

Analisi delle Proprietà di Amplificazione di Fibre a Cristallo Fotonico Drogate con Erblio

A. Cucinotta, F. Poli, S. Selleri

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Università di Parma, Parco Area delle Scienze 181A, 43100 Parma.
Email: stefano.selleri@unipr.it*

L. Vincetti, M. Zoboli

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Università di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese 905/B, 41100
Modena.
Email: maurizio.zoboli@unimo.it*

Abstract: *Amplification properties of erbium doped photonic crystal fibers are analyzed through the full-vector finite element method to calculate the mode guided within the band-gap and through the propagation and the population rate equations to evaluate the signal amplification. Effects of variation of the central defect and the erbium doping radius are investigated.*

Introduzione

Le fibre a cristallo fotonico (Photonic Crystal Fibers, PCFs) sono fibre ottiche costituite da un unico materiale, solitamente silice, aventi una distribuzione periodica di buchi di aria che corrono per tutta la lunghezza della fibra. Il guidaggio, in queste fibre, è ottenuto inserendo un opportuno difetto che interrompe la periodicità del reticolo bidimensionale [1]. Le PCF, grazie alla complessa distribuzione del profilo dell'indice di rifrazione, aprono possibilità del tutto nuove per quanto riguarda il controllo e il guidaggio del campo elettromagnetico [2] in dispositivi ottici sia passivi che attivi. In particolare la possibilità di avere aree modali o molto piccole o molto grandi può essere sfruttata al fine di realizzare nuovi laser in fibra monomodo aventi rispettivamente potenze di pompa di soglia molto basse o elevate potenze di emissione [3], [4]. Un primo esempio di realizzazione di una PCF drogata con Er^{3+} è riportato in [5] dove in particolare si sono studiate le variazioni dell'emissione spontanea sul piano trasverso dovute alla presenza del band gap fotonico. Nonostante le loro caratteristiche molto promettenti, le PCF drogate sono state finora poco studiate e in letteratura sono presenti ben pochi lavori, oltre a quelli citati.

In questo lavoro le proprietà di amplificazione delle PCFs drogate con erblio vengono studiate e confrontate con quelle delle fibre drogate standard al fine di individuare i possibili vantaggi che si potrebbero avere dall'impiego delle PCF negli amplificatori ottici in fibra. Si è considerata una PCF avente una distribuzione di fori a nido d'ape e con un foro in più nel centro della fibra: questo foro funge da difetto e crea, all'interno del band-gap, uno stato guidato permesso in cui il campo si propaga in regime monomodale alle lunghezze d'onda di interesse. Gli ioni di drogante, l'erbio, si suppongono distribuiti in una zona ad anello attorno al foro centrale.

Si è analizzato come varia il guadagno della PCF al variare sia del raggio del foro centrale sia della distribuzione del drogante. Si dimostra, infatti, che grazie alla riduzione dell'area modale sia della pompa che del segnale si può ottenere un guadagno di 12 dB maggiore rispetto a quello ottenibile con una fibra drogata convenzionale di tipo step avente la medesima concentrazione di drogante per unità di lunghezza. L'analisi delle proprietà guidanti della PCF è effettuata per mezzo di un solutore modale vettoriale basato sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM) che permette di calcolare la distribuzione del campo elettromagnetico all'interno del band-gap fotonico. L'amplificazione dei

segnali è descritta in termini di population rate equations e propagation rate equations. Inoltre il modello permette di considerare l'amplificazione di segnali DWDM e lo spettro dell'emissione spontanea amplificata (ASE).

Il Metodo

Una descrizione molto accurata della distribuzione del campo elettromagnetico sulla sezione trasversa della PCF è fondamentale al fine di descrivere in modo preciso la sua interazione con il drogante. Nel presente approccio, il campo elettromagnetico è ottenuto per mezzo di un solutore modale vettoriale basato sul Metodo degli Elementi Finiti [6], [7]. In questo modo, infatti, è possibile considerare qualunque tipo di geometria e dimensione dei fori con grande precisione. Il punto di partenza è la risoluzione dell'equazione del rotore-rotore $\nabla \times (\varepsilon_r^{-1} \nabla \times \vec{H}) - k_0^2 \vec{H} = 0$, dove ε_r è la permittività dielettrica relativa, $k_0 = 2\pi/\lambda$ il numero d'onda nel vuoto e λ la lunghezza d'onda. Dopo il calcolo del limite superiore e del limite inferiore del band-gap fotonico all'interno del quale il difetto permette la propagazione del campo, lo spettro degli autovalori delle matrici di sistema ottenute mediante il FEM è opportunamente traslato al fine di forzare la ricerca della soluzione all'interno del band-gap. Il solutore modale, quindi, permette di calcolare sia l'autovalore che l'autovettore i quali rappresentano rispettivamente la costante di propagazione e la distribuzione delle tre componenti del campo magnetico del modo guidato della PCF alla lunghezza d'onda voluta. Una volta calcolato \vec{H} , il campo elettrico è ottenuto mediante l'equazione di Maxwell $\nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon \vec{E}$. Infine la distribuzione di intensità normalizzata $i(x, y)$ del modo è ricavata dalla relazione $i(x, y) = \mathcal{R}e \{ \frac{\vec{E} \times \vec{H}^*}{P} \cdot \hat{z} \}$ dove P è la potenza del campo elettromagnetico calcolato. Il FEM è utilizzato per calcolare le intensità dei fasci di pompa, di segnale e ASE secondo la relazione $I_k(x, y, z) = i_k(x, y) P_k(z)$, dove il pedice k si può riferire alla pompa, al segnale o allo spettro ASE [6]. Queste intensità sono i dati di input delle population rate equations e propagation rate equations che descrivono l'interazione campo-drogante e l'evoluzione dei fasci di pompa, di segnale e ASE lungo la fibra drogata. In particolare, l'intervallo dello spettro ASE considerato va da 1500 nm a 1600 nm con una larghezza di banda per slot pari a $\Delta\nu_k = 12.5\text{ GHz}$.

Risultati

In Fig.1 è riportato un dettaglio del reticolo utilizzato per discretizzare la struttura studiata mediante il FEM. Al fine di ridurre l'occupazione di memoria è stato considerato solo un quarto della struttura e sono state imposte opportune condizioni di simmetria. I fori sono disposti a nido d'ape con un foro in più nel centro della struttura, avente raggio r_c , introdotto come difetto. La distanza tra il centro di un buco e il centro di un buco adiacente è $\Lambda = 1.62\text{ }\mu\text{m}$, il diametro dei buchi $d = 0.664\text{ }\mu\text{m}$; il rapporto $d/\Lambda = 0.41$ è tale per cui la fibra è singolo modo sia alla lunghezza d'onda di pompa (980 nm) sia alla lunghezza d'onda di segnale. Gli ioni erbio sono distribuiti in un anello, di raggio r_d , attorno al foro centrale, in corrispondenza della zona in cui le distribuzioni di intensità della pompa e del segnale sono più significative. Allo scopo di studiare come la distribuzione del campo elettromagnetico può modificare le proprietà di amplificazione della PCF drogata, si sono considerati tre diversi valori del raggio del foro centrale r_c . In particolare, oltre al caso in cui il foro centrale è uguale a tutti gli altri ($r_c = d/2$), si sono considerati i casi in cui il raggio del difetto è stato ridotto del 20 % e del 40%, cioè $r_c = 0.2656\text{ }\mu\text{m}$ e $r_c = 0.1992\text{ }\mu\text{m}$. Valori di r_c maggiori di $d/2$ non sono stati considerati in quanto, in questo caso, il modo alla lunghezza d'onda di pompa (980 nm) è posizionato al di fuori del band gap per cui il suo comportamento non è monomodale. I valori di guadagno della PCF sono stati confrontati con quelli ottenuti considerando una fibra

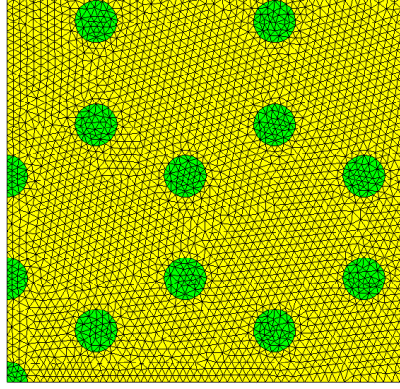


Fig. 1. Dettaglio del reticolo su un quarto del dominio.

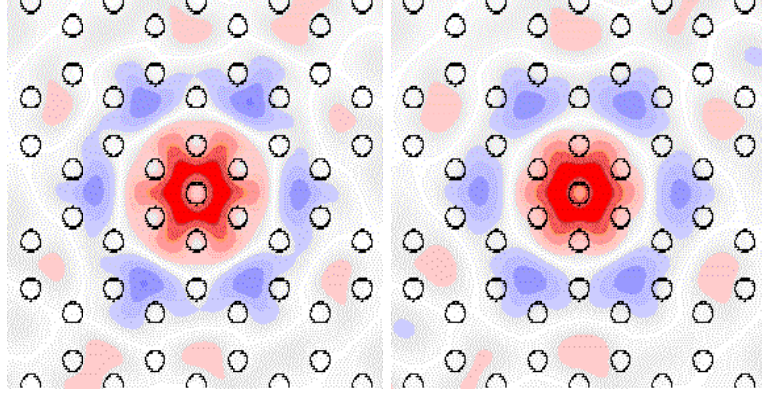


Fig. 2. Distribuzione della componente principale H_x del campo elettromagnetico alla lunghezza d'onda di pompa $\lambda = 980 \text{ nm}$ e di segnale $\lambda = 1560 \text{ nm}$ nel caso $r_c = d/2 \mu\text{m}$.

drogata con Er^{3+} di tipo step-index avente raggio del core pari a $2\mu\text{m}$ e $NA = 0.186$. La concentrazione del drogante nella fibra step è stata fissata al valore $N_T = 1.74 \times 10^{25} \text{ ions}/\text{m}^3$, mentre per la concentrazione di drogante della PCF si è considerato un valore N'_T tale da avere la stessa concentrazione per unità di lunghezza secondo la relazione $N_T \cdot A^{\text{step}} = N'_T \cdot A^{\text{PCF}}$ dove A^{PCF} e A^{step} sono l'area della zona drogata della PCF e della fibra step rispettivamente. Chiaramente, a causa della presenza del buco centrale nella PCF, si ha che $A^{\text{PCF}} = A^{\text{step}} - \pi r_c^2$. La distribuzione della componente principale del campo magnetico H_x , calcolata mediante il solutore basato sul FEM, è riportata in Fig.2 sia alla lunghezza d'onda di pompa che alla lunghezza d'onda di segnale nel caso $r_c = d/2$. Per valori di r_c inferiori, il campo nella PCF è maggiormente focalizzato nella zona circostante la regione centrale. A titolo di esempio, per $r_c = 0.1992 \mu\text{m}$ e $r_d = 1.25 \mu\text{m}$ gli integrali di sovrapposizione tra l'intensità normalizzata e la distribuzione di drogante sono $\Gamma_{980} = 0.727$, $\Gamma_{1560} = 0.551$ rispettivamente alla lunghezza d'onda di pompa e di segnale. Mentre nel caso di una fibra standard di tipo step si ottiene $\Gamma_{980} = 0.481$, $\Gamma_{1560} = 0.271$. Risulta quindi evidente che la PCF permette di ottenere valori di Γ molto maggiori, nonostante la presenza di un buco d'aria nella zona centrale della fibra. I risultati mostrati in Fig.3 sono stati ottenuti con potenza di pompa di 100 mW a $\lambda_p = 980 \text{ nm}$, lanciando in fibra 13 segnali compresi tra 1540 nm e 1600 nm , con una spaziatura di 625 GHz e una potenza per canale di -30 dBm/ch , corrispondente ad una potenza totale di -18.9 dBm . La lunghezza della fibra drogata è pari a 8 m

sia per la PCF che per la fibra step, corrispondente al valore ottimo di lunghezza calcolato per la fibra step-index. La Fig. 3(a) mostra un confronto tra il guadagno della PCF e della fibra drogata standard al variare del raggio del drogante r_d per tre diversi valori di r_c , alla lunghezza d'onda di segnale $\lambda = 1550 \text{ nm}$. Si noti che r_d è stato variato da $0.5 \mu\text{m}$ a $2 \mu\text{m}$ sia nella PCF che nella fibra step index. I valori maggiori di guadagno, si ottengono per il valore minore di r_c . In particolare per $r_c = 0.6 d/2$ e $r_d = 0.5 \mu\text{m}$ la fibra PCF raggiunge un guadagno di 12 dB superiore al corrispondente valore ottenuto con la fibra step-index. Il guadagno dei 13 segnali in funzione del raggio di drogante per il caso di $r_c = 0.1992 \mu\text{m}$ è riportato in Fig. 3(b). In questo caso si è considerato come intervallo di variazione del raggio del drogante $0.5 - 2.8 \mu\text{m}$. Il massimo valore del guadagno, 35 dB , si ottiene per $r_d = 1.25$ corrispondente al caso in cui l'anello su cui è distribuito il drogante è tangente ai 6 fori che circondano quello centrale. Si noti che i risultati sopra riportati sono stati ottenuti ipotizzando una tempo di vita del livello metastabile pari a 10.5 ms , come nelle fibre drogate standard. Potenzialmente la presenza del band-gap nelle fibre PCF potrebbe avere effetti di innalzamento o soppressione dell'emissione spontanea amplificata che comporterebbero una variazione del tempo di vita, tuttavia, a causa della mancanza di dati sperimentali per le PCF, al momento non è stato possibile tenere conto di tali effetti che potrebbero avere importanti implicazioni.

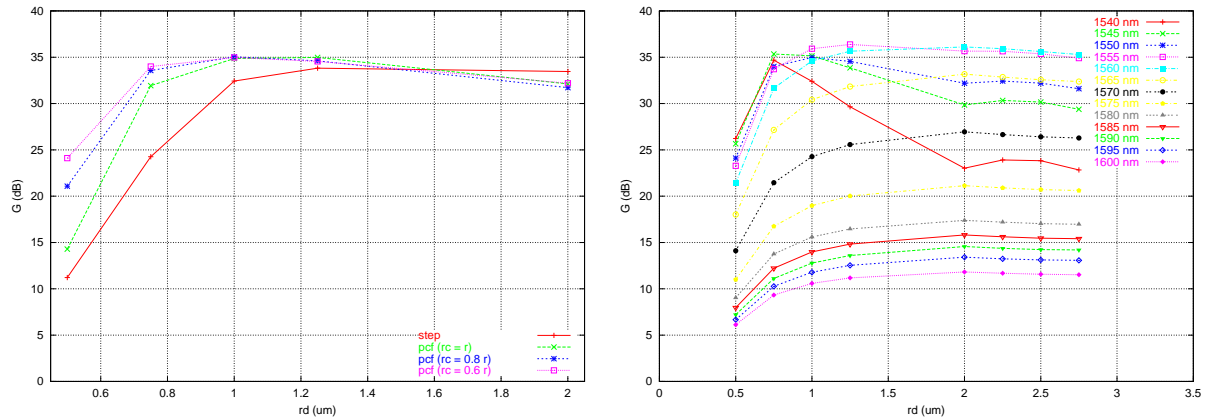


Fig. 3. (a) Confronto tra il guadagno ($\lambda_s = 1560 \text{ nm}$) nella fibra step e nella PCF drogata al variare di r_d . (b) Il guadagno in funzione di r_d per i 13 segnali che si propagano nella PCF.

Bibliografia

1. P.St.J. Russell, J.C. Knight, T.A. Birks, B.J. Mangan and W.J. Wadsworth, "Recent Progress in Photonic Crystal Fibres", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, ThG1, March 7-10, 2000.
2. A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti and M. Zoboli, "Photonic Crystal Fibers: Perturbation Analysis of Polarization and Dispersion Properties", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, ThS2, Anaheim, California, March 19-21, 2002.
3. W.J. Wadsworth, J.C. Knight, W.H. Reeves, P.St.J. Russel and J. Arriaga, "Yb³⁺-doped photonic crystal fibre laser", *Electronics Letters*, vol. 36, no.17, August 2000.
4. T. Sondergaard, "Photonic Crystal Distributed Feedback Fiber Lasers with Bragg Gratings", *IEEE Journal of Lightwave Tech.*, vol.18, pp. 589-597, April 2000.
5. R.F.Cregan, J.C. Knight, P.St.J. Russel and P.J. Roberts, "Distribution of Spontaneous Emission from and Er³⁺-Doped Photonic Crystal Fiber", *IEEE Journal of Lightwave Tech.*, vol. 17, pp. 2138-2141, November 1999.
6. F. Di Pasquale and m. Zoboli, "Analysis of erbium doped waveguide amplifiers by a full-vectorial finite-element method", *J. Lightwave Technology*, vol.11, pp. 1565-1574, October 1993.
7. S. Selleri, L. Vincetti, A. Cucinotta, M. Zoboli, "Complex FEM Modal Solver of Optical Waveguides with PML Boundary Conditions", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 33, n. 4/5, pp. 359-371, April 2001.