

Amplificatori Ottici in Fibra Drogata con Tullio

A. Cucinotta, M. Fuochi, N. Tosi, S. Selleri

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Università di Parma, Parco Area delle Scienze 181A, 43100 Parma.
tel: 0521-905765, Fax: 0521-905758, Email: stefano.selleri@unipr.it*

Abstract: *Tm³⁺-doped optical fibers are excellent candidate for 1.4μm amplifiers. An accurate model was implemented in order to describe optical amplification in thulium-doped fiber amplifiers, both spatial as well spectral characteristics are fully investigated.*

Introduzione

La crescente domanda di capacità trasmissiva richiede la disponibilità di amplificatori ottici in fibra che permettano di utilizzare interamente la banda in cui le fibre ottiche presentano basse perdite (1450-1650 nm). Gli amplificatori ottici in fibra drogata con erbio sono stati impiegati con grande successo sia in banda C (1530-1570 nm) che in banda L (1570-1630 nm)[1]. Gli amplificatori ottici drogati con tullio sembrano essere eccellenti candidati per ottenere amplificazione nella regione di basse lunghezze d'onda [2]. Sono stati realizzati amplificatori in fibre fluorurate drogate con ioni Tm³⁺ che operano sia in banda S+ (1450 – 1480 nm) [3] che in banda S (1480-1530 nm) [4], [5]. In particolare, molti studi sperimentali sono stati realizzati al fine di analizzare l'impatto dello schema di pompaggio sulle prestazioni dell'amplificatore drogato con tullio [4], [6], [7].

In questo lavoro è presentato un modello numerico per l'analisi e il design degli amplificatori in fibra drogata con tullio (Tm-Doped Tellurite Fiber Amplifiers, TDTFAs). Il modello è in grado di descrivere sia le proprietà spettrali che le proprietà spaziali [8] dell'amplificatore ottico in esame ed è stato applicato allo studio della propagazione di segnali WDM in amplificatori sia a singolo stadio che multi-stadio.

Il Modello del TDTFA

Il diagramma dei livelli di energia degli ioni Tm³⁺ è mostrato in Fig.1. Come schema di pompaggio

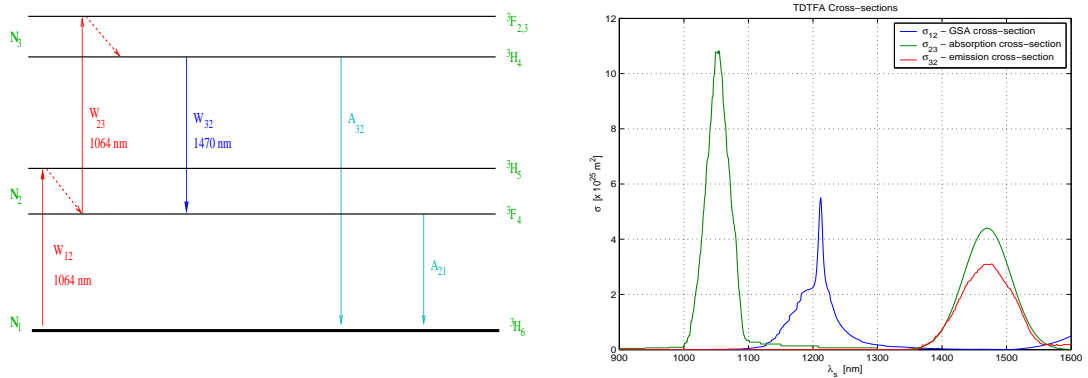


Fig. 1. Diagramma dei livelli energetici del Tm³⁺. Sezioni d'urto di emissione e di assorbimento.

è stato considerato quello basato sull'up-conversion a 1064 nm. Come si deduce dalla Fig. 1(a),

questo comporta assorbimento da stato fondamentale (ground state absorption, GSA) dal livello 3H_6 a 3H_5 , un decadimento molto veloce da 3H_5 a 3F_4 e assorbimento da stato eccitato (excited state absorption, ESA) da 3F_4 a ${}^3F_{2-3}$. I livelli 3F_2 e 3F_3 sono molto vicini tra loro e possono, per semplicità, essere considerati come un unico livello. L'emissione stimolata a 1470 nm è dovuta alla transizione ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$. L'emissione spontanea del livello 3H_4 riguarda le transizioni ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ (800 nm), ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ (2300 nm) e ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ (1470 nm). Il loro *branching ratio* nelle fibre fluorurate è rispettivamente 0.89, 0.08 and 0.03 [3]. Facendo l'ipotesi che questo valga per qualsiasi TDTFAs, le transizioni ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ e ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ sono state trascurate. Inoltre per la prossimità dei livelli ${}^3F_{2-3}$ e 3H_4 ed anche 3H_5 e 3F_4 è possibile sviluppare un modello in cui si considerano solo i livelli 3H_4 , 3F_4 e 3H_6 le cui densità di popolazione sono N_3 , N_2 e N_1 rispettivamente. Nel modello a tre livelli le *populations rate equations* in regime stazionario assumono la forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_2(x, y, z) = \frac{W_{12} \left(W_{32} + \frac{1}{\tau_{31}} \right)}{\frac{1}{\tau_{31}} \left(W_{23} + \frac{1}{\tau_{21}} \right) + \frac{W_{32}}{\tau_{21}} + W_{12} \left(W_{32} + W_{23} + \frac{1}{\tau_{31}} \right)} N_T(x, y) \\ N_3(x, y, z) = \frac{W_{23}}{W_{32} + \frac{1}{\tau_{31}}} N_2(x, y, z) \\ N_1(x, y, z) = N_T(x, y) - N_2(x, y, z) - N_3(x, y, z) \end{array} \right.$$

dove $W_{ij}(x, y, z)$ rappresentano i tassi di assorbimento ed emissione stimolata relativi alla transizione dal livello i al livello j ; τ_{31} , τ_{21} sono i tempi di vita del livello 3 e 2. Per quanto riguarda le *propagation rate equations*, indicando con $\psi_p(x, y)$, $\psi_s(x, y)$ e $\psi_{ase}(x, y)$ le intensità normalizzate rispettivamente del segnale di pompa, di un generico segnale informativo e di un generico segnale ASE, le equazioni di propagazione per l'amplificatore TDTFAs assumono la seguente forma:

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp P_p^\pm(z) \left[\sigma_{12}(\nu_p) \iint_{\Omega} N_1(x, y, z) \psi_p(x, y) dx dy + \sigma_{23}(\nu_p) \iint_{\Omega} N_2(x, y, z) \psi_p(x, y) dx dy + l(\nu_p) \right];$$

$$\frac{dP_s}{dz} = P_s(z) \left[\sigma_{32}(\nu_s) \iint_{\Omega} N_3(x, y, z) \psi_s(x, y) dx dy - \sigma_{23}(\nu_s) \iint_{\Omega} N_2(x, y, z) \psi_s(x, y) dx dy - l(\nu_s) \right];$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ase}^\pm}{dz} = & \pm \sigma_{32}(\nu_{ase}) \left(P_{ase}^\pm(z) + 2h\nu_{ase} \Delta\nu_{ase} \right) \iint_{\Omega} N_3(x, y, z) \psi_{ase}(x, y) dx dy \mp P_{ase}^\pm(z) \cdot \\ & \cdot \left(l(\nu_{ase}) + \sigma_{23}(\nu_{ase}) \iint_{\Omega} N_2(x, y, z) \psi_{ase}(x, y) dx dy \right). \end{aligned}$$

dove il segno \pm si riferisce rispettivamente a fasci co-propaganti o contro-propaganti, σ_{ij} è la sezione d'urto relativa alla transizione dal livello i al livello j , l'integrale si intende su un dominio che coincide con la regione drogata della fibra e $l(\nu)$ sono le perdite di background della fibra alla frequenza ν .

Risultati

Si sono considerati 61 segnali aventi lunghezza d'onda compresa tra 1450 nm e 1520 nm con potenza di ingresso -30 dBm/ch che si propagano in una fibra tellurata drogata con Tm^{3+} avente

$N_T = 8.0 \times 10^{25} \text{ ioni/m}^3 (\simeq 9200 \text{ ppm})$. Il raggio del core è $2 \mu\text{m}$ e coincide con il raggio della zona drogata, il profilo della distribuzione del drogante è stato supposto di tipo *step*; l'indice di rifrazione del core è 1.948, quello del cladding 1.929, corrispondenti a $NA = 0.271$. La coordinata radiale della fibra è stata discretizzata con 81 punti, lo spettro ASE è stata suddiviso in 701 slot nell'intervallo $900 - 1600 \text{ nm}$. I valori dei tempi di vita sono $\tau_{21} = 3 \text{ ms}$ e $\tau_{31} = 0.4 \text{ ms}$. Il modello è stato applicato al fine di determinare i valori ottimi della potenza di pompa e della lunghezza di fibra drogata. La prima è stata variata tra 50 e 400 mW , la seconda nell'intervallo $5 - 60 \text{ m}$. In Fig. 2(a) è mostrata la potenza totale del segnale all'uscita dell'amplificatore in funzione della potenza di pompa e della lunghezza della fibra drogata. Si osserva che il valore ottimo della lunghezza della fibra è circa 20 m e il guadagno cresce al crescere della potenza di pompa. In Fig. 2(b) è riportata l'efficienza della potenza di pompa, definita come rapporto tra il guadagno dell'amplificatore e la potenza di pompa totale. Dai risultati si deduce che il valore della potenza di pompa per cui si ha la massima efficienza è circa 250 mW . In particolare, per $L = 20 \text{ m}$ e $P_{p0} = 250 \text{ mW}$ si ottiene una potenza di segnale totale in uscita di 11.5 dBm e un'efficienza di pompa pari a 0.08 dB/mW . Una volta determinata la

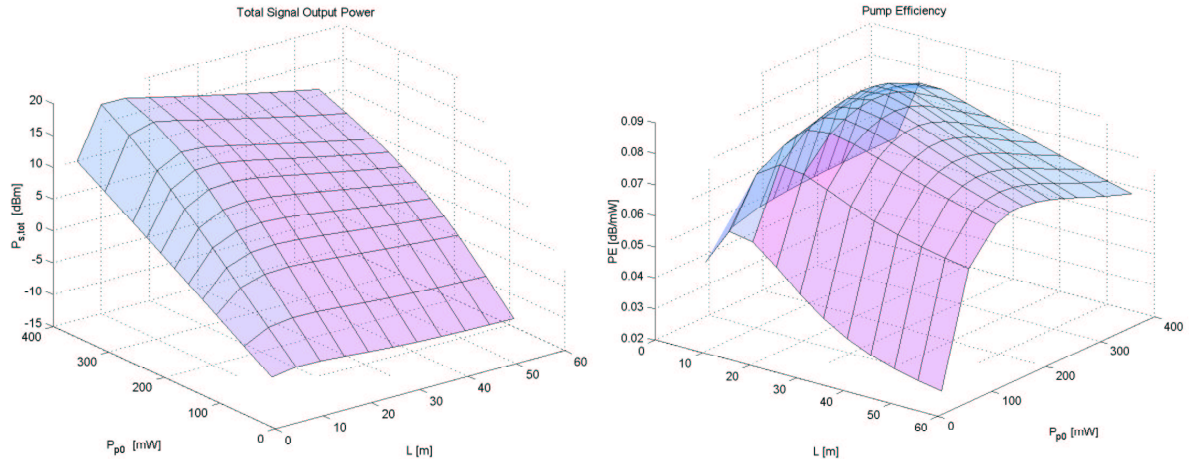


Fig. 2. (a) Potenza totale del segnale in uscita dall'amplificatore. (b) Efficienza di conversione della potenza di pompa ($\lambda = 1064 \text{ nm}$).

configurazione ottima dell'amplificatore in esame, si è considerato un amplificatore a doppio stadio costituito da due stadi identici aventi ciascuno $L = 20 \text{ m}$ e $P_{p0} = 250 \text{ mW}$. lo spettro di guadagno del primo stadio e del secondo è riportato in Fig. 3(a). In Fig. 3(b) è mostrato lo spettro di guadagno per l'amplificatore doppio stadio. Dai risultati si conclude che è possibile ottenere un guadagno superiore a 25 dB su una banda compresa tra 1450 nm e 1500 nm . È stato sviluppato anche un modello a 5 livelli in grado di descrivere con maggiore accuratezza tutte le transizioni tra i livelli energetici del Tm^{3+} mostrati in Fig. 1(a). Tuttavia, questo modello necessita di un numero maggiore di dati di ingresso, sia per le sezioni d'urto che per i tempi di vita, che attualmente non sono tutti reperibili in letteratura, nè facilmente misurabili. In futuro, se ulteriori dati sperimentali saranno disponibili, sarà possibile confrontare i risultati dei due modelli ed evidenziare eventuali pregi o limiti del modello qui proposto. Il modello del TDFA può inoltre, con alcune semplici modifiche, essere impiegato anche nel caso di presenza di co-droganti. Infatti, sembra essere interessante la possibilità di co-drogare la fibre con ioni Ho^{3+} al fine di ridurre il tempo di vita del livello terminale 3F_4 senza però modificare quello del livello iniziale 3H_4 [9].

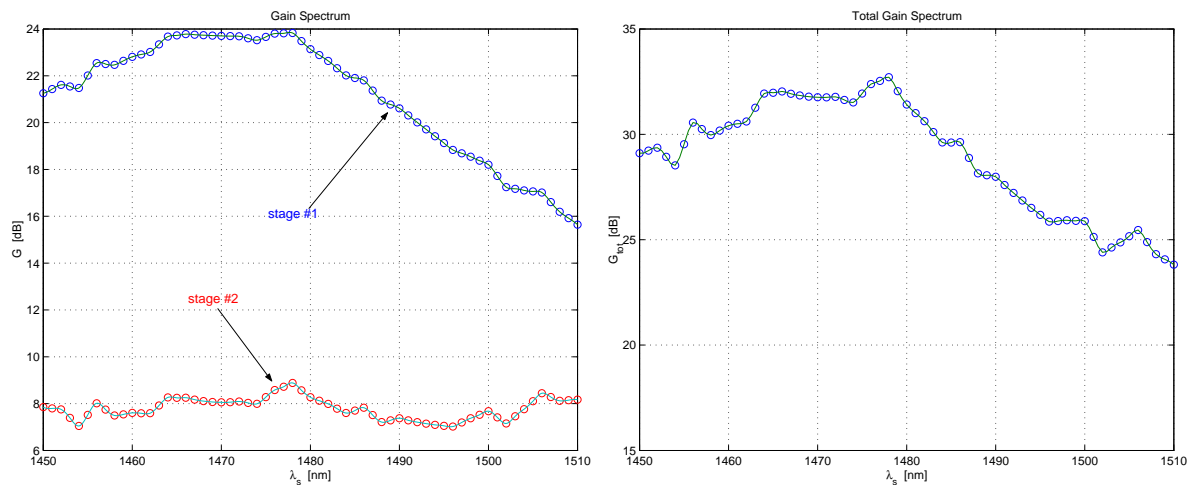


Fig. 3. (a) Spettro di guadagno del primo e del secondo stadio. (b) Guadagno totale all'uscita dell'amplificatore a doppio stadio.

Bibliografia

1. Y. Ohishi, A. Mori, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida and K. Oikawa, "Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5- μm broadband amplification", *Optics Letters*, vol.23, pp.274-276, February, 1998.
2. F. Roy, "Recent advances in thulium-doped fiber amplifiers", *OFC 2002*, paper ThZ1.
3. T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa and Y. Miyajima, "Upconversion Pumped Thulium-Doped Fluoride Fiber Amplifier and Laser Operating at 1.47 μm ", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.31, pp.1880-1889, November 1995.
4. T. Kasamatsu, Y. Yano and T. One, "Laser-diode pumping (1.4 and 1.56 μm) of gain-shifted thulium-doped fibre amplifier" *Electronics Letters*, vol.36, pp. 1607-1609, September 2000.
5. S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi and M. Shimizu, "Tm-Doped Fiber Amplifiers for 1470-nm-Band WDM Signals", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.12, pp. 1331-1333, October 2000.
6. F. Roy, D. Bayart, A. Le Sauze and P. Baniel, "Noise and Gain Band Management of Thulium-Doped Fiber Amplifier with Dual-Wavelength Pumping Scheme", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.13, pp.788-790, August 2001.
7. R.M. Percival, D. Szebesta and J.R. Williams, "Highly efficient 1064 μm upconversion pumped 1.47 μm thulium doped fluoride fibre laser", *Electronics Letters*, vol.30, pp. 1057-1058, June 1994.
8. C.R. Giles and E. Desurvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Journal of Lightwave Tech.*, vol. 9, pp. 271-283, February 1991.
9. S. Sudo, "Optical Amplifiers: Materials, Devices, and Applications", Artech House, 2000.