

# STUDIO DELLA DINAMICA DI AMPLIFICATORI IN FIBRA DROGATA CON ITTERBIO PER LASER AD ALTA POTENZA

F. Poli, D. Passaro, E. D'Elia, R. Pecori, A. Cucinotta, S. Selleri, A. Bononi

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Parma  
Viale G. P. Usberti, 43100 Parma  
stefano.selleri@unipr.it

## Abstract

*The dynamic behavior of single mode single cladding ytterbium-doped fiber amplifiers has been numerically investigated through a "Reservoir model". Simulation results have demonstrated the influence of pulse duration and frequency repetition on the amplifier characteristics.*

## INTRODUZIONE

I laser in fibra presentano numerosi vantaggi rispetto ai laser a stato solido tradizionali, come la migliore dissipazione del calore, dovuta al maggiore rapporto superficie/volume attivo, la qualità del fascio indipendente dalla potenza e da disturbi meccanici, il fattore di forma compatto e modulare, la possibilità di un packaging monolitico, e, infine, non sono necessari complessi allineamenti ottici. Queste caratteristiche fanno sì che le sorgenti in fibra trovino largo impiego in diverse applicazioni industriali, mediche e scientifiche [1]. In regime impulsato, i laser e gli amplificatori in fibra drogata presentano interessanti caratteristiche ad alta frequenza di ripetizione, con durata degli impulsi dell'ordine dei ns o anche inferiore, in quanto permettono di ottenere grande efficienza di conversione, alta energia, elevata potenza sia di picco che media.

In particolare, i laser e gli amplificatori in fibra drogata con itterbio (Yb) stanno diventando sempre più le sorgenti in fibra ad alta potenza preferite in numerose applicazioni. Per avere amplificazione a 1064 nm, gli ioni Yb possono essere pompati a 915 o 976 nm [2], entrambe le lunghezze d'onda sono di interesse pratico per la disponibilità di laser a semiconduttore. Catene di stadi di amplificatori in fibra sono spesso usate per amplificare l'uscita di un *seed* laser fino a potenze molto elevate. In questo caso i laser in fibra drogata con Yb consistono, principalmente, in un primo modulo con uno o più stadi di pre-amplificazione, con fibra drogata singolo modo a singolo cladding, e in un successivo stadio di booster in cui sono utilizzate fibre a doppio cladding [3]. Per ottenere un accoppiamento efficiente della pompa, la riduzione degli effetti nonlineari, un'alta efficienza di conversione e buone proprietà termiche è necessario ottimizzare le caratteristiche dei diversi stadi di amplificazione. Questo significa, da un lato individuare i componenti, come laser di pompa, multiplatori di lunghezza d'onda (*WDMs* - *Wavelength Division Multiplexers*), filtri e isolatori, aventi le caratteristiche ottimali, dall'altro ottimizzare il tipo di fibra drogata e la sua lunghezza. Inoltre è possibile realizzare la conversione di frequenza della radiazione emessa, mediante la generazione della seconda o terza armonica, allo scopo di ottenere una sorgente laser a 532 o 355 nm. Queste lunghezze d'onda sono infatti particolarmente interessanti per alcune microlavorazioni, quali lo scribing di celle solari. Lo schema di principio del laser è riportato in Fig.1(a), in cui per semplicità non

sono indicati isolatori e filtri, componenti che sono necessari sia per proteggere le sorgenti dalla radiazione riflessa, sia per ridurre l'emissione spontanea amplificata.

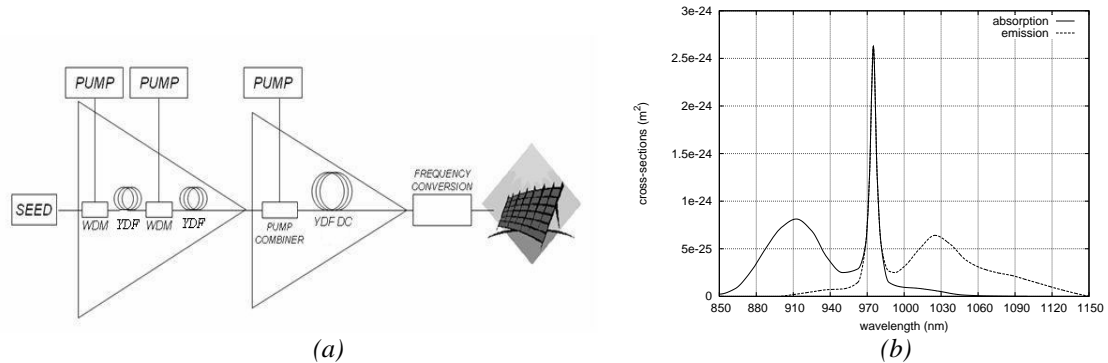


Fig. 1. (a) Schema dell'architettura del laser in fibra. I WDMs (Wavelength Division Multiplexers) sono utilizzati per accoppiare la radiazione di pompa nella fibra drogata con itterbio (YDF- Ytterbium Doped Fiber) che amplifica la radiazione a 1064 nm emessa dal seed. (b) Sezioni d'urto di assorbimento e di emissione dello ione  $Yb^{3+}$  nella silice.

Esistono diversi modelli che descrivono il comportamento continuous wave (CW) dei laser in fibra drogata con itterbio, ma non vi sono modelli che descrivano il comportamento dinamico, che è quello più importante dal punto di vista applicativo.

Nel presente lavoro si è sviluppato un modello per lo studio della dinamica di amplificatori e laser in fibra drogata con Yb, basato sul "Reservoir Model", già sviluppato con successo sia per gli amplificatori in fibra drogata con erbio [4], sia per gli amplificatori Raman [5], che per gli amplificatori ottici a semiconduttore [6]. Il modello è stato utilizzato allo scopo di comprendere come varino nel tempo le caratteristiche dell'amplificatore e ottimizzarle. In particolare, si è studiato come il guadagno, la lunghezza ottima della fibra e la potenza dell'ASE cambino al variare della durata degli impulsi e della frequenza di ripetizione.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

L'itterbio nella silice si presenta sotto forma di ione  $Yb^{3+}$  ed ha una struttura energetica molto semplice costituita da due sole molteplicità di livelli Stark. Nonostante vi siano comportamenti simili a quelli di un sistema a quasi tre livelli o quasi quattro livelli, si possono considerare solo le popolazioni dello stato fondamentale e dello stato eccitato insieme agli andamenti spettrali delle sezioni d'urto da 850 a 1150 nm [2]. Il grafico di Fig.1 (b) mostra come lo spettro della cross-section di assorbimento abbia due picchi a 915 e 975 nm, mentre la cross-section di emissione presenta due massimi a 975 e 1030 nm. La configurazione dell'amplificatore studiato prevede una pompa co-propagante CW a 976 nm ed un segnale impulsato a 1064 nm, quindi con lunghezza d'onda nella parte discendente dello spettro di emissione. La fibra drogata considerata ha le caratteristiche tipiche di una fibra commerciale: raggio di core  $a = 3\mu\text{m}$ , apertura numerica  $NA = 0.11$ , assorbimento  $\alpha = 250\text{dB/m}$  a 975 nm, corrispondente ad una concentrazione del drogante  $N_T = 2.85 \times 10^{25}$  ioni/ $\text{m}^3$  considerando come valore dell'integrale di overlap a 975 nm  $\Gamma = 0.77$  [7].

La potenza di picco del segnale è di circa 390 mW, corrispondente ad una potenza media di 0.156 mW o -8 dBm quando la durata dell'impulso è  $\tau = 20$  ns e la repetition rate  $f = 20$  kHz. La lunghezza della fibra drogata  $L$  è stata fatta variare da 1 a 3 m, per  $\tau = 20, 40, 100$  ns e  $f = 20, 40, 100$  kHz. Come riportato nei grafici di Fig.2, la potenza

media di uscita del segnale cresce all'aumentare sia della durata che della frequenza degli impulsi, come atteso. Si ottiene una potenza media di quasi 20dBm per  $L=3$  m,  $\tau=100$  ns e  $f=20$  kHz.

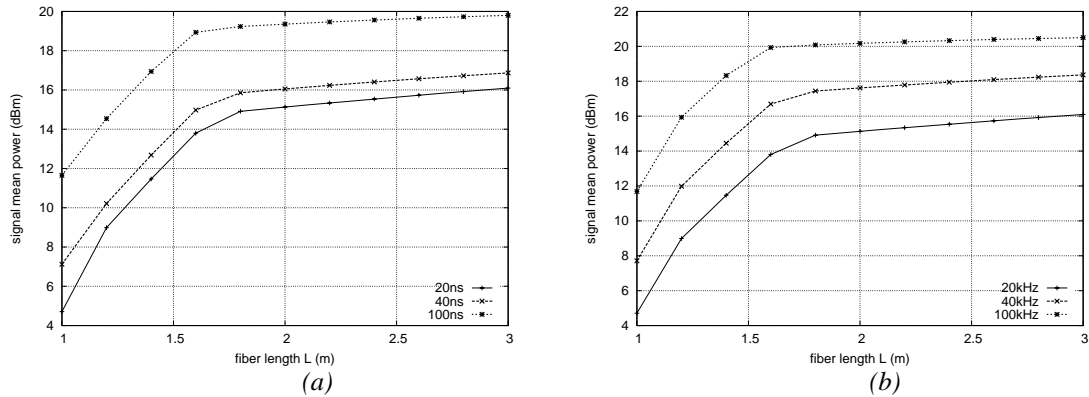


Fig. 2. (a) Potenza media del segnale in uscita, al variare della lunghezza della fibra drogata, per  $\tau=20, 40, 100$  ns e  $f=20$  kHz; (b) per  $\tau=20$  ns e  $f=20, 40, 100$  kHz. La potenza di picco del segnale emesso dal seed in ingresso alla fibra è 390 mW, la potenza di pompa CW è 300 mW.

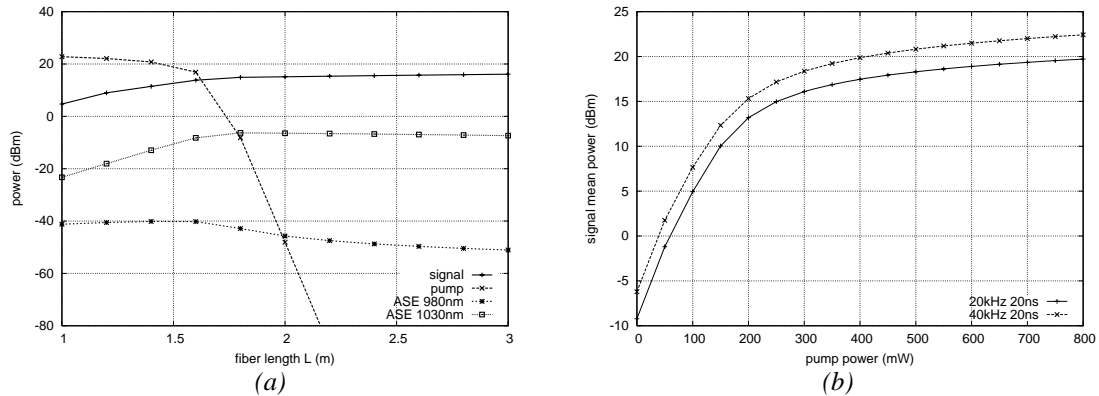


Fig. 3. (a) Potenza media di uscita del segnale, della pompa e dell'ASE a 980 e 1030 nm, al variare della lunghezza della fibra drogata, per  $\tau=20$  ns e  $f=20$  kHz, la potenza di pompa CW è fissata a 300 mW. (b) Potenza media di uscita del segnale al variare della potenza di pompa per  $\tau=20$  ns e  $f=20, 40$  kHz,  $L=3$  m.

Come si deduce dai risultati riportati in Fig.3(a), la potenza di pompa residua in uscita dalla fibra per  $\tau=20$  ns e  $f=20$  kHz è praticamente nulla per L superiore a 1.8m, mentre il leggero aumento della potenza media di segnale è dovuto all'ASE a basse lunghezze d'onda che funge da pompa. Questo comportamento è confermato dall'andamento della potenza dell'ASE a 980 e 1030 nm, riportato in Fig.3(a). Si nota, infatti, che al crescere della lunghezza della fibra la potenza dell'ASE diminuisce. Ciò è dovuto al fatto che la parte finale della fibra per L maggiore di 2 m si comporta come un pezzo di fibra un-pumped che assorbe la radiazione che si propaga in essa, tale assorbimento è particolarmente forte attorno a 980nm. In Fig.3(b) è mostrata la potenza media di segnale in uscita in funzione della potenza di pompa, anche in questo caso la potenza di picco del segnale in ingresso è 390mW. La potenza di pompa è stata fatta variare da 1mW, praticamente assenza di popolazione, a 800mW. Si nota che la pendenza della curva mostra un cambio di pendenza a circa 250mW, oltre tale potenza di pompa l'amplificatore tende a saturare.

Il modello dinamico permette di analizzare come varia nel tempo la potenza di picco del segnale in uscita dall'amplificatore. Come illustrato in Fig. 4, i primi impulsi sono soggetti ad un guadagno superiore rispetto ai successivi; ciò in quanto la popolazione del secondo livello si svuota più velocemente a favore del segnale. La durata del transitorio tende ad aumentare al crescere della frequenza, mentre tende a ridursi con l'aumentare della potenza di pompa. In ogni caso, dopo circa 1 ms, la potenza in uscita tende a stabilizzarsi, anche nel caso di  $f=100\text{ kHz}$ -

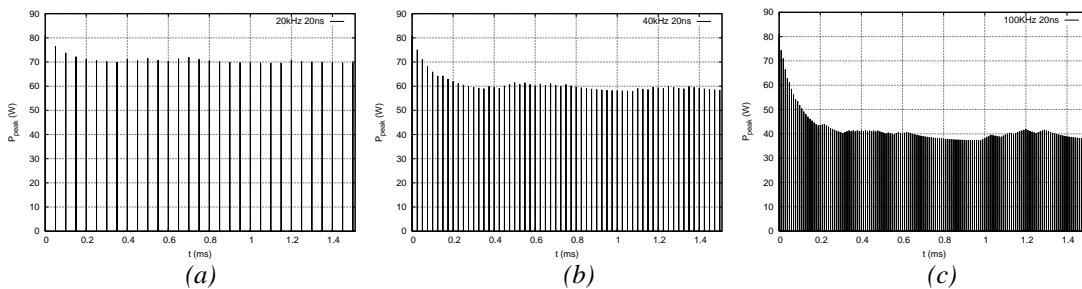


Fig. 4. Potenza di picco del segnale in uscita al variare del tempo per  $\tau=20\text{ ns}$ , (a)  $f=20\text{ kHz}$ ; (b)  $f=40\text{ kHz}$ ; (c)  $f=100\text{ kHz}$ . La potenza in ingresso alla fibra è  $390\text{ mW}$ , la potenza di pompa CW è  $300\text{ mW}$ ,  $L=3\text{ m}$ .

## CONCLUSIONI

Il regime dinamico di un amplificatore in fibra singolo modo e singolo cladding drogata con Yb è stato accuratamente analizzato mediante un modello basato sul “Reservoir Model”. I risultati delle simulazioni hanno dimostrato che la potenza media in uscita è fortemente dipendente dalla durata e dalla frequenza degli impulsi, per cui i modelli CW dell'amplificatore non possono essere utilizzati per lo studio di laser impulsati. Inoltre è stato dimostrato che la potenza di picco degli impulsi in uscita dall'amplificatore si stabilizza dopo un transitorio di circa  $0.5\text{ ms}$ . Il modello sviluppato verrà in seguito applicato allo studio di più stadi di amplificazione.

## BIBLIOGRAFIA

1. J. Limpert et al, “The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, pp. 537-545, May/June 2007.
2. R. Paschotta et al, “Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 33, pp. 1049-1056, July 1997.
3. H. Po et al, “Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array”, in *Optical Fiber Communication Conference*, vol. 5 of 1989 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1989), paper PD7.
4. A. Bononi et al, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, pp. 945-956, May 1998.
5. W. Mathlouthi et al, “Fast and Efficient Dynamic WDM Semiconductor Optical Amplifier Model”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 4354-4365, Nov. 2006.
6. A. Bononi et al, “Transient gain dynamics in saturated Raman amplifiers,” *Optical Fiber Technol.*, vol. 10, issue 1, pp. 91-123, Jan. 2004.
7. A. Cucinotta et al, “Amplification Properties of Er<sup>3+</sup> doped Photonic Crystal Fibers”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, n. 3, pp. 782-788, March 2003.