

УДК 535.345.67

Первак Ю.О.¹, д.ф.-м.н., проф., Федоров В.В.¹,
аспірант

Просторово-спектральний розподіл електричного поля в одновимірних фотонних кристалах з трьома пів хвильовими резонаторами

Досліджено просторово-спектральний розподіл електричного поля на частотах трьох дозволених зон, що виникають в просторово-обмежених 1-D фотонних кристалах з трьома пів хвильовими дефектами. Фотонний кристал утворений шарами оксидів кремнію і титану, що чергуються. Показано, що максимальне значення електричного поля в ФК з трьома пів хвильовими дефектами завжди менше відповідного значення поля в резонаторі фільтра Фабрі-Перо, що має однакову товщину з ФК. Зближенням пів хвильових дефектів можна підвищувати концентрацію поля та керувати спектральним складом електричного поля.

Ключові слова: багатошарова тонкоплівкова структура, одновимірний фотонний кристал

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г, e-mail: yupervak@univ.kiev.ua

Yu.O. Pervak¹, Dr. Sci., V.V. Fedorov¹, post grad. stud.

Spectral-spatial distribution of electric-field in one dimensional photonic crystals with three half-wave resonators

Spectral characteristics of transmittance and spatial distribution of electric-field were investigated on frequencies of three allowed zones that arise up in spatially-limit 1-D photonic crystals with three half-wave defects of different nature. A photonic crystal consists the layers of oxides of silicon and titan that alternate. It is shown that maximal value of electric-field in a photonic crystal with three half-wave defects always less corresponding value of the field in a resonator of Fanri-Perot filter that has an identical thickness with a photonic crystal. By rapprochement half wave defects can be promoted concentration and to manage spectral composition of electric-field.

Key words: multilayer thin-film structure, one-dimensional photonic crystal

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4g, e-mail: yupervak@univ.kiev.ua

Статтю представив д.техн.н., проф. Погорілий С.Д.

Необхідність частотної селекції електромагнітного випромінювання у різноманітних телекомунікаційних системах обумовлює інтерес до багато пів хвильових інтерференційних фільтрів, аналітична теорія яких розроблена в роботі [1]. В фотоніці такі структури дістали назву одновимірних (1 - D) фотонних кристалів (ФК) з пів хвильовими дефектами [2, 3]. Наявність пів хвильових дефектів призводить до появи фотонних дозволених зон в середині забороненої зони фотонного кристалу. При певному виборі параметрів багатошарової структури можна добитися чіткого розділення цих дозволених фотонних зон [4, 5]. Положення цих дозволених фотонних зон визначається відстанню між пів хвильовими дефектами, а ширина зон товщиною ФК [6-9]. У бездефектних 1 - D фотонних кристалах на краях зони Бриллюена електричне поле концентрується

в шарах з високою діелектричною проникністю в першій фотонній дозволений зоні (нижче забороненої зони) і в шарах з низькою діелектричною проникністю в другій дозволений фотонній зоні (вище забороненої зони) [2, 3]. В двокomпонентних 1-D ФК з трьома пів хвильовими дефектами електричне поле концентрується в середині пів хвильових дефектів з меншою діелектричною проникливістю і на інтерфейсах пів хвильових дефектів з більшою діелектричною проникливістю [6-9].

Мета даної роботи – встановлення впливу взаємного розташування пів хвильових дефектів на розподіл електричного поля в ФК і можливість керування цим розподілом. Методика розрахунку розподілу електричного поля детально описана в попередніх роботах [6-9]. В якості модельного об'єкту вибрано структуру 1D-ФК, які склада-

ються з 47 шарів оксидів титану (TiO_2) і кремнію (SiO_2). Перший і останній шари виготовлені з TiO_2 , а пів хвильові шари з SiO_2 . В випадку, коли пів хвильові резонатори мають низьку діелектричну проникливість, загальна формула структур записується як $S(\text{HL})^{l+1}[(\text{LH})^{k+1}\text{L}]^2(\text{HL})^{l+1}$, де H і L чверть хвильові на довжині хвилі $\lambda_0 = 550$ нм шари із матеріалів з високим (TiO_2) і низьким (SiO_2) показниками заломлення, відповідно. Для того, щоб кількість шарів N дорівнювала 47 сума $(l+k)$ має дорівнювати 10, оскільки $N = 4l + 4k + 7$.

Збільшення параметру l від 0 до 2 відповідає зменшенню відстані між пів хвильовими резонаторами від $5,25\lambda_0$ до $4,25\lambda_0$. При цьому фотонна заборонена зона (ФЗЗ) практично не змінюється, а єдина дозволена фотонна зона в ФЗЗ, тобто смуга прозорості з максимальним пропусканням на довжині хвилі $\lambda_0 = 550$ нм, суттєво розширюється. При відстані між резонаторами більшій $4\lambda_0$ взаємодія між резонаторами дуже слабка і роль бічних пів хвильових резонаторів зводиться до зменшення коефіцієнта відбивання дзеркал центрального пів хвильового резонатора. За таких умов розподіл електричного поля в таких структурах буде близьким до розподілу поля в звичайному інтерферометрі Фабрі-Перо, кожне з дзеркал якого складається з меншої кількості шарів, ніж структури з трьома резонаторами. Щоб отримати структуру такого еквівалентного інтерферометра Фабрі-Перо, достатньо від структури з трьома резонаторами відняти бічні пів хвильові шари і шари, що симетрично їх оточують. На рис.1 показано спектрально-просторовий розподіл електричного поля ($|E|^2$) в досліджуваних 47-шарових структурах 1D-ФК. В роботі електричне поле вимірюється в відносних одиницях (процентах). Якщо електричне поле ($|E|^2$) хвилі, що падає, прийняти рівним 100%, то при коефіцієнті відбивання 1, електричне поле на вхідній поверхні складе 400%. Реально електричне поле на вхідній поверхні завжди менше 400%. Спектрально-просторовий розподіл показаний для спектрального діапазону фотонної забороненої зони, який містить дозволений фотонні зони.

Поки відстань між серединами бічних і центрального пів хвильових резонаторів більша $4,25\lambda_0$ спектрально-просторовий і просторовий розподіли електричного поля в середовищі фотонного кристалу мають вигляд, характерний для інтерферометра Фабрі-Перо. При цьому роль бічних резонаторів зводиться до зменшення коефіцієнта відбивання поверхонь центрального резонатору, внаслідок чого падає його добротність і, відповідно, електричне поле в ньому. При змен-

шенні відстані між резонаторами від $5,75\lambda_0$ до $4,75\lambda_0$ електричне поле, що концентрується в центральному резонаторі, зменшується майже в 35 разів (від 700000% до 20000%). Чим більша відстань між резонаторами, тим вища спектральна локалізація поля. В ФЗЗ спостерігається усього одна дозволена фотонна зона, яка поступово розширюється при зменшенні відстані між резонаторами. При цьому концентрація електричного поля суттєво зменшується.

При відстані між резонаторами $4,25\lambda_0$ електричне поле зазнає як просторової, так і спектральної делокалізації, відбувається частотна децентрація поля. Поле на довжині хвилі λ_0 стає меншим, ніж на довжинах хвиль бічних смуг прозорості. При подальшому зближенні резонаторів електричне поле розподіляється по усім трьом резонаторам таким чином, що на довжині хвилі λ_0 воно практично відсутнє в центральному резонаторі, в той час як на довжинах хвиль бічних смуг прозорості досягаються максимальні значення поля. Величина поля на довжині хвилі λ_0 в бічних резонаторах вдвічі менша максимального поля в центральному резонаторі на довжинах хвиль бічних смуг прозорості. При відстані між резонаторами $1,25\lambda_0$ усі відповідні максимальні значення поля на усіх довжинах хвиль смуг прозорості майже однакові, а при подальшому зближенні резонаторів електричне поле на довжині хвилі λ_0 в бічних резонаторах більше, ніж на порядок перевищує максимальне поле в центральному резонаторі на довжинах хвиль бічних смуг прозорості. Відповідні зміни величини електричного поля при зміні відстані між резонаторами показано на рис.2, де значення на довжині хвилі $\lambda_0 = \lambda_c$ центральної смуги прозорості відповідають максимальному полю в бічних резонаторах, а на довжинах хвиль $\lambda_{кв}$ і $\lambda_{д}$ бічних смуг прозорості – максимальному полю в центральному резонаторі. В усіх випадках електричне поле концентрується в пів хвильових резонаторах і досягає максимального значення в середині резонатору.

Якщо в структурі ФК замінити усі шари H на L і навпаки, тобто здійснити перехід від структури $S(\text{HL})^{l+1}[(\text{LH})^{k+1}\text{L}]^2(\text{HL})^{l+1}$ до структури $S(\text{LH})^{l+1}[(\text{HL})^{k+1}\text{H}]^2(\text{LH})^{l+1}$, то отримаємо структуру, в якій усі пів хвильові резонатори матимуть високу діелектричну проникливість. Для структур $S(\text{LH})^{l+1}[(\text{HL})^{k+1}\text{H}]^2(\text{LH})^{l+1}$ характерні властивості спектрально-просторового і просторового розподілу електричного поля, як і для структур $S(\text{HL})^{l+1}[(\text{LH})^{k+1}\text{L}]^2(\text{HL})^{l+1}$, з тією різницею, що в

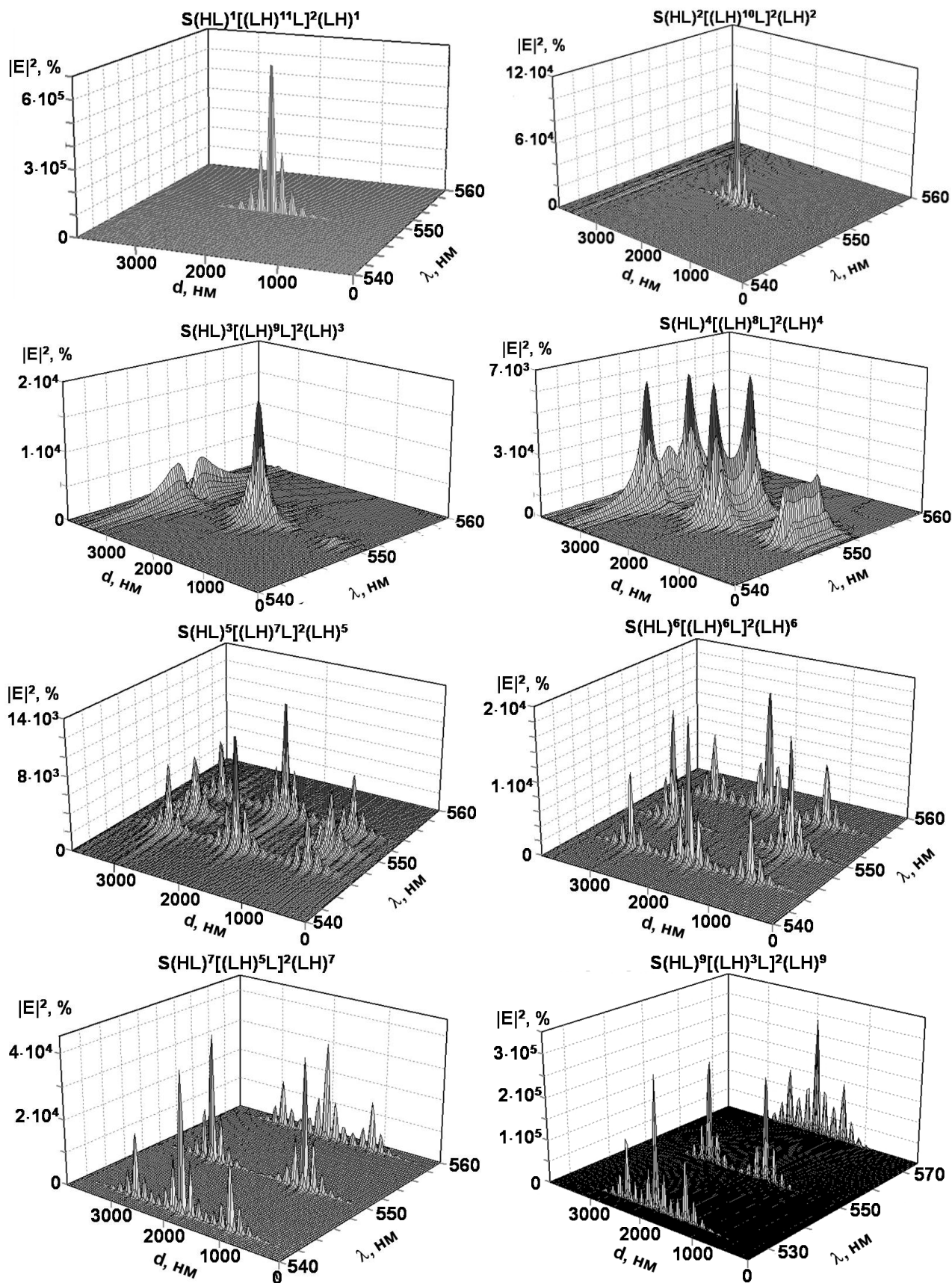


Рис.1. Просторово-спектральний розподіл електричного поля в 1D-ФК-А2 (структурна формула $S(HL)^{l+1}[(LH)^{k+1}L]^2(HL)^{l+1}$).

середині пів хвильових резонаторів поле буде відсутнім, а на інтерфейсах резонаторів досягатиме максимальних значень.

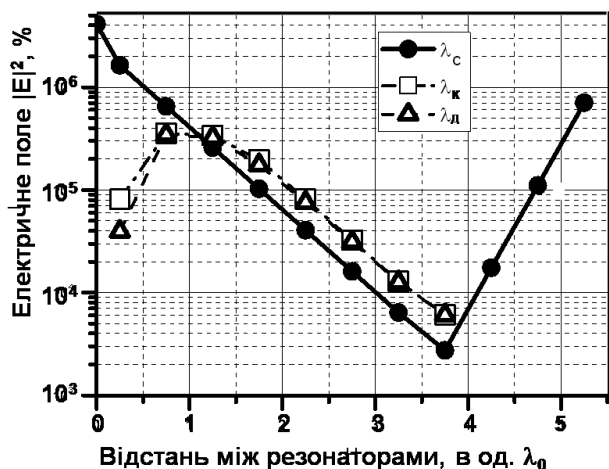


Рис.2. Максимальне значення електричного поля ($|E|^2$) в структурах 1D-ФК-А2 з 47 шарів на довжинах хвиль смуг прозорості λ_k , λ_c і λ_d .

Тому для спектрально-просторового розподілу поля структур $S(LH)^{l+1}[(HL)^{k+1}H]^2(LH)^{l+1}$ притаманна роздвоєність піків максимального поля (рис.3). Правило локалізації максимального електричного поля на інтерфейсах пів хвильових резонаторів в незначній мірі порушується лише в випадку, коли резонатори з високою діелектрич-

ною проникливістю розділені усього одним шаром з низькою діелектричною проникливістю.

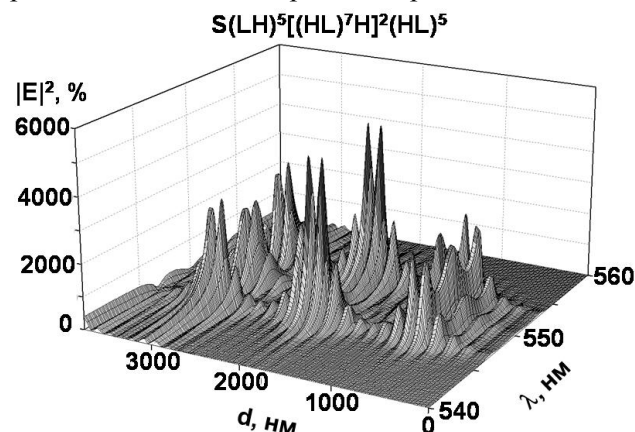


Рис.3. Просторово-спектральний розподіл електричного поля в ФК $S(LH)^5[(HL)^7H]^2(LHL)^5$.

В досліджуваних структурах електричне поле може перевищувати електричне поле хвилі, що падає на структуру, в сотні разів. Максимальне значення електричного поля в ФК з трьома пів хвильовими дефектами завжди менше відповідного значення поля в резонаторі фільтра Фабрі-Перо, що має однакову товщину з ФК. Зближенням пів хвильових дефектів можна підвищувати концентрацію поля керувати спектральним складом електричного поля.

Список використаних джерел

1. Markov Yu.N. Synthesis of contrast band interference filters. The complicated periodic systems // Opt.&Spectroscopy. – 19837. – Vol.543. – N1. – P.173-178. (in Russian).
2. Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals. - Princeton: Princeton University Press, 1995. – 137p.
3. Pervak V.Yu., Shpak A.P., Pervak Yu.O., Kunitska L.Yu. Physics of photonic crystals. – Kyiv, Akademperiodika. – 2007. - 304p.(in Ukrainian).
4. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. Spectral properties of multilayer structures with three half-wave resonators // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics. – 2011. - №1. – P. 259-262.(in Ukrainian).
5. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. Features of spectral characteristics of multilayer structures with three half-wave resonators // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics.– 2011. - №2. – P. 201-204.(in Ukrainian).
6. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. The angular dependences of spectral transmittance for multilayer

- structures with three half-wave resonators // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics. – 2011. - №4. – P. 267-270.(in Ukrainian).
7. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. Influence of inconsistency of resonators on spectral descriptions and spatial distribution of electric-field in 1-D photonic with three half-wave resonators // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics. – 2012. - №1. – P. 295-298.(in Ukrainian).
8. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. Features of electric-field distribution in 1-D photonic with three half-wave resonators of different nature // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ser.: Phys.&Mathematics. – 2012. - №2. – P. 287-290.(in Ukrainian).
9. Pervak Yu.O., Fedorov V.V. Features of electric-field distribution in 1 - D photonic crystals with three half-wave defects // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2012. – Vol.10. – №3. – P.467-476.(in Ukrainian).

Надійшла до редколегії 29.03.2013