

УДК 537.876.4

doi: 10.20998/2413-4295.2026.02.06

ДИНАМІЧНЕ КЕРУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОДНОВИМІРНИХ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ

Г. С. ХРИПУНОВ¹, А. В. МЕРІУЦ¹, Т. М. ШЕЛЕСТ², А. О. ТРУБІЛІН¹, С. С. КРИВОНІС²

¹кафедра мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

²кафедра фізики, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: Tetiana.Shelest@khpri.edu.ua

АНОТАЦІЯ Методом передатної матриці проведено теоретичне дослідження впливу локальних дефектів на спектральні характеристики одновимірних фотонних кристалів, сформованих із періодично повторюваних діелектричних шарів. Проаналізовано спектри пропускання, відбиття та поглинання електромагнітних хвиль у фотонних кристалах за наявності дефектів заміщення, вставлення, двійників та поверхневих дефектів та наявності загасання в шарах. Для конструювання фотонних кристалів з заданими властивостями запропоновано підхід, заснований на використанні графіків, які ілюструють динаміку зміни положень границь зон і дефектних мод при зміні параметрів дефектного шару. Ці графіки дозволяють зручно і швидко обирати параметри дефектного шару за бажаним значенням частоти дефектної моди. Продемонстровано можливість динамічного керування положенням дефектних мод шляхом використання комбінованих дефектів за участі шару повітря, ширину якого можна змінювати в реальному часі. Наявність шару повітря також дозволяє отримати одразу дві рухомі дефектні моди в забороненій зоні. Отримані результати можуть бути корисними для проектування приладових структур фотоніки та радіоелектроніки надвисокочастотного діапазону.

Ключові слова: одновимірний фотонний кристал, дефектні моди, діелектрична проникність, заборонена зона, дефект, спектри пропускання та відбиття

DYNAMIC CONTROL OF SPECTRAL CHARACTERISTICS IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS

G. S. KHRYPUNOV¹, A. V. MERIUTS¹, T. M. SHELEST², A. O. TRUBILIN¹, S. S. KRYVONIS²

¹ Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Theoretical study of the influence of local defects on the spectral characteristics of one-dimensional photonic crystals formed by periodically repeated dielectric layers has been carried out using the transfer matrix method. The transmission, reflection, and absorption spectra of electromagnetic waves in photonic crystals have been analyzed in the presence of substitutional, interstitial, twin, and surface defects, as well as accounting for losses in the layers. For the design photonic crystals with specified properties, an approach based on the use of plots illustrating the evolution of the band-edge positions and defect modes as a function of defect layer parameters has been proposed. These plots enable convenient and rapid selection of defect layer parameters corresponding to a desired defect mode frequency. The possibility of dynamic control of defect mode positions by employing combined defects involving an air layer with tunable thickness has been demonstrated. The presence of the air layer also allows for the emergence of two simultaneously tunable defect modes within the bandgap. The obtained results can be useful for the design of device structures in photonics and microwave terahertz electronics.

Keywords: one-dimensional photonic crystal, defect modes, dielectric permittivity, photonic bandgap, defect, transmission and reflection spectra

Вступ

Унікальні фізичні властивості одновимірних фотонних кристалів (1D ФК) дозволяють застосовувати їх для керування розповсюдженням електромагнітних хвиль в високочастотній і надвисокочастотній електроніці [1]. Останні наукові публікації показують, що такі штучні періодичні структури також мають великі перспективи для застосування в приладових структурах наноелектроніки [2], спінтроніки [3, 4], оптоелектроніки та фотоніки [5 - 8], зокрема, для створення вузькосмугових фільтрів, сенсорів та

багатофункціональних фотонних пристроїв із високою чутливістю [9 – 11].

Фотонні кристали є штучними періодичними структурами з наперед заданими властивостями. Основними особливостями таких періодичних структур, незалежно від сфери їхнього застосування, є: по-перше, створення ними дозволених і заборонених зон для розповсюдження електромагнітних хвиль або інших частинок і квазічастинок в твердому тілі [12], та, по-друге, можливість отримання штучних середовищ з ефективною від'ємною діелектричною або магнітною проникністю [13]. Дозволені й заборонені зони для

розповсюдження електромагнітних хвиль з'являються за рахунок періодичної модуляції діелектричної (або магнітної) проникності з періодом, порівняним з довжиною електромагнітної хвилі, падаючої на ФК. У такому середовищі, подібно до електронів в звичайному кристалі, відбувається квантування властивостей фотонів, яке призводить до формування фотонних заборонених зон.

Аналогічно тому, як у звичайних кристалах введення дефектів призводить до модифікації енергетичного спектру електронів, у фотонних кристалах порушення періодичності зумовлює появу локалізованих дефектних мод у фотонній забороненій зоні, що проявляється у вигляді вузьких резонансних максимумів у спектрах пропускання та відбиття [14]. Сучасні дослідження 1D ФК спрямовані на пошук ефективного керування положенням, кількістю і добротністю таких мод, як за рахунок параметрів структури, зокрема товщиною та фізичними властивостями матеріалів, так і за рахунок зовнішніх впливів. Так, наприклад, у ФК з використанням шару надпровідника в матриці спостерігається висока керованість дефектних мод під дією температури, тиску та кута падіння хвилі, що забезпечує створення високочутливих оптичних сенсорів нового покоління [15 – 17].

Таким чином, дослідження впливу різних типів дефектів у 1D ФК на його спектральні характеристики і пошук можливостей динамічного керування цими характеристиками є актуальним для подальшої розробки фізичних засад конструктивно-технологічних рішень інноваційних приладових структур на основі ФК.

Мета роботи

Проведення теоретичного дослідження впливу дефектів на спектральні характеристики 1D ФК, сформованих із шарів діелектриків, а також пошук можливостей динамічного керування цими характеристиками для розробки фізичних основ створення приладових структур на основі 1D ФК для НВЧ радіоелектроніки.

Методика досліджень

Дослідження розповсюдження електромагнітних хвиль в одновимірних періодичних структурах було виконано методом передатної матриці, який описаний, наприклад, у [14, 18]. В цьому методі рівняння Максвела доповнені граничними умовами, які полягають в неперервності тангенціальних компонент поля на границях розділу середовищ з різними властивостями. Підставивши компоненти поля в граничні умови, наприклад, для першого шару періодичної структури, можна отримати передатну матрицю, яка встановлює зв'язок полів на початку і в кінці шару (для першого шару це точки $z = 0$ та $z = d_1$). Наприклад, для ТЕ хвилі маємо:

$$\begin{pmatrix} E_y(0) \\ H_x(0) \end{pmatrix} = m(d_1) \begin{pmatrix} E_y(d_1) \\ H_x(d_1) \end{pmatrix},$$

$$m(d_1) = \begin{pmatrix} \cosh(ik_{z1}d_1) & -\frac{\omega}{ck_{z1}} \sinh(ik_{z1}d_1) \\ -\frac{ck_{z1}}{\omega} \sinh(ik_{z1}d_1) & \cosh(ik_{z1}d_1) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де $k_z = \sqrt{\epsilon\omega^2 / c^2 - k_x^2}$, $k_x = (\epsilon\omega/c)\sin\theta$, θ – кут падіння хвилі на границю структури, ϵ – діелектрична проникність.

Матриця $m(d_1)$ є передатною матрицею шару. Аналогічно, можна отримати передатну матрицю для другого шару $m(d_2)$, яка буде відрізнятися від $m(d_1)$ тільки заміною індексу $1 \rightarrow 2$. Для того, щоб пов'язати поля на початку і в кінці одного періоду структури (в точках $z = 0$ і $z = d = d_1 + d_2$), потрібно знайти добуток цих матриць, тобто передатну матрицю для одного періоду $m = m(d_1)m(d_2)$.

Оскільки структура є періодичною, а поля на границях періоду можуть відрізнятися тільки на фазовий множник, то:

$$E(0) = E(d) \exp(i\bar{k}d). \quad (2)$$

У періодичній структурі залежність від поперечної координати визначається не хвильовими числами шарів k_{z1} , k_{z2} , а усередненим за весь період блохівським хвильовим числом, яке пов'язане з власними числами передатної матриці рівнянням $q^2 + (m_{11} + m_{22})q + 1 = 0$, $q = \exp(i\bar{k}d)$.

Для встановлення зв'язку між точками періодичної структури, які знаходяться на відстані цілої кількості періодів N , необхідно знайти добуток матриць одного періоду, або звести матрицю m у відповідний ступінь за допомогою теореми Абеде [14]. За допомогою передатної матриці $M = m^N$ для всієї періодичної структури загальною довжиною L , яка розташована між двома однорідними середовищами a і b , можна отримати вирази для амплітудних коефіцієнтів пропускання t і відбиття r для періодичної структури:

$$t = \frac{2 \exp(ik_{zb}L)}{\left(M_{11} - \frac{ck_{zb}}{\omega} M_{12}\right) + \left(\frac{k_{zb}}{k_{za}} M_{22} - \frac{\omega}{ck_{za}} M_{21}\right)}, \quad (3)$$

$$r = \frac{\left(M_{11} - \frac{ck_{zb}}{\omega} M_{12}\right) - \left(\frac{k_{zb}}{k_{za}} M_{22} - \frac{\omega}{ck_{za}} M_{21}\right)}{\left(M_{11} - \frac{ck_{zb}}{\omega} M_{12}\right) + \left(\frac{k_{zb}}{k_{za}} M_{22} - \frac{\omega}{ck_{za}} M_{21}\right)}.$$

Енергетичні відносні коефіцієнти пропускання й відбиття визначаються як модулі відповідних амплітудних коефіцієнтів:

$$T = |t|^2, R = |r|^2. \quad (4)$$

За наявності втрат при розповсюдженні хвилі в деякому середовищі їх можна врахувати введенням комплексної діелектричної проникності $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$, а енергію (A), яка була поглинена середовищем, можна розрахувати, користуючись законом збереження енергії: $T + R + A = 1$.

На основі викладених теоретичних уявлень була розроблена комп'ютерна програма для розрахунку спектральних характеристик коефіцієнтів відбиття, пропускання і поглинання одновимірного фотонного кристалу з різними типами дефектів.

Обговорення результатів

1. Одновимірний фотонний кристал без дефектів, вплив загасання

Для наявності в спектрі пропускання і відбиття ФК дозволених і заборонених смуг мають виконуватися дві умови. По-перше, товщини шарів повинні бути порядку довжини хвилі $d_{1,2} \sim \lambda$, оскільки для $\lambda \ll 0.1d_{1,2}$ заборонені зони стають настільки вузькими, що їх складно виділити. А для хвиль $\lambda \gg 6d_{1,2}$ структура ФК буде сприйматися як однорідне середовище з деякою ефективною діелектричною проникністю. Надалі ми будемо розглядати частоти 300 – 400 ГГц, що потрапляють в частотний діапазон 6G. В якості матеріалів для ФК слід обирати такі, які мають якомога більшу різницю діелектричної проникності, що дозволить створити суттєвий контраст при розповсюдженні електромагнітної хвилі. В якості модельної структури ми розглядаємо далі ФК, сформований з шару кварцу (SiO_2) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3.8$, і товщиною $d_1 = 0.5$ мм, і шару кремнію (Si) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_{\text{Si}} = 11.85$, і товщиною $d_2 = 0.5$ мм. Технологія отримання цих матеріалів необхідної якості добре відпрацьована сучасною електронною промисловістю. Розглядаємо ФК $N\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$, який має 10 періодів ($N=10$). Як видно з розрахованих спектрів пропускання і відбиття при нормальному падінні електромагнітних хвиль ($\theta = 0^\circ$) в обраному частотному діапазоні спостерігається дві заборонені зони для довжин хвиль 0.75 – 0.793 мм та 0.89 – 0.918 мм (рис. 1, а). При зміні кута падіння до $15^\circ - 20^\circ$ картину зон можна вважати практично сталою, вона лише трохи зміщується в бік коротших хвиль. Суттєве спотворення цієї картини спостерігається починаючи з кутів падіння хвилі $30^\circ - 40^\circ$, а для кута падіння 60° заборонені зони в обраному частотному діапазоні зникають.

Другою умовою спостереження чіткої картини зон є низький рівень втрат в обраному частотному діапазоні в матеріалах, з яких складено ФК. Моделювання свідчить, що величина діелектричних втрат суттєво впливає на вигляд спектральних характеристик ФК. Якщо тангенс кута діелектричних

втрат, ($\epsilon''/\epsilon' = \text{tg}(\delta)$) досягає 1 %, то спектри суттєво спотворюються, хоча наявність зонної структури спектру ще можна спостерігати (рис. 1 б)), але більша частина енергії хвиль поглинається в матеріалах, з яких складено фотонний кристал.

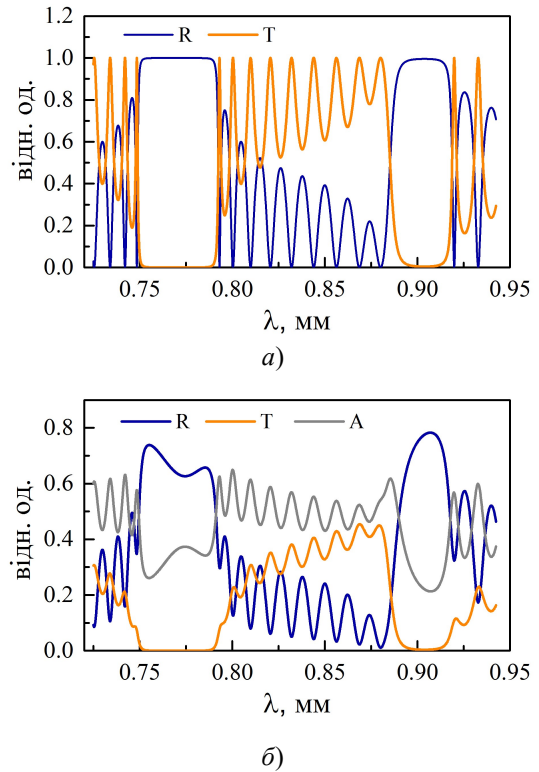


Рис. 1 – Спектри пропускання, відбиття і поглинання ФК $10\{\text{SiO}_2\text{-Si}\}$ без дефектів: а) без втрат, б) з втратами $\text{tg}(\delta) = 0.0038$

Для якісного кварцу тангенс кута діелектричних втрат має порядок $\text{tg}(\delta) \approx 10^{-4}$, а для чистого кремнію в темноті ця величина буде ще меншою $\leq 5 \cdot 10^{-5}$. Такі малі втрати трохи зменшують пропускання в дозволених зонах і на 1 – 2 % зменшують відбиття в заборонених зонах та дещо згладжують границі заборонених зон. При цьому спектр пропускання залишається практично незмінним. В подальших розрахунках прийнято, що втрати в шарах є малими, як вказано вище, але не дивлячись на це слід зауважити, що в разі наявності в складі ФК шару навіть з мінімальним загасанням виникає можливість суттєвого поглинання на дефектній моді (див. рис. 2), навіть якщо шар дефекту сам по собі зовсім не має втрат. Збільшення кількості періодів ФК призводить до того, що енергія на дефектній моді може практично повністю поглинатися замість того, щоб проходити через кристал, як це відбувається за повної відсутності втрат. При цьому поглинання на всіх інших частотах не зазнає суттєвих змін.

2. Вплив дефектів та динамічне керування спектрами

Для одновимірного ФК розглянемо наступні типи дефектів: I тип – двійник, коли дефект змінює порядок чергування шарів; II тип – дефект заміщення, коли шар з матеріалу, відмінного від тих, які складають періодичну структуру, вбудований на місце одного з матричних шарів; III тип – дефект вставлення, коли додатковий шар іншого матеріалу, вставлений між регулярно повторюваними періодами матриці ФК; IV тип – поверхневий дефект, граничний випадок дефекту III-го типу; Дефект I-го типу насправді може бути зведеним до дефекту III-го типу. Для будь-якого з локальних дефектів загальний вид передатної матриці був представлений як добуток матриці регулярної частини кристалу, яка знаходиться перед дефектом, на матрицю дефекту і на матрицю регулярної частини кристалу, яка знаходиться після дефекту:

$$M = m^{N_1} m_v m^{N_2}, \quad (5)$$

де $N_{1,2}$ – кількість періодів ФК до та після дефекту, m_v – матриця дефектного шару, яка визначатися виразом, аналогічним до (1) з заміною індексу 1 на індекс v .

Для дефекту можна обирати як матеріали, які мають діелектричну проникність відмінну від такої для матеріалів шарів ФК, а можна використати ті самі матеріали, які складають ФК, але з іншою товщиною, не порушуючи регулярний порядок шарів. Можна запропонувати різні варіанти комбінацій заміщення чи вставлення дефектних шарів з точки зору співвідношення величини діелектричної проникності дефектного шару і шарів, з яких складено ФК. Наявність дефекту призводить до появи так званої дефектної моди в заборонених зонах, тобто частоти, на якій стає можливим пропускання. Для прикладу на рис. 2 приведено спектри для обраного вище ФК у випадку дефекту заміщення.

Модельні розрахунки показують, що принципової відмінності впливу виду дефекту на вигляд спектру немає. Зазвичай зміною товщини шару можна отримати якісно ідентичні картини спектральних характеристик для всіх зазначених вище локальних дефектів. Також загальним результатом для будь якого типу дефекту є те, що зміщення дефектного шару від центру до краю кристалу призводить до зменшення пропускання на дефектній моді. Коли дефект опиняється на початку, або в кінці ФК, тобто фактично стає поверхневим дефектом (типу IV), то дефектна мода зникає. При цьому різниця в спектрах пропускання і відбиття для положення дефекту на початку або в кінці структури спостерігається в дозволених зонах, тоді як заборонені зони залишаються майже однаковими з незначним зміщенням положення їхніх країв. Таким чином, можна сказати, що поверхневий дефект не впливає на спектр пропускання і відбиття в заборонених зонах, якщо його діелектрична

проникність є постійною величиною і не містить уявної частини (тобто, втрат).

Як видно з графіків на рис. 2, в залежності від співвідношення параметрів дефектного шару та параметрів матричних шарів ФК дефектна мода може існувати не в усіх зонах. Також з результатів моделювання випливає, що найбільші зміни в спектрі спостерігаються тоді, коли діелектрична проникність дефектного шару максимально відрізняється від такої для шарів, які складають період ФК.

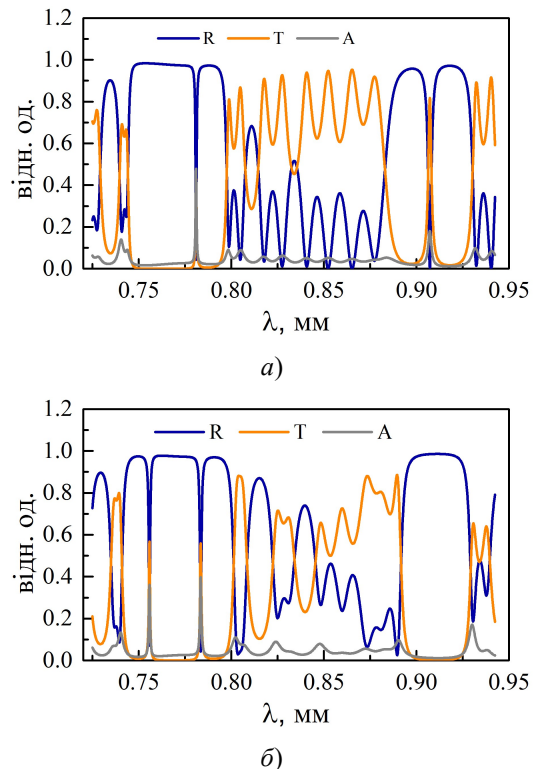


Рис. 2 – Спектри пропускання, відбиття і поглинання ФК з повітрям в якості дефектного шару заміщення: а) $5\{SiO_2/Si\}/Air/Si/4\{SiO_2/Si\}$ – заміщений шар SiO_2 , б) $5\{SiO_2/Si\}/SiO_2/Air/4\{SiO_2/Si\}$ – заміщений шар Si

Для отримання загальної уяви про вплив дефекту на вигляд спектральних характеристик і передбачення положення дефектної моди, а також кількості таких мод в забороненій зоні в залежності від параметрів дефекту, ми пропонуємо підхід, заснований на використанні графіків, які ілюструють динаміку зміни положень границь зон і дефектних мод при зміні параметрів дефектного шару (рис. 3). На цих графіках показано положення заборонених зон які знаходяться між суцільними лініями, і положення дефектної моди, яке позначено точками, як функцію ширини дефектного шару d_v . Схожий вигляд мають залежності і від ϵ_v , але залежності від d_v є більш реальними, оскільки забезпечити неперервну зміну ϵ_v в широких межах набагато складніше ніж зміну d_v .

Як видно з модельних графіків (рис. 3), і, як випливає з виразів для матричних елементів (1), ці

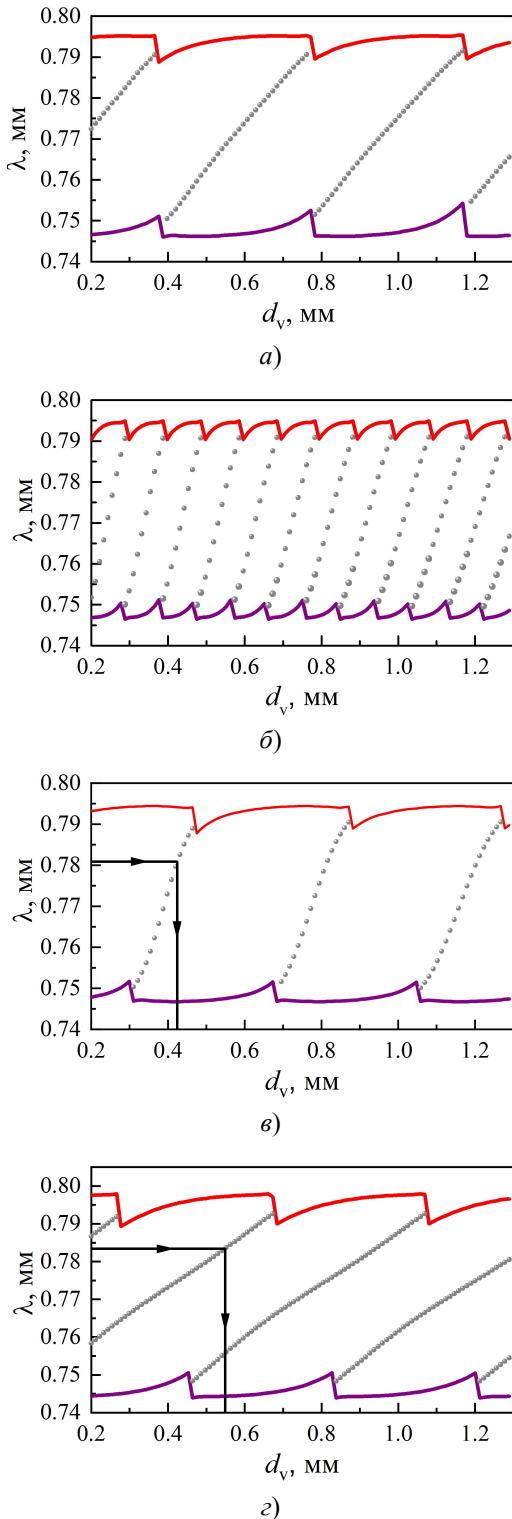


Рис. 3 – Положення заборонених зон (лінії) і дефектної моди (точки), як функція ширини дефектного шару d_v для ФК з дефектом:

- а) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/\text{Air}(\epsilon_v = 1)/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;
- б) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/\text{Ge}(\epsilon_v = 16)/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;
- в) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/\text{Air}/\text{Si}/4\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;
- з) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/\text{SiO}_2/\text{Air}/4\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$

графіки є періодичними функціями d_v і ϵ_v . Вони дозволяють показати всі зміни в спектрі, що стосуються заборонених зон і зумовлені внесенням дефекту до ФК, а також залежність цих змін від ширини дефектного шару. Як видно з цих графіків, наявність або відсутність дефектної моди залежить від товщини дефектного шару. Поява дефектної моди в забороненій зоні призводить до розширення зон по відношенню до їхньої ширини в бездефектному кристалі. Максимальна ширина забороненої зони спостерігається коли ширина дефектного шару така, що дефектна мода знаходиться посередині забороненої зони, а мінімальна, коли дефектна мода виходить з зони, що викликає достатньо різке звуження зони до її значення в бездефектному кристалі. За наявності двох дефектних мод в одній зоні зміна її ширини подвоюється. Графіки зображені на рис. 3 дозволяють обрати параметри дефектного шару для отримання потрібного положення дефектної моди. Провівши горизонтальну лінію, яка відповідає бажаній робочій частоті, до перетину з лінією, яка визначає положення дефектної моди в забороненій зоні, можна визначити необхідну товщину дефектного шару. Як приклад, лінії, проведені на рис. 3 в) та г) відповідають спектру з дефектними модами, зображеними на рис. 2 а) та б), відповідно. Як бачимо, на рис. 3 г) вертикальна лінія перетнула дві лінії дефектних мод, що відповідає двом модам в забороненій зоні на рис. 2 б).

Якщо дефектний шар являє собою шар твердого матеріалу, то неперервна зміна товщини цього шару в готовому приладі є неможливою, тому динамічне керування положенням дефектної моди потребує впливу на його діелектричну проникність. В разі ж, якщо дефект являє собою шар повітря, керування положенням дефектної моди в динамічному режимі стає можливим. В такому разі за допомогою крокових двигунів і мікрогвинтів стає можливим налаштування положення дефектної моди в забороненій зоні і керування кількістю таких мод (одна або дві, рис. 3 г). Біше ступенів свободи в налаштуванні положення дефектної моди можна отримати, якщо використовувати комбінований дефект, розмітивши додатковий діелектричний шар в шарі повітря. Загальну формулу структури ФК з таким комбінованим дефектом можна записати у вигляді: $N\{D1/D2\}/(A1/Dv/A2)/N\{D1/D2\}$, тут $D1$, $D2$, Dv – символи діелектричних шарів матриці ФК, і додаткового твердого діелектричного шару, $A1$, $A2$ – символи шару повітря.

В якості прикладу на рис. 4 приведено декілька результатів моделювання положення заборонених зон і дефектних мод для такої структури (з параметрами ФК прийнятими вище), як функції ширини шару повітря ($0 < d_{a1} < 1$ мм, $d_{a2} = 1 - d_{a1}$), $d_v = 0.5$ мм.

Як видно з графіків, обраний діапазон варіювання d_{a1} є надлишковим, але він демонструє періодичність і дозволяє обрати максимальне доцільне значення d_{a1} . Для даного ФК достатньо було

б варіювати d_{a1} в діапазоні від 0 до 0.4 мм, щоб отримати всі можливі варіанти положення дефектних мод. Також з результатів моделювання видно, що на

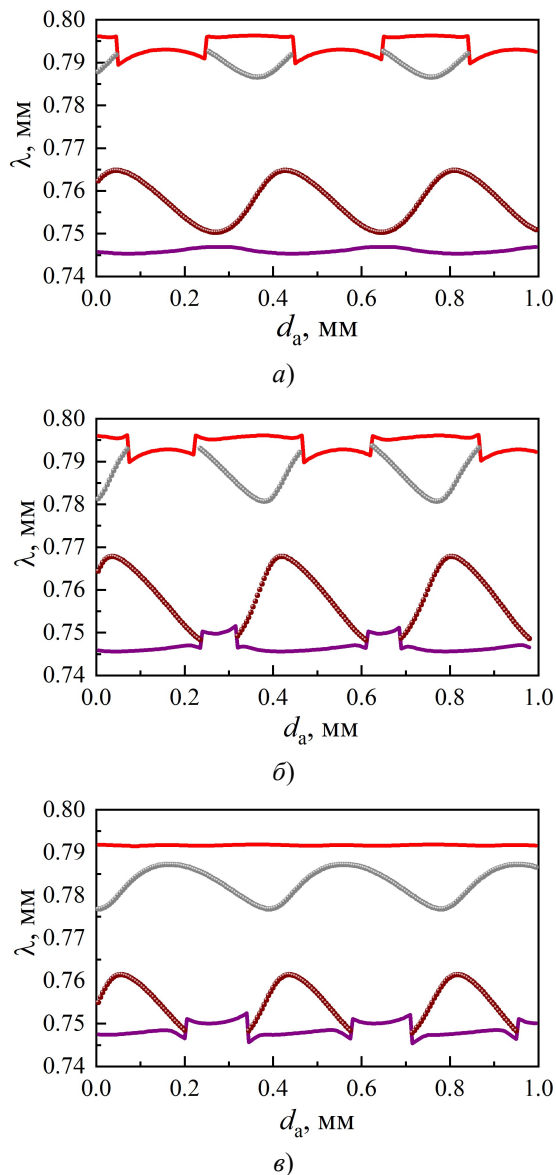


Рис. 4 – Положення заборонених зон (лінії) і дефектної моди (точки), як функція ширини шару повітря ($0 < d_{a1} < 1$, $d_{a2} = 1 - d_{a1}$) для ФК з комбінованим дефектом:

- а) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/(\text{Air}/\text{SiO}_2/\text{Air})/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;
б) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/(\text{Air}/\text{Si}/\text{Air})/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;
в) $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/(\text{Air}/\text{Ge}/\text{Air})/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$;

відміну від простого дефекту, коли дефектна мода проходить через всю зону при зміні його параметрів, для комбінованого дефекту завжди залишається область заборонених частот в яку дефектні моди не потрапляють. Разом з тим виникає можливість комбінувати частоту однієї дефектної моди з двома різними частотами іншої дефектної моди, змінюючи положення шару Dv між шарами повітря A1, A2. Можна також отримати майже сталі положення однієї

з дефектних мод, яке практично не буде залежати від позиції шару Dv між шарами повітря. Так, наприклад, для фотонного кристалу $5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}/(\text{Air}/\text{GaSb}(\epsilon_v = 15)/\text{Air})/5\{\text{SiO}_2/\text{Si}\}$, незалежно від значення $0 < d_{a1} < 1$ мм, дефектна мода буде знаходитися в діапазоні $0.77498 < \lambda < 0.77522$ мм, тобто амплітуда зміщення в залежності від позиції шару GaSb буде ~ 0.24 мкм.

Висновки

Показана можливість динамічного керування положенням дефектної моди у ФК при використанні в якості дефекту вставлення або дефекту заміщення шару повітря або комбінованого дефекту, в якому до шару повітря додано рухомий діелектричний шар. Такий комбінований дефект дає більше можливих варіантів для обрання пари робочих дефектних мод. Керування шириною шару повітря може бути технічно легко реалізовано для довжин хвиль від сантиметрового до суб міліметрового діапазонів. Для практичного конструювання ФК з заданими властивостями запропоновано підхід, заснований на використанні графіків, які ілюструють динаміку зміни положень границь зон і дефектних мод при зміні параметрів дефектного шару.

Показано, що в реальних ФК, в яких шари мають втрати, виникає необхідність обмеження кількості періодів для збереження достатнього рівня пропускання на дефектній моді.

Можливість динамічного керування положенням дефектної моди розширює перспективи застосування досліджених структур ФК в системах зв'язку.

Список літератури

1. Mohamed A. G., Elsayed H. A., Mehaney A., Aly A. H., Sabra W. Transmittance properties of one-dimensional metamaterial nanocomposite photonic crystal in GHz range. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. P. 18331. doi: 10.1038/s41598-022-21455-2.
2. Ramanujam N. R., Wilson K. S. Joseph, Revathy V., Lenin M. Maria, Jothy V. Bena Properties of one Dimensional Photonic Crystals with Defects Thickness and Temperature Dependence. *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2, Issue 3. P. 959-964. doi: 10.1016/j.matpr.2015.06.016.
3. Lubert-Perquel D., Acharya S., Johnson J. C. Optically Addressing Exciton Spin and Pseudospin in Nanomaterials for Spintronics Applications. *ACS Appl. Opt. Mater.* 2023. Vol. 1. P. 1742–1760. doi: 10.1021/acsaom.3c00299.
4. Koopmans B., Li P., Pezeshki H., Demirel E., Simons G., Jiao Y., van der Tol J., and Lavrijsen R. Towards on-Chip Spintronic-Photonic Integration. *In 2024 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers, INTERMAG Short Papers*. 2024. Article No. 10576952. doi: 10.1109/INTERMAGShortPapers61879.2024.10576952.
5. Si Y., Ju Z., Ma H., Xia K., Lin S., Tang R., Sun B., Sun C., Li L. Realization and simulation of silicon-on-sapphire mid-infrared one-dimensional photonic crystal cavities. *Appl. Phys. Lett.* 2025. Vol. 126. P. 021101. doi: 10.1063/5.0241260.

6. Sadoun B., Mouetsi S., Hocini A. and Hocini A. Optical properties of one-dimensional photonic crystal and light absorption enhancement in planar a-Si:H solar cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1046. Article No. 012014. doi: 10.1088/1757-899X/1046/1/012014.
7. Gangwar R. K., Pathak A. K., and Kumar S. Recent Progress in Photonic Crystal Devices and Their Applications: A Review. *Photonics*. 2023. Vol. 10, Issue 11. Article No. 1199. doi: 10.3390/photronics10111199.
8. Kou D., Zhang S., and Ma W. Recent Advances in 1D Photonic Crystals: Diverse Morphologies and Distinctive Structural Colors for Multifaceted Applications. *Adv. Opt. Mater.* 2024. Vol. 12, Issue 19. Article No. 2400192. doi: 10.1002/adom.202400192.
9. Hao K., Li Z., Wang X., Yang S., Zhang J. and Gao Y. Transmission characteristics of one-dimensional photonic crystal with dielectric defect layer in near-infrared band. *Proc. of SPIE*. 2020. Vol. 11564. Article No. 1156403 doi: 10.1117/12.257955.
10. Wu M.-R., Wu C.-J., Chang S.-J. Investigation of defect modes in a defective photonic crystal with a semiconductor metamaterial defect. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2014. Vol. 64. P. 146-151. doi: 10.1016/j.physe.2014.07.023.
11. Gryga M., Ciprian D., Gembalova L., Hlubina P. One-Dimensional Photonic Crystal with a Defect Layer Utilized as an Optical Filter in Narrow Linewidth LED-Based Sources. *Crystals*. 2023. Vol. 13, No 1. Article No. 93. doi:10.3390/cryst13010093.
12. Aly A. H., Abdel Ghany S. E. S., Fadlallah M. M., Salman F. E., Kamal B. M. Transmission and temperature sensing characteristics of a binary and ternary photonic band gap. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2015. Vol. 10, No. 1. P. 1-6. doi: 10.1166/jno.2015.1697.
13. Fu L., Lin M., Liang Z., Wang Q., Zheng Y. and Ouyang Z. The Transmission Properties of One-Dimensional Photonic Crystals with Gradient Materials. *Materials*. 2022. Vol. 15. Issue 22. Article No. 8049. doi: 10.3390/ma15228049.
14. Bass F. G. and Bulgakov A. A. Kinetic and Electrodynamical Phenomena in Classical and Quantum Semiconductor Superlattices. New York: Nova Science. 1997.
15. Thabet R., Barkat O. Transmission Spectra in One-dimensional Defective Photonic Crystal Integrating Metamaterial and Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2022. Vol. 35. P. 1473 – 1482. doi: 10.1007/s10948-022-06195-8.
16. Lyubchanskii I. L., Dadoenkova N. N., Zabolotin A. E., Lee Y. P. and Rasing Th. A one-dimensional photonic crystal with a superconducting defect layer. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009. Vol. 11. Article 114014. doi: 10.1088/1464-4258/11/11/114014.
17. Liu A., Gao H., Xiao Y., Zheng J., Zhang Q. Tunable narrow-and-sharp defect modes and transmission peak degeneracy in periodic superconducting photonic crystals. *PLOS One*. 2026. Vol.21, No. 1. Article No. e0341241. doi: 10.1371/journal.pone.0341241.
18. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. New York: Jon Wiley & Sons, 1984.
19. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 18331. doi: 10.1038/s41598-022-21455-2.
20. Ramanujam N. R., Wilson K. S. Joseph, Revathy V., Lenin M. Maria, Jothy V. Bena Properties of one Dimensional Photonic Crystals with Defects Thickness and Temperature Dependence. *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2, Issue 3. P. 959-964. doi: 10.1016/j.matpr.2015.06.016.
21. Lubert-Perquel D., Acharya S., Johnson J. C. Optically Addressing Exciton Spin and Pseudospin in Nanomaterials for Spintronics Applications. *ACS Appl. Opt. Mater.* 2023. Vol. 1. P. 1742–1760. doi: 10.1021/acsaom.3c00299.
22. Koopmans B., Li P., Pezeshki H., Demirel E., Simons G., Jiao Y., van der Tol J., and Lavrijsen R. Towards on-Chip Spintronic-Photonic Integration. In 2024 IEEE International Magnetic Conference - Short Papers, INTERMAG Short Papers. 2024. Article No. 10576952. doi: 10.1109/INTERMAGShortPapers61879.2024.10576952.
23. Si Y., Ju Z., Ma H., Xia K., Lin S., Tang R., Sun B., Sun C., Li L. Realization and simulation of silicon-on-sapphire mid-infrared one-dimensional photonic crystal cavities. *Appl. Phys. Lett.* 2025. Vol. 126. P. 021101. doi: 10.1063/5.0241260.
24. Sadoun B., Mouetsi S., Hocini A. and Hocini A. Optical properties of one-dimensional photonic crystal and light absorption enhancement in planar a-Si:H solar cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1046. Article No. 012014. doi: 10.1088/1757-899X/1046/1/012014.
25. Gangwar R. K., Pathak A. K., and Kumar S. Recent Progress in Photonic Crystal Devices and Their Applications: A Review. *Photonics*. 2023. Vol. 10, Issue 11. Article No. 1199. doi: 10.3390/photronics10111199.
26. Kou D., Zhang S., and Ma W. Recent Advances in 1D Photonic Crystals: Diverse Morphologies and Distinctive Structural Colors for Multifaceted Applications. *Adv. Opt. Mater.* 2024. Vol. 12, Issue 19. Article No. 2400192. doi: 10.1002/adom.202400192.
27. Hao K., Li Z., Wang X., Yang S., Zhang J. and Gao Y. Transmission characteristics of one-dimensional photonic crystal with dielectric defect layer in near-infrared band. *Proc. of SPIE*. 2020. Vol. 11564. Article No. 1156403 doi: 10.1117/12.257955.
28. Wu M.-R., Wu C.-J., Chang S.-J. Investigation of defect modes in a defective photonic crystal with a semiconductor metamaterial defect. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2014. Vol. 64. P. 146-151. doi: 10.1016/j.physe.2014.07.023.
29. Gryga M., Ciprian D., Gembalova L., Hlubina P. One-Dimensional Photonic Crystal with a Defect Layer Utilized as an Optical Filter in Narrow Linewidth LED-Based Sources. *Crystals*. 2023. Vol. 13, No 1. Article No. 93. doi:10.3390/cryst13010093.
30. Aly A. H., Abdel Ghany S. E. S., Fadlallah M. M., Salman F. E., Kamal B. M. Transmission and temperature sensing characteristics of a binary and ternary photonic band gap. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 2015. Vol. 10, No. 1. P. 1-6. doi: 10.1166/jno.2015.1697.
31. Fu L., Lin M., Liang Z., Wang Q., Zheng Y. and Ouyang Z. The Transmission Properties of One-Dimensional Photonic Crystals with Gradient Materials. *Materials*. 2022. Vol. 15. Issue 22. Article No. 8049. doi: 10.3390/ma15228049.
32. Bass F. G. and Bulgakov A. A. Kinetic and Electrodynamical Phenomena in Classical and Quantum Semiconductor Superlattices. New York: Nova Science. 1997.
33. Thabet R., Barkat O. Transmission Spectra in One-dimensional Defective Photonic Crystal Integrating Metamaterial and Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2022. Vol. 35. P. 1473 – 1482. doi: 10.1007/s10948-022-06195-8.
34. Lyubchanskii I. L., Dadoenkova N. N., Zabolotin A. E., Lee Y. P. and Rasing Th. A one-dimensional photonic crystal with a superconducting defect layer. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009. Vol. 11. Article 114014. doi: 10.1088/1464-4258/11/11/114014.
35. Liu A., Gao H., Xiao Y., Zheng J., Zhang Q. Tunable narrow-and-sharp defect modes and transmission peak degeneracy in periodic superconducting photonic crystals. *PLOS One*. 2026. Vol.21, No. 1. Article No. e0341241. doi: 10.1371/journal.pone.0341241.
36. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. New York: Jon Wiley & Sons, 1984.

References (transliterated)

1. Mohamed A. G., Elsayed H. A., Mehaneq A., Aly A. H., Sabra W. Transmittance properties of one-dimensional metamaterial nanocomposite photonic crystal in GHz range.

- Metamaterial and Superconductor. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2022. Vol. 35. P. 1473 – 1482. doi: 10.1007/s10948-022-06195-8.
16. Lyubchanskii I. L., Dadoenkova N. N., Zabolotin A. E., Lee Y. P. and Rasing Th. A one-dimensional photonic crystal with a superconducting defect layer. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. Vol. 11. Article 114014. doi: 10.1088/1464-4258/11/11/114014.
17. Liu A., Gao H., Xiao Y., Zheng J., Zhang Q. Tunable narrow-and-sharp defect modes and transmission peak degeneracy in periodic superconducting photonic crystals. PLOS One. 2026. Vol.21, No. 1. Article No. e0341241. doi: 10.1371/journal.pone.0341241.
18. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. New York: Jon Wiley & Sons, 1984.

Відомості про авторів (About authors)

Хрипунов Геннадій Семенович – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: Gennadiy.Khrypunov@khpi.edu.ua

Khrypunov Gennadiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: Gennadiy.Khrypunov@khpi.edu.ua

Меріуц Андрій Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>; e-mail: Andrii.Meriuts@khpi.edu.ua

Meriuts Andrii – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Micro- and NanoElectronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-2530>; e-mail: Andrii.Meriuts@khpi.edu.ua

Шелест Тетяна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: Tetiana.Shelest@khpi.edu.ua

Shelest Tetiana – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: Tetiana.Shelest@khpi.edu.ua

Трубилін Антон Олексійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; e-mail: 8367775@ukr.net

Trubilin Anton – Master, Department of Micro- and NanoElectronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: 8367775@ukr.net

Кривоніс Світлана Станіславівна – доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1938-293X>; e-mail: Svitlana.Kryvonis@khpi.edu.ua

Kryvonis Svitlana – Associate Professor, Department of Physics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1938-293X>; e-mail: Svitlana.Kryvonis@khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хрипунов Г. С., Меріуц А. В., Шелест Т. М., Трубілін А. О., Кривоніс С. С. Динамічне керування спектральними характеристиками одновимірних фотонних кристалів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 2 (28). С. 46-53. doi: 10.20998/2413-4295.2026.02.06

Please cite this article as:

Khrypunov G., Meriuts A., Shelest T., Trubilin A., Kryvonis S. Dynamic control of spectral characteristics in one-dimensional photonic crystals. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 2(28), pp. 46–53, doi: 10.20998/2413-4295.2026.02.06.

*Надійшла (received) 15.05.2026
Прийнята (accepted) 28.05.2026
Опублікована (published) 05.06.2026*