, No. 3. P. 407–409.
8. Min B.-K., Kim J.-E., Park H. Y. Channel drop filters using resonant tunneling processes in two-dimensional triangular lattice photonic crystal slabs // Optics Communications. 2004. Vol. 237, No. 1–3. P. 59–63.
9. Yanik M. F., Fan S., Soljačić M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 83, No. 14. P. 2739–2741.

10. Waks E., Vuckovic J. Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction // *Optics Express*. 2005. Vol. 13, No. 13. P. 5064–5073.
11. Bravo-Abad J., Rodriguez A., Bermel P., Johnson S. G., Joannopoulos J. D., Soljačić M. Enhanced nonlinear optics in photonic-crystal microcavities // *Optics Express*. 2007. Vol. 15, No. 24. P. 16161–16176.
12. Kanamori Y., Takahashi K., Hane K. An ultrasmall wavelength-selective channel drop switch using a nanomechanical photonic crystal nanocavity // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 95. P. 171911.
13. Mahmoud M. Y., Bassou G., Taalbi A., Chekroun Z. M. Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators // *Opt. Commun.* — 2012. Vol. 285. P. 368–372.
14. Rezaee S., Zavvari M., Alipour-Banaei H. A novel optical filter based on H-shape photonic crystal ring resonators // *Opt. J. Light Electron Opt.* 2015. Vol. 126. P. 2535–2538.
15. Djavid M., Ghaffari A., Monifi F., Abrishamian M. S. T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators // *Phys. E Low Dimensional Syst. Nanostructures*. 2008. Vol. 40. P. 3151–3154.
16. Dideban A., Habibiyan H., Ghafoorifard H. Photonic crystal channel drop filter based on ring-shaped defects for DWDM systems // *Phys. E Low Dimensional Syst. Nanostructures*. 2017. Vol. 87. P. 77–83.
17. Qiu M., Jaskorzynska B. Design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular photonic crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2003. ol. 83. P. 1074–1076.
18. Xu H., Zhong R., Wang X., Huang X. Dual-wavelength filters based on two-dimensional photonic crystal degenerate modes with a ring dielectric rod inside the defect cavity // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54. P. 4534–4541.
19. Tao K., Xiao J., Yin X. Nonreciprocal photonic crystal add-drop filter // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 105. Issue 21. P. 211105.
20. Y.V. Sashkova, E.N. Odarenko, A.A. Shmat'ko, N.G. Shevchenko. 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.