

STUDIO DI GUIDE E ACCOPPIATORI IN FIBRE A CRISTALLO FOTONICO CON BPM VETTORIALE

Fabrizio Fogli, Luca Saccomandi e Paolo Bassi
Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica, Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna
ffogli, lsaccomandi, pbassi@deis.unibo.it

Gaetano Bellanca e Stefano Trillo
Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara
Via Saragat 1, 44100 Ferrara
gbellanca, strillo@ing.unife.it

Abstract

A 3D Full Vectorial Finite Difference Beam Propagation Method is successfully used to compute both the propagation constants and the modal shapes in high-contrast silica-air index-guiding Photonic Crystal Fibers. This approach proves then suited to study also longitudinally variant structures or propagation effects, which are of practical interest for advanced optical applications. As an example, a dual-core photonic crystal fiber coupler is investigated, showing efficient polarization preserving coupling.

INTRODUZIONE

Le fibre con sezione trasversale a geometria periodica sono sempre più importanti in vista di applicazioni lineari e non lineari. Tali guide, note come fibre a cristallo fotonico (PCF) o fibre microstrutturate, sono realizzate a partire da una disposizione regolare di tubi di silice forati nella quale sono inclusi difetti invarianti in direzione longitudinale. La scelta della geometria e delle condizioni di filatura porta a due differenti meccanismi guidanti. Nel primo il campo è confinato se la periodicità trasversale è tale da esibire un effetto riflettente alla frequenza considerata. Per tali guide si parla di PCF a “Banda Proibita” [1]. Nel secondo caso, come per le guide classiche, il campo è confinato all’interno del difetto ad indice più elevato (ad esempio un tubo di silice pieno) e decade nella zona circostante ad indice medio inferiore. Tali guide, dette index-guiding PCF o fibre bucate (Holey Fibers)[2-5], presentano comunque caratteristiche dispersive differenti dalle usuali fibre in silice [2].

Lo studio delle caratteristiche elettromagnetiche di tali guide è stato inizialmente affrontato con approcci di tipo scalare [3]. Poi sono state sviluppate anche tecniche vettoriali [4-5]. Esse valgono per strutture longitudinalmente invarianti e non sono quindi applicabili ad altri casi di interesse pratico quali, ad esempio, le strutture deformate (taper [6] o guide curve [7]) e quelle in cui si debba tener conto degli effetti della propagazione (accoppiatori [8]). Per queste strutture, la soluzione può essere ottenuta ricorrendo a tecniche propagative come il Beam Propagation Method [9]. Anche nella sua formulazione scalare il BPM consente di analizzare questo tipo di fibre [10]. E’ comunque noto che in strutture a grande contrasto d’indice la natura vettoriale del campo è importante [4-5]. In questo lavoro verrà mostrato come il BPM alle differenze finite, vettoriale, tridimensionale con condizioni al contorno PML (Perfectly Matched Layers) possa essere utilizzato con successo per lo studio delle caratteristiche modali e propagative delle index-guiding PCF, anche in presenza di un forte salto d’indice evidenziandone le caratteristiche di flessibilità e robustezza. Il metodo è poi applicato all’analisi di un accoppiatore a doppio nucleo del tipo considerato in Ref. [8].

CARATTERISTICHE DISPERSIVE DEI MODI DELLA STRUTTURA

Per brevità rimandiamo il lettore alla Ref. [11] per i dettagli relativi al codice BPM da noi utilizzato. Per confrontare i risultati ottenuti con quelli di altre tecniche, si considera la struttura descritta in [4]: una PCF nella quale i difetti sono fori circolari di raggio $a = 0.6 \mu\text{m}$ riempiti di aria ($n=1$) realizzati su un supporto di silice amorfa ($n=1.46$) e disposti su base triangolare con passo $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$. Il nucleo è ottenuto considerando pieno uno dei fori della struttura. Nelle simulazioni da noi effettuate abbiamo considerato una finestra di calcolo (sul piano trasverso) di $19 \mu\text{m} \times 14.2 \mu\text{m}$ in direzione x e y rispettivamente circondata da uno strato PML di spessore $1 \mu\text{m}$ ed una propagazione di $500 \mu\text{m}$ con passi

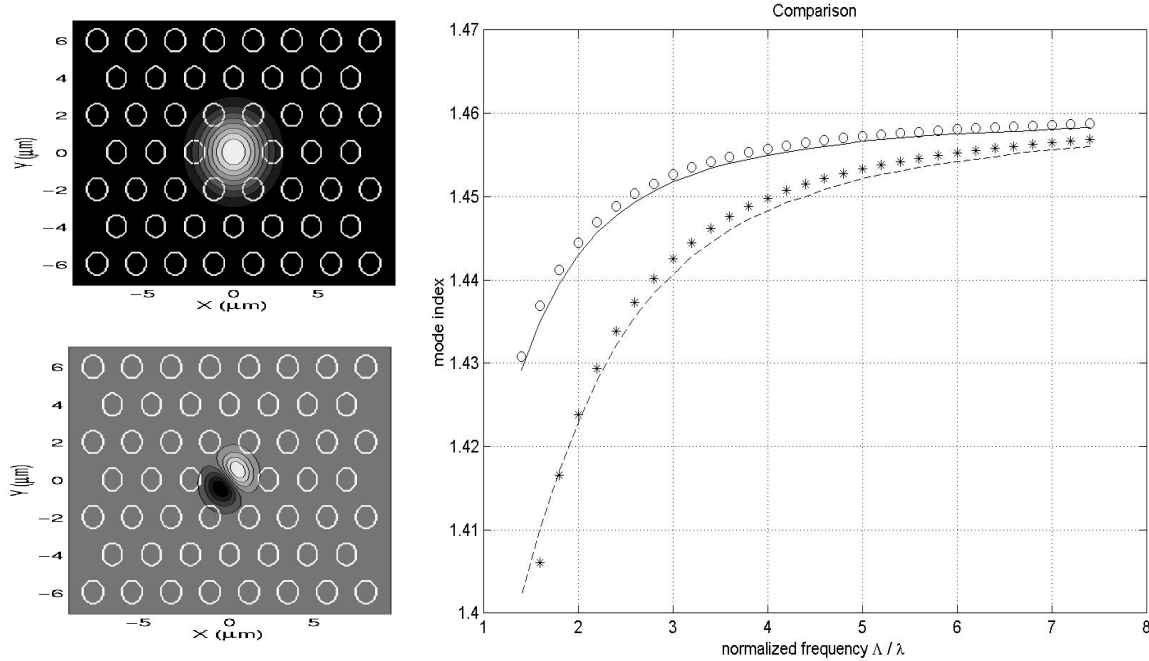


Fig. 1-a. Parti reali di E_x utilizzate per eccitare il modo fondamentale (sopra) ed il primo modo superiore (sotto) della PCF con $a = 0.6$ e $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$.

Fig. 1-b. Indici di rifrazione efficaci in funzione della frequenza normalizzata Λ/λ (λ varia nell'intervallo 300 - 1600 nm) per il modo fondamentale e per il primo modo superiore. I simboli fanno riferimento ai valori ottenuti col BPM, le curve ai risultati riportati in [4], Fig. 3.

di campionamento $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \mu\text{m}$.

Nella struttura considerata esistono due gruppi di modi degeneri [4-5]: un doppietto relativo al modo fondamentale ed un multipletto relativo al primo modo superiore con polarizzazioni x ed y rispettivamente. Per eccitare separatamente tali configurazioni modali si sono utilizzate le distribuzioni di campo mostrate nella figura 1-a. Osservando la loro evoluzione verso una configurazione stabile è possibile ricavare sia il valore delle costanti di propagazione [8] (figura 1-b), sia le distribuzioni di campo relative ai modi in propagazione nella struttura per la polarizzazione x del modo fondamentale e per una delle possibili orientazioni del primo modo superiore relativa alla stessa polarizzazione (figura 2). Il buon accordo tra le costanti di propagazione trovate con il BPM e quelle ricavate in [4] mostrato in figura 1-b conferma la praticabilità del metodo.

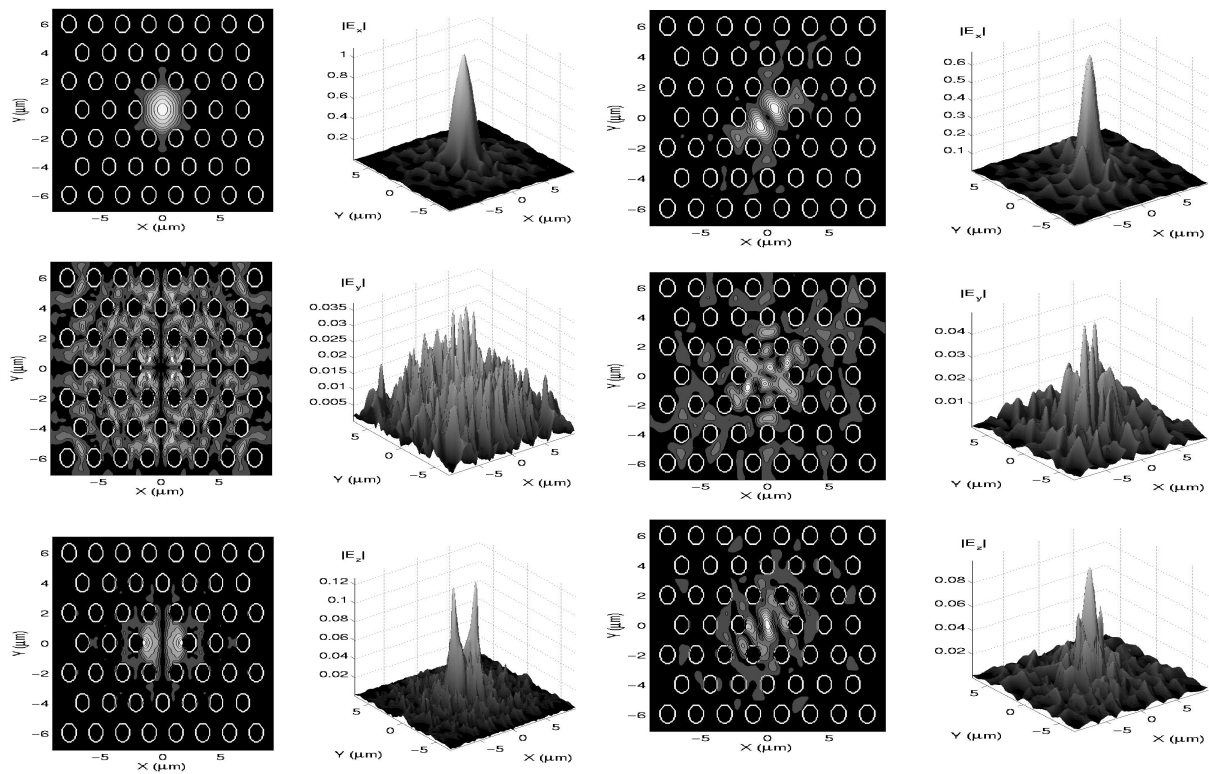


Fig. 2. Moduli delle componenti x , y e z del campo elettrico relativi al modo fondamentale (sinistra) e al primo modo superiore (destra) nella sezione d'uscita della fibra per $\Lambda/\lambda = 5$.

LA STRUTTURA A DOPPIO NUCLEO

Il BPM è stato poi applicato allo studio di un accoppiatore a doppio nucleo ottenuto riempiendo due fori di una PCF monomodo ($a = 0.3 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ [4]) distanti 2Λ tra loro. Il modo polarizzato x della fibra a singolo nucleo è stato calcolato con la procedura già descritta per $\Lambda/\lambda = 2.7$ e poi lanciato lungo il canale di sinistra dell'accoppiatore (figura 3 a sinistra). La parte di destra di tale figura mostra invece la stessa componente dopo una propagazione di 0.7 mm quando quasi tutta l'energia è stata accoppiata al canale di destra del dispositivo. Nel caso in esame non è stato osservato nessun accoppiamento di polarizzazione. La lunghezza d'accoppiamento del dispositivo è in questo caso $L_{cx} = 0.7335 \text{ mm}$ mentre lanciando la polarizzazione y del doppietto è $L_{cy} = 0.7505 \text{ mm}$. Ciò è imputabile alle piccole ma significative diversità nei profili di campo delle due polarizzazioni. La distribuzione di campo delle componenti fondamentali dopo una propagazione di 1.1 mm è mostrata in figura 4. per la polarizzazione x (sinistra) e y (destra).

CONCLUSIONI

Un algoritmo 3D-FV-FD-BPM, con condizioni al contorno PML è stato usato per studiare le Photonic Crystal Fibers. Il metodo è risultato efficace nonostante l'alto contrasto d'indice delle PCF. I modi e le loro curve di dispersione sono stati calcolati e confrontati con successo con risultati già noti in letteratura. Il BPM presenta comunque una maggiore flessibilità rispetto alle tecniche di soluzione modale poiché considera anche i fenomeni propagativi. In particolare si è mostrato che una struttura PCF a doppio nucleo può operare come accoppiatore direzionale a mantenimento di polarizzazione. Le simulazioni effettuate

incoraggiano l'uso di tale tecnica per lo studio dell'accoppiamento in strutture invarianti longitudinalmente o con variazione adiabatica come proposto in Ref. [6-8].

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto con finanziamento CNR (P.F. MADESS II) e MIUR.

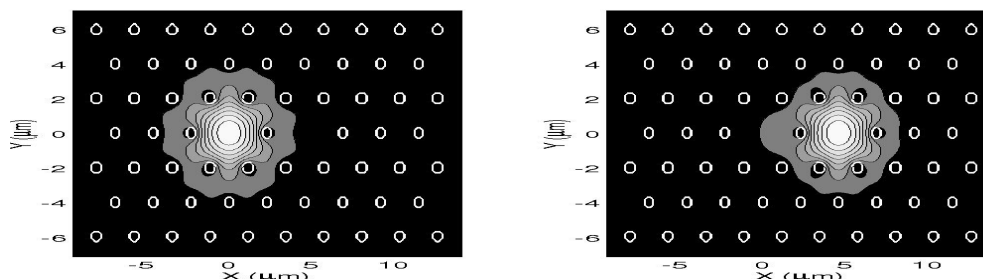


Fig. 3. Moduli del campo della componente E_x nella struttura a doppio nucleo. Campo iniziale (sinistra). Campo dopo una propagazione di 0.7 mm (destra).

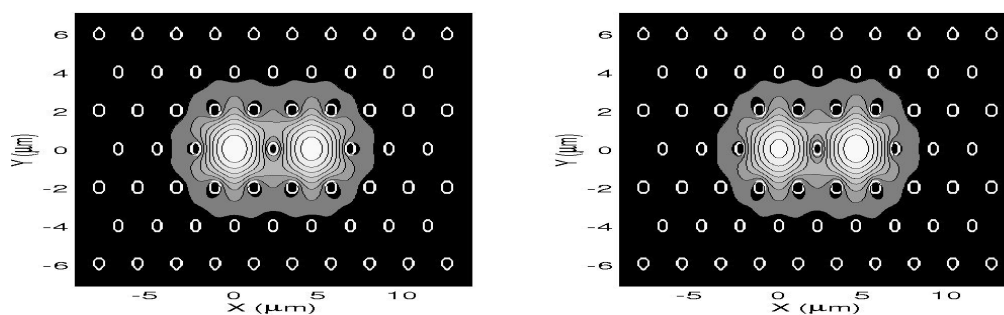


Fig. 4. Modulo del campo nella struttura a doppio nucleo dopo una propagazione di 1.1 mm. Sinistra: E_x della polarizzazione x. Destra: E_y della polarizzazione

RIFERIMENTI

1. Cregan, R.F., Mangan, B.J., Knight, J. C., Birks T. A., Russel P. St. J., Roberts P. J. and Allan D. C., Science **285**, 1537-1539 (1999).
2. Birks, T.A. and Russel, P. St. J., Opt. Lett. **22**, 961-963 (1997).
3. Knight, J.C., Birks, T.A., Russel, P. St. J. and de Sandro, J.P., J. Opt. Soc. Am. A **15**, 748-752 (1998).
4. Ferrando, A. Silvestre, E. Miret, J.J., Andrés, P. and Andrés, M.V., J. Opt. Lett. **24**, 276-278 (1999).
5. Ferrando, A. Silvestre, E. Miret, J.J., Andrés, P. and Andrés, M.V., J. Opt. Soc. Am. A **17**, 1333-1340 (2000).
6. Liu X., Xu C., Knox W. H., Chandalia J. K., Eggleton B. J., Kosinski S. G. and Windeler R. S., Opt. Lett. **26**, 358-400 (2001).
7. Sorensen, T., Broeng, J., Bjarklev, A., Knudsen, E. and Barkou Libori, S.E., Electron. Lett. **37**, 287-289 (2001).
8. Mangan, B.J., Knight, J.C., Birks, T.A. Roberts, P.J., Russel, P. St. J. and Greenaway, A.H., Electron. Lett. **36**, 1358-1359 (2000).
9. Feit, M.D. and Fleck, J.A., Appl. Opt. **19**, 1154-1164 (1980).
10. Eggleton B. J., Westbrook P. S., White C. A., Kerbage C., Windeler R. S. and Burdge G. L., IEEE J. Lightwave Technol. **18**, 1084-1100 (2000).
11. Fogli F., Bellanca G., Bassi P., Madden I., and Johnstone W., IEEE J. Lightwave Technol. **17**, 136-143 (1999).