

ОПТИЧНИЙ СЕНСОР НА ДІЕЛЕКТРИЧНО-НЕОДНОРІДНІЙ ПЛІВЦІ

**В.А. Павлиш, Р.О. Корж, Л.І. Закалик,
С.Ю. Лебідь***

Національний університет
«Львівська політехніка»
м. Львів, вул. С. Бандери, 12
E-mail: luba.zakalyk@gmail.com
*Львівська філія Європейського
університету
м. Львів, вул. Кушевича, 5

В статті розглядається можливість створення надчутливого оптичного сенсора на 1D фотонно-кристалічній структурі. Приведено розрахунок залежності оптичних характеристик від механічних навантажень та температури. Запропонований оптичний сенсор стане основою інформаційних систем на оптичних та фотонно-кристалічних волокнах.

Вступ. Діелектрично-неоднорідні плівки, які мають одновимірну (1D) фотонно-кристалічну структуру, можуть не тільки керувати оптичним сигналом, але під дією механічних навантажень і температури змінювати свої оптичні властивості, виявляти цікаві нелінійні властивості при внесенні в їх структуру дефектів. Використання цих властивостей відкриває для них нові області застосування в оптоелектроніці та в інших областях.

За останні роки спостерігається великий інтерес до оптичних сенсорів тиску, які можна би було використовувати не тільки в радіоелектроніці чи оптоелектроніці, а й в будь-якій області, де необхідно прогнозувати руйнування під дією механічних навантажень чи температури. Також був розроблений датчик заломлення як 1D резонатор вбудований в мікрофлюїдний канал, куди вводилися водні розчини. Його чутливість була визначена – 480 нм/RIU і мінімальна різниця $\Delta n = 0,002$ [1]. Було зроблено детальне дослідження на чутливість 1D фотонного кристала (ФК) і 2D ФК датчиків сполучених резонаторів зі зміною параметрів чутливого шару – товщини та показника заломлення. Хоча показник заломлення і товщина взаємопов'язані, вони мають значний вплив на відгук пристрою. В 1D ФК зсув звичайного піку

трансмісії відбувався через поверхневу зміну товщини і показника заломлення, а в 2D ФК зсув в спектрі трансмісії відбувався через поверхневі зміни. Тут аналіз чутливості до змін товщини і показника заломлення на цих пристроях було зроблено для чотирьох випадків; випадок 1: зміна в товщині від 2 до 10 нм; випадок 2: зміна в товщині від 75 – 175 нм; випадок 3: зміна показника заломлення в тонкій плівці 6 нм на поверхні і випадок 4: зміна показника заломлення товстої плівки 100 нм на поверхні датчика. Чутливість у зв'язку зі зміною товщини (St) 1D ФК і 2D ФК були розраховані з нахилу чутливості кривих і виявилися рівними (для $n = 1,4$) 1.423 нм/нм і 2.285 нм/нм для випадку 1 і 0.455 нм/нм і 0.801 нм/нм для випадку 2. Чутливість згідно змін в показнику заломлення (Sr) 1D ФК і 2D ФК резонаторів була отримана з піку трансмісії і зсуву заглибини пов'язаних зі зміною показника заломлення від 1 до 2. Sr для 1D ФК і 2D ФК виявилися 70 нм/RIU і 103 нм/RIU для випадку 3 та 143 нм /RIU і 213 нм/RIU для випадку 4. Результати були отримані на моделюванні методом кінцевих різниць з роздільною здатністю в часі FDTD [2].

Оптичні методи являють собою один з найбільш популярних методів для проведення чутливого і чистого виявлення біомолекул. У цілому основні переваги оптичних методів над аналогічними механічними або електричними методами [3], є: відносна легкість, з якою пристрой можна виготовити і широкий спектр рідин і середовищ, в яких їх можна використати (наприклад, газ, вода і сировата). Хоча й було розроблено безліч різних архітектур (в тому числі інтерферометричні; резонансні; поверхневого плазмового резонансу (SPR) і фотонно-кристалічні датчики [4]), майже в усіх випадках детекція заснована на вимірюванні зміни показника заломлення. Проте, з усіх різних архітектур планарні фотонно-кристалічні датчики особливо цікаві не тому, що вони більш чутливі до об'ємних властивостей (наприклад, показник заломлення), але скоріше через їхню чітку локалізацію вимірювання. Висока добробутність 1D і 2D фотонних датчиків підсилює цей ефект, зменшуючи досліджене місце до розміру оптичного резонатора, який може бути порядку λ^3 .

Основна частина. До діелектрично-неоднорідних структур відносяться фотонно-кристалічні волокна. Їх особливістю є те, що їх можна використати, як оптичні хвилеводи і на їх основі можна створити цілий ряд оптичних пристрій нового покоління, в тому числі надчутливі оптичні сенсори фізичних величин. При дослідженні оптичних властивостей двовимірних (2D) фотонно-кристалічних структур було виявлено, що при навантаженні, значення діелектричних сталіх межуючих областей змінюються [5]. Дослідження проводилися в довгохвильовій області на 2D фотонних кристалах з трикутною структурою без дефектів і з дефектами. Збільшення навантаження приводить до ще більшої зміни діелектричної сталої твердої частини, але найкраще це проявляється при співвідношенні в розмірах $R > 0,4$ а, де R – розмір твердої частини; а – розмір пустоти. При введенні дефектів в структуру зміни вже будуть наявні при $R = 0,4$ а.

Зміна перерозподілу діелектричних сталіх під дією механічних навантажень і температури призводить до зміни різниці коефіцієнтів заломлення. Якщо пустоти не заповнені іншою речовиною, тоді буде змінюватися коефіцієнт заломлення твердої частини, а це означає, що буде змінюватися довжина хвилі оптичного сигналу.

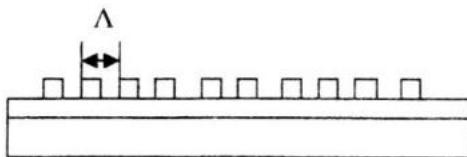


Рис. 1. Структура зразка

Нами були проведені дослідження 1D фотонно-кристалічної структури показаної на рис. 1. На кремнієву основу, покриту окисом, нанесена структура, в якій періодично змінюється діелектрична стала. 1D періодична структура з періодом Λ сформована на легованій плівці $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$. Легований $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ має нелінійний коефіцієнт заломлення.

$$\Delta\lambda = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{e\phi}}{dl} + n_{e\phi} \frac{d\Lambda}{dl} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{dn_{e\phi}}{dT} + n_{e\phi} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T, \quad (3)$$

де Λ – період.

Якщо використати методику, приведену в [6], і провести дослідження для 1D фотонних кристалів, то і тут механічні навантаження призводять до різниці в діелектричних сталіх, а значить і до зміни показників заломлення. Ця структура реагує на механічні навантаження незалежно від співвідношення R до а, якщо вважати, що R це розмір твердої частини, а – пустоти. Оскільки дослідження проводилися на нелегованій і легованій діелектрично-неоднорідній плівці більш істотні зміни виникають в легованій плівці з високою нелінійністю. Отже, з цього можна зробити висновок, що 1D фотонні кристали є чутливими елементами до механічних навантажень і температури. Це можна пояснити тим, що при навантаженні відбудеться зміни в структурі фотонного кристалу внаслідок послаблення зв'язків між атомами, що призводить до розширення чи ущільнення 1D фотонного кристалу.

При проходженні оптичного сигналу через діелектрично-неоднорідну плівку ефективний коефіцієнт заломлення буде залежним від інтенсивності сигналу:

$$n_{e\phi} = n_{e\phi 0}(x) + n_2 I, \quad (1)$$

$$n_{e\phi 0}(x) = n_0 + \Delta n \sin(kx), \quad (2)$$

де $n_{e\phi 0}(x)$ – ефективний коефіцієнт заломлення при низькій інтенсивності світла; n_0 – лінійний коефіцієнт заломлення матеріалу; Δn – зміна коефіцієнту заломлення; $k = \frac{2\pi}{\Lambda}$; n_2 – нелінійний коефіцієнт заломлення у випадку, коли наноструктурована плівка сформована з нелінійного матеріалу. Це необхідно врахувати, оскільки, якщо інтенсивність сигналу буде впливати на коефіцієнт заломлення, тоді різниця діелектричних сталіх буде також змінюватися. Отже, довжина хвилі оптичного сигналу буде функцією періоду структури і ефективного коефіцієнта заломлення. Внаслідок цього вона буде змінюватися під дією механічних навантажень і температури за формулою

цією формулою

Зміна довжини хвилі в залежності від механічних навантажень, враховуючи, що хвиля розповсюджується вздовж осі x , буде

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - p_1)\varepsilon_x, \quad (4)$$

де ε_x – деформація вздовж фотонного кристала. Оптичний коефіцієнт Покеля

$$p_1 = \left(\frac{n_{e\phi}}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (5)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Температурну залежність довжини хвилі фотонного кристала можна описати як

$$W = \frac{E}{2} (1 - \nu^2) [\varepsilon_x^2 (1 + 2\nu)] + \frac{E\varepsilon_x^2}{4} (1 + \nu). \quad (8)$$

Розрахована чутливість до змін температури 1D фотонно-кристалічної структури сформованої на CdS_xSe_{1-x} плівці з піком довжини хвилі 530 нм – 0,003 нм/⁰C.

Вважаємо, що гістерезисний ефект [6] виявлений в 1D фотонно-кристалічній структурі з високою нелінійністю, яка була створена легуванням CdS_xSe_{1-x}, виник внаслідок змін енергії взаємодії між атомами, що привело до напруженого стану в структурі. Цим можна пояснити більшу чутливість до механічних навантажень і температури легованої діелектрично-неоднорідної структури. Якщо створити сенсор на такій наноструктурованій легованій плівці він буде мати високу чутливість до змін фізичних величин. Деформації, індуковані в наноструктури носять квантовий характер [8] і цьому в останні роки приділяється особлива увага.

Висновок. 1D фотонно-кристалічні структури змінюють свої характеристики під впливом зовнішнього середовища. Розміри розглянутих структур сприяють унікальним точковим вимірюванням з високим ступенем локалізації. Теоретичні розрахунки не складні проте цікаво було б отримати експериментальні дані застосування цього типу планарних сенсорів.

$$\Delta\lambda = \lambda \left[\alpha + \left(\frac{1}{n_{e\phi}} \right) \left(\frac{dn_{e\phi}}{dT} \right) \right], \quad (6)$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення твердої частини фотонного кристала.

Величину деформацій можна порахувати на атомарному рівні [7] через механічний потенціал Кітінга, який враховує віддалю між атомами

$$W_i = \alpha \sum (r_{ij}^2 - r_{0ij}^2)^2, \quad (7)$$

де r_{ij} – віддалю між атомами в напруженому стані; r_{0ij} – віддалю між атомами в ненапруженому стані або

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nunes P.S., et al. Refractive Index Sensor Based on a 1D Photonic Crystal in a Microfluidic Channel // Sensors. – 2010. – 10(3). – pp. 2348 – 2358.
2. Mudraboyina A.K., et al., Sensitivity analysis of 1D and 2D photonic crystals sensors based on change of thickness and refractive index in material // Proc. SPIE 8007. – 2011. – pp. 218 – 227.
3. Erickson D., et al., Nanobiosensors: optofluidic, electrical and mechanical approaches to biomolecular detection at the nanoscale // Microfluidics and Nanofluidics 4. – 2008. – pp. 33 – 52.
4. Skivesen N., A. et al., Photonic-crystal waveguide biosensor // Opt. Express 15. – 2007. – pp. 3169 – 3176.
5. Kee C., et al., Tuning of anisotropic optical properties of two-dimensional dielectric photonic crystals // Physica. – B338. – 2003. – pp. 153 – 158.
6. Chen M., et al., Optical bistable device based on one-dimensional photonic crystal waveguide // Optics Communications. – 255. – 2005. – pp. 46 – 50.
7. Faux D., et al., Calculation of strain relaxation in strained-layer structures // Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. 2. – 1994. – pp. 9 – 20.