

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 539.293.011

В.А. Павлиш, Л.І. Закалик, Р.О. Корж
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних засобів і інформаційно-комп’ютерних технологій

НЕЛІНІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ: СИМУЛЯЦІЙНІ МЕТОДИ ПЕРЕДБАЧЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ

© Павлиш В.А., Закалик Л.І., Корж Р.О., 2006

Проаналізовано нелінійні властивості фотонних кристалів залежно від вибору матеріалу та методів їх отримання, а також фактори, які призводять до погіршення коефіцієнта нелінійності під час виготовлення та їхньої реалізації в комунікаційних системах.

Analysis of non-linear properties of photon crystals depending on material choice and fabrication methods is conducted in current work. Factors leading to coefficient of non-linearity decrease during their fabrication and during their application in communication systems are analysed as well.

Нанонаука і нанотехнологія на сьогодні пропонують ефективні волоконні структури на фотонних кристалах. Фотонні кристали – це новий клас оптичного волокна, який з’явився в останні роки і успішно на сьогодні реалізується. Особливістю цих волокон є їх діркова структура і наявність частотної щілини в спектральній характеристиці. Така мікроструктура волокна, поперечний переріз якої схематично показаний на рис. 1, має повітряні дірки, що розміщені вздовж волокна і їх можна використовувати як хвилеводи [1, 2, 3]. Оскільки волокно неоднорідне, у ньому будуть два різні механізми поширення сигналу – через дірки і матеріал, який з ними межує. Якщо посередині волокна має тверду серцевину, а дірки її оточують, то світло спрямовуватиметься до серцевини, оскільки вона має більший коефіцієнт заломлення. Враховуючи таку мікроструктуру, волокно можна виготовляти в єдиному технологічному циклі і з одного матеріалу. Для виготовлення таких волокон пропонуються кварц, халькогенідне скло, напівпровідники та полімери. Ще однією особливістю цих волокон є гексагональне розміщення дірок, які можуть мати розміри від одиниць до сотень нанометрів залежно від методу виготовлення.

На сьогодні достатньо добре досліджені і запропоновані методи виготовлення 1Д, 2Д, 3Д фотонних кристалів і фотонно-кристалічних волокон, в яких чітко проявляються нелінійні ефекти [4, 5, 6] і які є перспективними для створення пристроїв оптичної обробки сигналів, включаючи оптичну регенерацію даних, конверсію довжини хвилі, оптичне демультимплексування і підсилення Раман-ефекту для оптичних комунікаційних систем високої ємності. Фотонно-кристалічні волокна мають високий рівень нелінійності по довжині, що дає можливість створити нелінійні оптичні пристрої, які будуть працювати на нижчих енергетичних рівнях, ніж пристрої на звичайних оптичних волокнах і що значно зменшує споживання енергії цими елементами. Перші пропозиції застосування фотонно-кристалічних волокон для виконання функцій, які вимагаються для телекомунікації, були продемонстровані в 2001 році [7], і які мають відношення до 2R-оптичної

регенерації і оптичної порогової обробки, що значно розширило спектр імпульсів при однорідно-фазовій модуляції.

Оцінити нелінійність оптичного волокна можна за формулою

$$\gamma = 2\pi n_1 \lambda S_{\text{ефк}}, \quad (1)$$

де n_1 – коефіцієнт заломлення матеріалу, λ – довжина хвилі, $S_{\text{ефк}}$ – ефективна площа поперечного перерізу. З цього погляду із діелектричних матеріалів найкращу ефективну нелінійність по довжині мають халькогенідні стекла при довжині хвилі 1550 нм і $n_1 = 2 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{Вт}$, що в 100 разів більша, ніж має кварц, а фотонно-кристалічні кварцеві волокна мають в 50 разів більшу нелінійність, ніж звичайні. Фотонно-кристалічні волокна на основі кварцевого чи халькогенідного скла є привабливими для створення нелінійних пристроїв, але їх застосування обмежується виготовленням одномодових і низьковтратних твердих волокон. Для формування фотонно-кристалічних волокон на основі кварцу чи халькогенідного скла використовується sol-gel метод.

На сьогодні пропонуються різні методи формування фотонних кристалів. Зокрема, 1Д фотонні кристали у вигляді багатошарової структури з використанням фулеренів C_{60} чи C_{70} , які формують шари в переміжку з плівками AlN, який має $\epsilon = 1$. Себто, використовують матеріали з різними діелектричними сталими і різної товщини. Але таким методом отримані 1Д фотонні кристали мають не повну частотну щілину в спектральній характеристиці [8]. Для отримання 2Д і 3Д фотонних кристалів запропоновані методи формування напівпровідникових плівок молекулярно-променевою епітаксією з покриттям їх діелектричними плівками, які використовуються для маскування поверхні при подальшому використанні фотолітографії чи голографії [9]. Для нанесення діелектричних плівок використовували метод хімічного вакуумного осадження. Фотонні кристали 2Д і 3Д мають повноцінну частотну щілину в спектральній характеристиці, що значно розширяє сферу їх застосування, зокрема, для створення оптоелектронних пристроїв і хвилеводів [10, 11]. Але під час формування цих структур пошкоджується поверхня напівпровідникових плівок і це спричиняє погіршення оптичних властивостей фотонних кристалів. Крім цього цим методом неможливо отримати фотонно-кристалічні волокна.

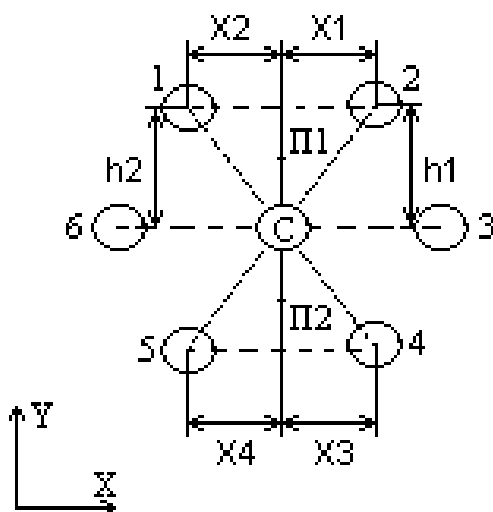
Кращі оптичні характеристики були отримані на основі двошарової структури GaAs-AlGaAs. На підкладку GaAs методом селективної метал-органічної вакуумної фазової епітаксії наносили плівку AlGaAs [12]. Цим методом отримані високоякісні 2Д фотонні кристали, але їх формування займає багато часу. Час виготовлення структури можна зменшити, якщо використати замість pixel – by – pixel експозиції дефокусовану single – pixel експозицію [13], що скорочує час експозиції в 5–10 разів і значно зменшує період розміщення дірок.

На напівпровідниковій основі можна отримати досить високоякісні фотонні кристали з повноцінною щілиною в спектральній характеристиці, але обмеженої товщини і протягом тривалого часу. Ці методи досить дорогі, такі як молекулярно-променева епітаксія, сухе травлення, електронно-променева літографія тощо.

В останніх роботах за 2001–2005 рр. запропоновано значно дешевший і з значно меншими затратами часу на проведення технологічного процесу метод для отримання фотонних кристалів і фотонно-кристалічних волокон. Перші фотонно-кристалічні волокна були створені з використанням скла. На сьогодні розроблено і досліджено sol-gel методи з наступною фільтрацією через шаблон, також виготовленого sol-gel методом, що дало досить добрі результати. Вперше sol-gel метод, крім скла і кераміки, був запропонований для отримання 2Д фотонно-кристалічної структури з двоокису титану. У [14] пропонується для отримання 2Д фотонних кристалів і фотонно-кристалічних волокон з двоокису титану sol-gel метод з наступною фільтрацією через шаблон. Фільтрацію проводили між сферами шаблону, виготовленого з іншого матеріалу. Після закінчення процесу шаблон усувається хімічним травленням з наступним термовідпалом. Отримані

таким методом пористі структури мали високий коефіцієнт заломлення і мінімальне поглинання у діапазоні видимої довжини хвилі.

Ця технологія була використана [15] і удосконалена для отримання фотонних кристалів двоокису титану з використанням оксидо-олов'яно-індієвого шаблону, що дало можливість зменшити діаметр дірок в структурі. Використання шаблонів з різних колоїдних речовин дає структури з різними періодами і діаметрами дірок, що створює можливість змінювати ефективну площу поперечного перерізу і коефіцієнт нелінійності. Цим методом можна отримати поширену низку фотонних кристалів від напівпровідників до полімерів [16]. Ці методи є альтернативою досить дорогим методам, які використовували раніше. Але, при всіх перевагах цього методу, виникає необхідність прогнозування релаксаційних напружень, які існують при виготовленні пористих фотонних кристалів внаслідок недотримання або найменшого відхилення від оптимальних технологічних режимів, оскільки нерівномірність поверхні плівок фільтруючих матеріалів, що формують верх шаблону, є найнеконтрольованішою. Це спричиняє виникнення внутрішніх напружень у волокні при проведенні сушіння нагріванням і внаслідок цього появляються тріщини в середині структури [14]. Поява тріщин в структурі є причиною значного відбиття і дифузії світла, що значно погіршує оптичні властивості волокна. Це призводить також до зміни ефективної площі поперечного перерізу, а значить і до зміни віддалі між дірками і порушення періодичності структури. Оскільки коефіцієнт нелінійності є функцією площі поперечного перерізу, то зміниться коефіцієнт нелінійності волокна. Схематично поперечний переріз структури з твердою серцевиною показаний на рисунку.



Розміщення атомів стосовно серцевини волокна

Оцінити величину релаксаційних напружень на атомному рівні можна методом термодинамічного аналізу або методом комп'ютерної симуляції [17]. Розглянемо фрагмент фотонно-кристалічного волокна з одним рядом дірок біля серцевини. Метод термодинамічного аналізу базується на розв'язанні рівняння згідно з теорією Тимошенко С.П. :

$$\partial^4 \varphi / \partial x^4 + 2\partial^4 \varphi / \partial x^2 \partial y^2 + \partial^4 \varphi / \partial y^4 = 0, \quad (2)$$

де компоненти напружень

$$\sigma_{xx} = \partial^2 \varphi / \partial y^2; \quad \sigma_{yy} = \partial^2 \varphi / \partial x^2; \quad \sigma_{xy} = -\partial^2 \varphi / \partial x \partial y. \quad (3)$$

Для розв'язання цього рівняння можна використати метод Фаукса і Гайгна, але в цьому випадку дуже складно передбачити товщину шару, в якому виникають релаксаційні напруження і результат буде не достовірний. Тому доцільніше використати метод атомної симуляції.

Розміри X та h на рисунку вказують на розміщення атомів стосовно серцевини перед виникненням напружень у структурі. Виділимо дві позиційні точки Π_1 і Π_2 . За допомогою комп'ютерної симуляції визначимося з компонентами напружень ε_{xx} , ε_{yy} і ε_{xy} кожного з шести атомів щодо ядра визначенням позиційних векторів U та V стосовно осей x та y відповідно.

Для першого атома позиційні вектори: $U_1 = -X_2(1 + \varepsilon_{xx}) + 1/2h_2\varepsilon_{xy}$, $V_1 = h_2(1 + \varepsilon_{yy}) - 1/2X_2\varepsilon_{xy}$.

Для другого: $U_2 = X_1(1 + \varepsilon_{xx}) + 1/2h_1\varepsilon_{xy}$, $V_2 = h_1(1 + \varepsilon_{yy}) + 1/2X_1\varepsilon_{xy}$.

Для третього: $U_3 = X_3(1 + \varepsilon_{xx})$, $V_3 = 1/2X_3\varepsilon_{xy}$.

Для четвертого: $U_4 = X_1(1 + \varepsilon_{xx}) - 1/2h_1\varepsilon_{xy}$, $V_4 = -h_1(1 + \varepsilon_{yy}) + 1/2X_1\varepsilon_{xy}$.

Для п'ятого: $U_5 = -X_2(1 + \varepsilon_{xx}) - 1/2h_2\varepsilon_{xy}$, $V_5 = -h_2(1 + \varepsilon_{yy}) - 1/2X_2\varepsilon_{xy}$.

Для шостого: $U_6 = -X_4(1 + \varepsilon_{xx})$, $V_6 = -1/2X_4\varepsilon_{xy}$.

Враховуючи позиційні вектори між першим і другим атомами щодо серцевини, компоненти напружень будуть

$$\varepsilon_{xx} = (h_2U_2 - h_1U_1) / (h_1X_2 + h_2X_1) - 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{yy} = (X_1V_1 + X_2V_2) / (h_1X_2 + h_2X_1) - 1 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xy}^{(1)} = 2(X_2U_2 + X_1U_1) / (h_1X_2 + h_2X_1) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xy}^{(2)} = 2(h_2V_2 - h_1V_1) / (h_1X_2 + h_2X_1) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{xy} = (\varepsilon_{xy}^{(1)} + \varepsilon_{xy}^{(2)}) / 2 \quad (8)$$

Релаксаційні напруження σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} визначимо з рівнянь

$$\varepsilon_{xx} = (\sigma_{xx} + \nu\sigma_{yy})/E, \quad \varepsilon_{yy} = (\sigma_{yy} + \nu\sigma_{xx})/E, \quad \varepsilon_{xy} = \sigma_{xy}/G \quad (9)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль Юнга, G – модуль зсуву.

Розрахунок релаксаційних напружень, проведений нами за цією методикою, дає результати, близькі до експериментальних [14].

Релаксаційні напруження можна також визначити термодинамічним методом, але метод комп'ютерної симуляції точніший для наноструктур. Передбачення релаксаційних напружень, які спричиняють зменшення коефіцієнта нелінійності і погіршення оптичних властивостей волокна, створює можливість контролю і оптимізації технологічних режимів при виготовленні фотонно-кристалічних волокон sol-gel методом.

1. T.Okuno, M.Onishi, T.Kashiwada, S.Ishikawa, M.Nishimura, //IEEE J. Sel.Top.Quant.Electron. – 1999 – №5. – С.1385–1391. 2. K.Cho, T.Hirai Propagating mode in the photonic gap of 1D resonant Bragg reflector // Journal of Luminescence. – 2002 – №100 – С.283–289. 3. R.Cho et al //Current Physics. – 2003. – С.120–135. 4. T.Monro, D.Richardson Holey optical fibres // C.R.Physique. – 2003 – №4. – С.175–186. 5. N.Broderick, T.Monro, P.Bennet // Opt.Lett. – 1999. – №24. - С.1305–1397. 6. T.Monro, P.Bennet, N.Broderick // Opt.Lett –2000 – №25 –с.205-208. 7. P.Petropoulos, T.Monro, W.Belardi, K.Furusawa, J.Lee, D.Richardson // Opt. Lett. – 2001 – №26. – С.1233–1235. 8. X. Bingshe, H.Deide, L.Jian // Solid State Communications – 2005. – № 133. – С.353–356. 9. O. Hanaizumi et.al Fabrication of structures with III-V compound semiconductors embedded into 3D photonic crystals // Thin Solid Films. – 2003. – №426. – С.172–177. 10. J.Nilson, R.Selvas, W.Belardi, J.Lee, Z.Yusoff // Optical

Fiber Communications. – 2002. 11. M.Ferman, A.Galvanauskas, M.Stock, K.Wong, D.Harter, L. Goldberg // *Opt. Lett.* – 1999. – №24. – C.1428–1430. 12. J. Takeda M.Inari, J.Motohiza, T.Fukui *Fabrication and characterization of GaAs 2D air-hole arrays on GaAs (111)A substrates using selective-area MOVPE* // *Journal of Crystal Growth.* –2005. 13. T.Stomeo, A.Passaseo, R.Cingolani // *Supperlattices and Microstructures.* – 2004. – №36. – C.265–270. 14. S.Kuai,,X.Hu, V.Truong, *Synthesis of thin film titania photonic crystals through a dip-infiltrating sol-gel process* // *Journal of Crystal Growth.* – 2003. – №259. – C.404–410. 15. S. Matsushita, N.Fukuda, M.Shimomura // *Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng.Aspects* – 2004. 16.F.Mesequer et al *Synthesis of inverse opals* // *Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2002. – №202. – C.281–290. 17. D.Faux, G. Jones, E. O Reilly *Calculation of strain relaxation in strained-layer structures* // *Modelling simul. Mater. Sci. Eng.* – 1994. – №2. – C.9–20.