

Studio di un filtro notch a cristallo fotonico mediante il metodo degli elementi finiti

A. Cucinotta, S. Selleri

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Università Parma, Parco Area delle Scienze 181A, 43100 Parma, Italy.
tel: +390521-905765, Fax: +390521-905758, Email: stefano.selleri@unipr.it*

L. Vincetti, M. Zoboli

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Università di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese, 41100 Modena, Italy.
tel: +39059-2056163, Fax: +39059-2056126, Email: maurizio.zoboli@unimo.it*

Abstract: *A photonic crystal based notch filter is analyzed by means of Finite Element Method both in time and in frequency domain. Simulation results show that the filter exhibits a notch with very narrow bandwidth and its position can be easily tuned with high accuracy over a wide range of wavelengths.*

Introduzione

I cristalli fotonici si stanno dimostrando un'interessante tecnologia in grado di soddisfare le esigenze dei moderni sistemi di comunicazione ottici, i quali richiedono dispositivi sempre più compatti ed in grado di svolgere funzioni sempre più complesse. Componenti quali divisori di potenza, guide curve con raggio confrontabile con la lunghezza d'onda, commutatori, lasers e filtri sono stati ottenuti mediante l'uso di cristalli fotonici [1]-[4]. In particolare, sfruttando la forte dipendenza delle loro caratteristiche dalla lunghezza d'onda, si possono ottenere diverse tipologie di filtri ottici [1]-[3]. Filtri add e drop sono stati proposti accoppiando due guide attraverso una cavità risonante [1], [2], o utilizzando un accoppiatore direzionale [3].

In questo lavoro viene presentata l'analisi numerica di un filtro notch ottenuto accoppiando una guida a cristallo fotonico con una cavità risonante. L'analisi è stata realizzata mediante l'utilizzo di simulatori numerici sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza, entrambi basati sul metodo degli elementi finiti (finite element method, FEM) [5]. I due approcci presentano proprietà complementari. Il primo, trasformando secondo Fourier l'andamento temporale di impulsi di breve durata, permette l'analisi delle proprietà spettrali su un'ampia banda (centinaia di nm) mediante un'unica simulazione, mentre il secondo risulta estremamente efficace quando l'impatto degli effetti dispersivi del materiale non possono essere trascurati e/o quando deve essere analizzato solo un intervallo limitato di lunghezze d'onda. Le proprietà peculiari del FEM rendono questo metodo estremamente utile per l'analisi di dispositivi basati su cristallo fotonico. Esso è infatti in grado di descrivere con elevata accuratezza ogni tipo di geometria e di profilo dell'indice di rifrazione senza gravare eccessivamente sulle risorse computazionali. Queste proprietà sono già state efficacemente impiegate per investigare l'impatto che le variazioni geometriche di alcune celle elementari hanno sulle proprietà spettrali dei dispositivi [5]. L'analisi presentata in questo lavoro mostra come, agendo sul coefficiente di accoppiamento tra guida e cavità e sul fattore di qualità Q della cavità, si possono ottenere filtri ottici estremamente compatti e con bande compatibili con le specifiche imposte dagli attuali sistemi a moltiplicazione di lunghezza

d'onda (Wavelength Division Multiplexing WDM). Inoltre, l'alterazione delle caratteristiche delle celle del cristallo che separano la guida e la cavità permette un'accurata accordabilità del filtro su un ampio intervallo di lunghezze d'onda.

Il Metodo Numerico

Si consideri un cristallo fotonico bidimensionale nel piano yz , il cui materiale è caratterizzato da un tensore permittività dielettrica relativa $\bar{\epsilon}_r$ ed un tensore permeabilità magnetica relativa $\bar{\mu}_r$, entrambi diagonali. In queste condizioni, l'analisi della propagazione del campo elettromagnetico può essere svolta semplicemente considerando la quantità scalare Φ_x che rappresenta la componente lungo l'asse x o del campo elettrico o del campo magnetico, nel caso rispettivamente di onde TE o TM .

Approccio nel dominio del tempo

Esprimendo Φ_x nella forma $\Phi_x(y, z, t) = \phi_x(y, z, t) e^{j\omega t}$, essendo ω la frequenza angolare e ϕ_x l'involuppo complesso, l'equazione delle onde diventa:

$$\frac{q_x}{c^2} \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} + 2j\omega \frac{q_x}{c^2} \frac{\partial \phi_x}{\partial t} - \omega^2 \frac{q_x}{c^2} \phi_x - \frac{\partial}{\partial y} \left(p_z \frac{\partial \phi_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p_y \frac{\partial \phi_x}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

con p_i e q_i , $i = x, y, z$, gli elementi dei tensori \bar{p} e \bar{q} . In particolare $\bar{p} = \bar{\mu}_r^{-1}$, $\bar{q} = \bar{\epsilon}_r$ e $\phi_x = E_x$ per le onde TE , $\bar{p} = \bar{\epsilon}_r^{-1}$, $\bar{q} = \bar{\mu}_r$ e $\phi_x = H_x$ per le onde TM . La scelta di analizzare la propagazione dell'involuppo ϕ_x permette di utilizzare passi temporali più grandi riducendo così il tempo necessario per la simulazione di un dato intervallo temporale. Applicando il metodo degli elementi finiti alle variabili spaziali ed alla variabile temporale della (1) si ottiene la seguente formula ricorsiva:

$$[P]\{\phi_x\}_{n+1} = [Q]\{\phi_x\}_n - [P]^*\{\phi_x\}_{n-1}.$$

Gli elementi delle matrici $[P]$ e $[Q]$ sono definiti da opportuni prodotti delle funzioni di forma e delle loro derivate [5]. L'approccio descritto, non trascurando la derivata seconda in t , permette un'analisi accurata della propagazione di impulsi temporali ultracorti (fs o frazioni di essi). Ciò permette di ottenere informazioni sulle caratteristiche spettrali della struttura in esame su un ampio intervallo di lunghezze d'onda, attraverso una sola simulazione. Si noti infine che essendo la lunghezza dei dispositivi in esame estremamente piccola, gli effetti dispersivi dovuti al materiale possono essere trascurati senza che ciò influenzi negativamente la precisione dei risultati.

Approccio nel dominio della frequenza

Partendo dall'equazione del rotore-rotore nel dominio della frequenza ed operando come in precedenza, si ottiene:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(p_z \frac{\partial \Phi_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(p_y \frac{\partial \Phi_x}{\partial z} \right) - \frac{\omega^2}{c^2} q_x \Phi_x = 0. \quad (2)$$

L'applicazione del metodo degli elementi finiti alle variabili spaziali della (2) permette di ottenere la seguente equazione algebrica:

$$\left([A] + [C] - \frac{\omega^2}{c^2} [B] \right) \{\Phi_x\} = [D] \{\psi_x\} \quad (3)$$

dove $\{\psi_x\}$ è un vettore noto dipendente dal campo di ingresso ψ_x definito su una porzione del contorno che delimita il dominio in esame. Anche in questo caso, gli elementi delle matrici $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$ sono definiti da opportuni prodotti delle funzioni

di forma e delle loro derivate [5]. Una volta assegnato il campo sul contorno ψ_x e la frequenza di lavoro, la risoluzione dell'equazione algebrica (3) permette di conoscere il campo sull'intero dominio.

In entrambi gli approcci il dominio in esame è stato circondato da un'opportuno strato di materiale anisotropo perfettamente adattato (Perfectly Matched Anisotropic layers PMA) al fine di eliminare l'effetto negativo che il contorno esterno esercita sulla precisione dei risultati [7].

Risultati

La struttura presa in esame è riportata in fig. 1 e consiste in un reticolo quadrato di colonne circolari di materiale dielettrico immerse in aria, aventi un raggio $r_c = 85.73 \text{ nm}$ ed una distanza reticolare $\Lambda = 600 \text{ nm}$. L'accoppiamento tra il modo della guida e quelli della cavità risonante produce un effetto filtrante dipendente dal coefficiente di accoppiamento e dal fattore Q [1]. Tanto più alto è il fattore di qualità, tanto più selettiva è la risposta in frequenza. Per aumentare il fattore Q , si deve aumentare il numero di colonne che circondano la cavità [8] ed in particolare quelle che separano la cavità dalla guida. D'altro canto questo riduce l'accoppiamento tra guida e cavità ed in ultima analisi la profondità del notch. Nella struttura in esame, il miglior compromesso è quello mostrato in fig. 1(a), in cui la guida e la cavità sono separate da due colonne. L'andamento spettrale della trasmissività è stato inizialmente valutato

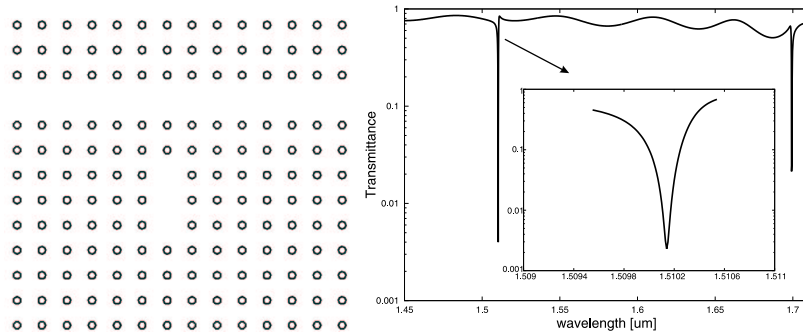


Fig. 1. (a) Struttura del filtro. (b) Spettro della trasmissività.

su un ampio intervallo di lunghezze d'onda attraverso il simulatore nel dominio del tempo, ottenendo lo spettro riportato in fig. 1(b). Sono evidenti due notch prossimi alle lunghezze d'onda di $1.51 \mu\text{m}$ e di $1.7 \mu\text{m}$. Per dispositivi con queste caratteristiche spettrali, un approccio nel dominio del tempo non costituisce la scelta migliore. Infatti, essendo Q elevato, la velocità di decadimento dell'energia elettromagnetica immagazzinata nella cavità è estremamente bassa e questo impone la simulazione di intervalli temporali estremamente grandi. Al contrario, mediante l'approccio nel dominio delle frequenze, le caratteristiche spettrali in prossimità del notch possono essere valutate con la risoluzione desiderata come è mostrato nel riquadro di figura 1, in cui viene riportata la trasmissività attorno alla lunghezza d'onda di $1.51 \mu\text{m}$. La larghezza a metà altezza è di circa 0.7 nm e la trasmissività a centro banda è circa -27 dB . La posizione del notch può essere modificata agendo sulle caratteristiche delle celle del cristallo che separano la guida dalla cavità. In fig. 2(a) sono riportati gli spettri della trasmissività ottenuti cambiando del 5% l'indice di rifrazione o della colonna adiacente la cavità o di quella adiacente la guida o di entrambe. I risultati evidenziano come il cambiamento

delle caratteristiche della colonna adiacente alla cavità influenzi maggiormente le caratteristiche spettrali rispetto all'altra e come di fatto i contributi dell'una e dell'altra si sommano quando si modificano entrambe. In tutti i casi, il valore di trasmissività di centro banda rimane di fatto inalterato. Il medesimo comportamento si osserva modificando il raggio delle colonne. In fig. 2(b) è riportato lo spostamento della lunghezza d'onda di centro banda rispetto al caso imperturbato, in funzione dell'incremento dei raggi delle colonne in esame. La colonna adiacente alla guida permette un controllo della posizione del notch che è confrontabile con la spaziatura tra i canali degli attuali sistemi *WDM*, mentre la colonna prossima alla cavità permette di coprire un intervallo di alcuni nanometri.

In conclusione è stato mostrato come con un opportuno progetto di strutture a cristallo fotonico sia possibile ottenere filtri notch con elevata selettività ed accordabili in modo accurato su un intervallo di diversi nanometri.

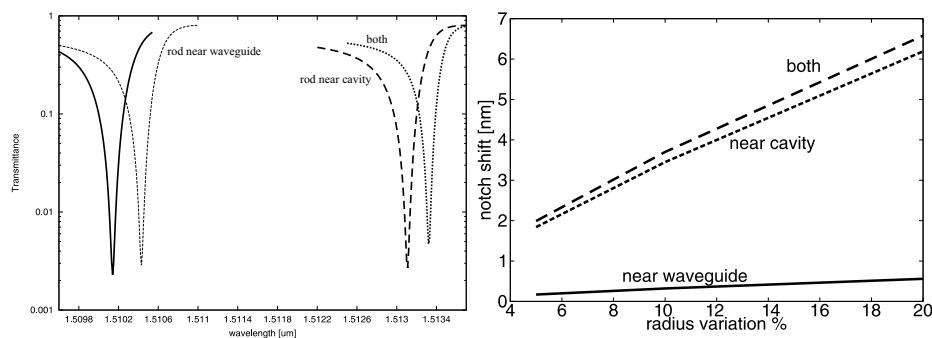


Fig. 2. (a) Spettro della trasmissività del filtro notch nel caso di incremento dell'indice di rifrazione di alcune colonne. (b) Spostamento della lunghezza d'onda di centro banda in funzione della variazione del raggio di alcune colonne.

Bibliografia

1. S. Fan, P.R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, H. A. Haus, "Channel drop filters in photonic crystals", *Opt. Express*, vol.3, pp.4-11, April, 1998.
2. A. Sharkawy, S. Shi, D.W. Prather, "Multichannel Wavelength Division Multiplexing with Photonic Crystals", *Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 2247-2252, May 2001.
3. M. Koshiba, "Wavelength Division Multiplexing and Demultiplexing with Photonic Crystal Waveguide Couplers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 1970-1974, Dec. 2001.
4. R. Stoffer, H.J.W.M. Hoekstra, R.M. De Ridder, E. van Groesen, F.P.H. van Beckum, "Numerical studies of 2D photonic crystals: waveguides, coupling between waveguides and filters", *Opt. Quantum Electron.*, vol. 32, pp. 947-961, 2000.
5. A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti, M. Zoboli, "Impact of the cell geometry on the spectral properties of photonic crystal structures", *Appl. Phys. B*, vol. 73, pp. 595-600, 2001.
6. V.F. Rodriguez-Esquerre and H.E. Hernández-Figueroa, "Novel Time-Domain Step-by-Step Scheme for Integrated Optical Application", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp.311-313, April, 2001.
7. S. Selleri, L. Vincetti and M. Zoboli, "Full-Vector Finite-Element Beam Propagation Method for Anisotropic Optical Device Analysis", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, pp. 1392-1401, December 2000.
8. P.R. Villeneuve, S. Fan, J.D. Joannopoulos, "Microcavities in Photonic Crystals: Mode Symmetry, Tunability and Coupling Efficiency", *Phys. Rev. B*, vol. 54, pp. 7837-7842, 15 September 1996.