

# LASER IMPULSATI IN FIBRA DROGATA CON ITTERBIO

D. Passaro, M. Sozzi, E. Coscelli, F. Poli, A. Cucinotta, A. Bononi, S. Selleri  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione – Università di Parma,  
viale G.P. Usberti 181/A, 43100 - Parma

*The dynamic behaviour of multi-stage ytterbium-doped fiber amplifiers has been numerically investigated through a "Reservoir model". Theoretical and experimental results have demonstrated the effect of pulse duration and frequency repetition on the amplifier characteristics.*

## 1. Introduzione

I laser in fibra trovano sempre più largo impiego in diverse applicazioni industriali, mediche e scientifiche, grazie ai loro numerosi vantaggi rispetto ai laser a stato solido tradizionali. Tra le principali prerogative dei laser in fibra si possono ricordare la migliore dissipazione del calore, dovuta al maggiore rapporto superficie/volume attivo, l'alta qualità del fascio, indipendente dalla potenza e da disturbi meccanici, il fattore di forma compatto e modulare, la possibilità di un packaging monolitico grazie all'assenza di complessi allineamenti ottici, la possibilità di lavorazione a distanza e i ridotti costi di manutenzione [1]. In particolare, i laser e gli amplificatori in fibra drogata con itterbio (Yb) stanno diventando sempre più le sorgenti ad alta potenza preferite in numerose applicazioni. Per avere amplificazione a  $1064\text{ nm}$ , gli ioni Yb possono essere pompati a  $915$  o  $976\text{ nm}$  [2]; entrambe le lunghezze d'onda sono di interesse pratico per la disponibilità di laser a semiconduttore. Con lo sviluppo delle fibre *double-cladding* (DC) e dei diodi di pompa ad alta potenza, sono stati realizzati laser in fibra con potenze di uscita dell'ordine delle centinaia di  $W$  in regime CW [3], e con impulsi ad energia di alcuni  $mJ$  in regime impulsato [4].

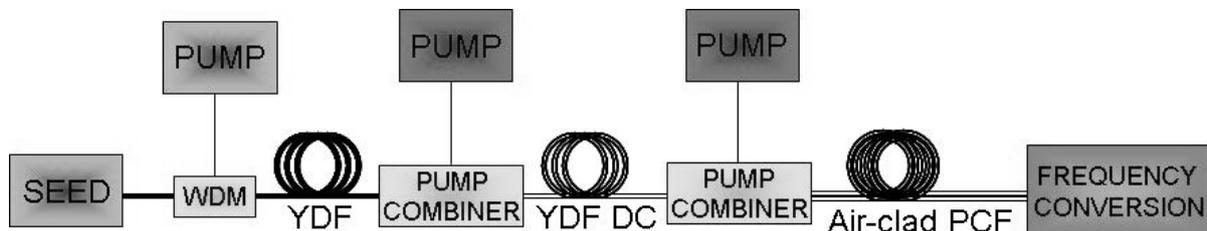


Figura 1: Schema di principio di una catena di amplificatori in fibra drogata con itterbio.

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 [5]. Per ottenere un accoppiamento efficiente della pompa, la riduzione degli effetti non lineari, un'alta efficienza di conversione e buone proprietà termiche è necessario ottimizzare le caratteristiche dei diversi stadi di amplificazione e scegliere fibre con caratteristiche fisiche appropriate. Questo significa 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  $355\text{ nm}$ , lunghezze d'onda particolarmente interessanti per alcune microlavorazioni. Lo schema di principio del laser è riportato in Fig. 1. Nel presente lavoro si è utilizzato un modello per lo studio della dinamica di amplificatori e laser in fibra drogata con Yb, basato sul "Reservoir Model", già sviluppato con successo per gli amplificatori in fibra drogata con erbio [6]. Il modello è stato utilizzato allo scopo di comprendere i fattori e le variabili che incidono principalmente sulle prestazioni

dell'amplificatore. In particolare, si sono studiati tre diversi stadi di amplificazione, uno realizzato con una fibra drogata con Yb a singolo cladding, un altro caratterizzato da una fibra a doppio cladding, e, infine, nell'ultimo caso, si è considerata una innovativa fibra a cristallo fotonico di tipo *air-cladding*.

## 2. Fibra a singolo cladding

La configurazione dell'amplificatore studiato prevede una pompa co-propagante CW a 976 nm ed un segnale impulsato a 1064 nm. La fibra drogata a singolo cladding considerata ha le seguenti caratteristiche: raggio di core  $a = 3 \mu\text{m}$ , apertura numerica  $NA = 0.11$ , coefficiente di assorbimento di 250 dB/m a 975 nm, corrispondente ad una concentrazione del drogante  $N_T = 2.85 \times 10^{25} \text{ ioni/m}^3$ , considerando come valore dell'integrale di overlap a 975 nm  $\Gamma_p = 0.77$  [7]. La potenza di picco del segnale è di circa 600 mW, corrispondente ad una potenza media di -6.2 dBm quando la durata dell'impulso è  $\tau = 20 \text{ ns}$  e la repetition rate  $RR = 20 \text{ kHz}$ . Con questi dati è stato possibile utilizzare il modello a *reservoir* per determinare i valori ottimi sia della potenza di pompa che della lunghezza della fibra drogata. Dalla Fig. 2(a) risulta che la lunghezza L ottima della fibra drogata risulta essere di circa 2 m, in quanto dopo tale lunghezza la potenza di pompa è completamente assorbita.

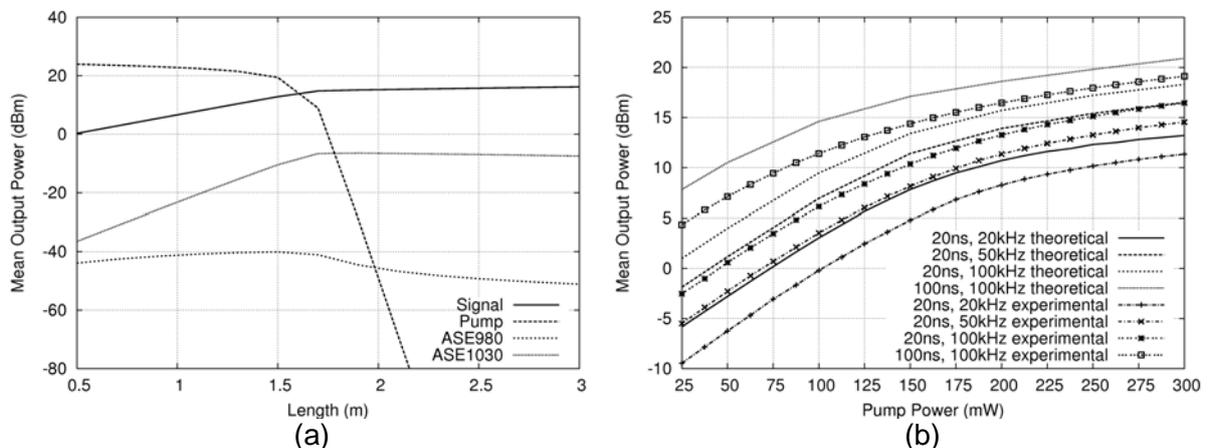


Figura 2: (a) Potenza media di uscita del segnale, della pompa, dell'ASE a 980 e 1030 nm in funzione della lunghezza della fibra drogata per  $\tau = 20 \text{ ns}$  e  $RR = 20 \text{ kHz}$  con potenza di pompa CW pari a 300 mW. (b) Confronto tra il modello teorico e i dati sperimentali della potenza media di uscita del segnale in funzione della potenza di pompa al variare della frequenza di ripetizione  $RR$  con  $L = 2 \text{ m}$ .

Come si deduce dai risultati riportati in Fig. 2(a), la potenza di pompa residua in uscita dalla fibra è praticamente nulla per L superiore a 2 m, mentre il leggero aumento della potenza media di segnale è dovuto all'ASE a basse lunghezze d'onda che funge da pompa. Si nota, infatti, che al crescere della lunghezza della fibra la potenza dell'ASE a 980 nm 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 *unpumped* che assorbe la radiazione che si propaga in essa.

Per convalidare il modello numerico, i dati teorici sono stati confrontati con quelli ottenuti sperimentalmente in laboratorio al netto della potenza di ASE. In Fig. 2(b) è riportata la potenza media in funzione della potenza di pompa, per diversi valori di  $\tau$  e  $RR$ . Sperimentalmente si è ottenuta una potenza media di uscita massima di 19.5 dBm per  $\tau = 100 \text{ ns}$ ,  $RR = 100 \text{ kHz}$ . In Fig. 2(b) si può osservare il confronto tra i dati teorici e quelli sperimentali. È importante sottolineare che nel modello numerico per il segnale a 1064 nm si sono considerate delle perdite pari a 1 dB, dovute alle splices e alle perdite di inserzione dell'isolatore e del WDM. Per quanto riguarda la potenza di pompa, invece, nel modello non si sono considerate le perdite, pertanto i risultati numerici sono da interpretare come un *upperbound*.

### 3. Fibra a doppio cladding

Il secondo stadio di amplificazione considerato è costituito da una fibra drogata con itterbio a doppio cladding. Questo tipo di fibra permette di utilizzare un diodo di pompa multimodo. In questo caso per poter accoppiare la potenza di pompa multimodo a  $915\text{ nm}$  con il segnale singolo modo a  $1064\text{ nm}$  è necessario utilizzare un *pump combiner* (1+1)x1 che combini in modo efficiente la potenza di segnale proveniente da una fibra standard HI1060 con la potenza di pompa proveniente da una fibra multimodo con un core avente diametro di  $105\text{ }\mu\text{m}$  su un'unica fibra DC con un core del diametro di  $6\text{ }\mu\text{m}$  e un cladding interno con diametro di  $105\text{ }\mu\text{m}$ . In questo caso la fibra DC risulta essere più lunga rispetto allo stadio precedente, sia per una diversa lunghezza d'onda del diodo di pompa, sia per i diversi valori di potenza in gioco. La fibra presa in esame presenta un integrale di overlap a  $915\text{ nm}$  pari a  $1.93 \times 10^{-3}$ , corrispondente al rapporto tra l'area del core e l'area del cladding interno, e una concentrazione di drogante di  $1.4 \times 10^{26}\text{ ioni/m}^3$ . In Fig. 3(a) e 3(b) è possibile confrontare l'andamento temporale del *resevoir* normalizzato e del segnale impulsato con  $\tau = 20\text{ ns}$  e  $RR = 20\text{ kHz}$  quando viene iniettata una potenza di pompa pari a  $3\text{ W}$  in una fibra DC con  $L = 5\text{ m}$ . È facile notare come il *resevoir* si svuoti molto velocemente in corrispondenza dell'impulso del segnale. In Fig. 3(c) è mostrato l'andamento della potenza media di uscita che è possibile raggiungere con un segnale impulsato in funzione della potenza di pompa multimodo.

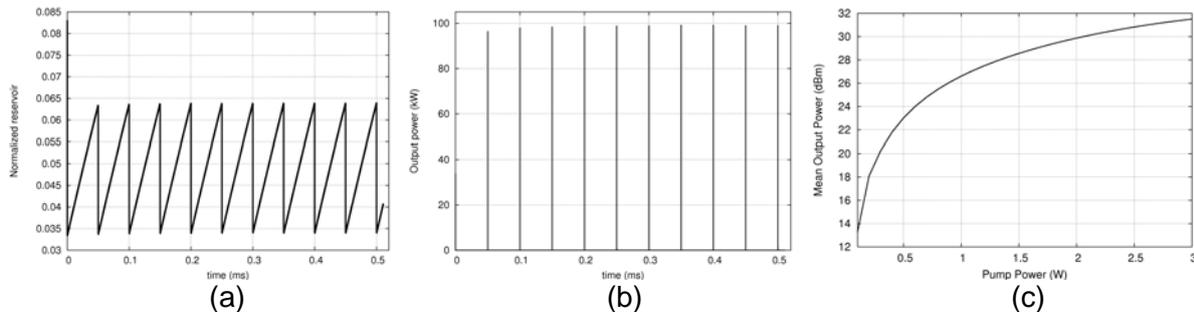


Figura 3: Andamento temporale (a) del *resevoir* normalizzato e (b) del segnale impulsato con  $\tau = 20\text{ ns}$  e  $RR = 20\text{ kHz}$  che si propaga su  $5\text{ m}$  di fibra DC con potenza di pompa pari a  $3\text{ W}$ . (c) Potenza media in uscita dal secondo stadio di pre-amplificazione in funzione della potenza di pompa multimodo.

### 4. PCF air-cladding

Le fibre a cristallo fotonico (*Photonic Crystal Fibers* - PCF) rappresentano una promettente soluzione tecnologia per lo stadio ad alta potenza. Una delle più profonde differenze tra le PCFs e le fibre ottiche standard è la possibilità di realizzare fibre singolo modo in silice pura con grande area modale, le cosiddette fibre LMA (Large Mode Area) [8,9]. Le PCF LMA permettono di avere guidaggio in regime monomodale con valori del *mode field diameter* (MFD) superiori a  $50\text{ }\mu\text{m}$ , quindi con una notevole riduzione degli effetti non lineari, come il Raman e il Brillouin scattering. Proprio per questi vantaggi è stata studiata una possibile tipologia di fibra da utilizzare in questo ultimo stadio di potenza che è la cosiddetta *rod-type* PCF, la cui sezione trasversa è mostrata in Fig. 4(a). Questa fibra si definisce *air-cladding* poiché il cladding esterno è costituito da un giro di fori d'aria; il core ha un diametro di  $60\text{ }\mu\text{m}$ . Tramite il metodo degli elementi finiti, sono stati calcolati i valori degli integrali di *overlap* utilizzati come dati di ingresso per il modello dinamico. In particolare per la pompa a  $976\text{ nm}$  si è ottenuto  $\Gamma_p = 0.12$ , mentre per il segnale a  $1064\text{ nm}$   $\Gamma_s = 0.9$ . La concentrazione di  $\text{Yb}$  è uguale a  $4.39 \times 10^{25}\text{ ioni/m}^3$ , raggio di core pari a  $30\text{ }\mu\text{m}$ , la lunghezza della fibra drogata è  $1.5\text{ m}$ , la potenza media del segnale  $3\text{ W}$ , con impulsi a gradino della durata di  $20\text{ ns}$  e una  $RR = 20\text{ KHz}$ , la potenza di pompa pari a  $80\text{ W}$ . Il modello dinamico può essere utilizzato per analizzare l'evoluzione temporale degli impulsi all'uscita dell'amplificatore. In particolare, la saturazione dinamica del guadagno causa la distorsione del profilo dell'impulso in uscita,

come mostrato in Fig. 4(b). Si può notare come all'uscita da questo ultimo stadio di amplificazione è possibile raggiungere valori della potenza di picco particolarmente elevati, pari a circa  $0.45 \text{ MW}$ , corrispondenti ad una energia per impulso di  $3.35 \text{ mJ}$ .

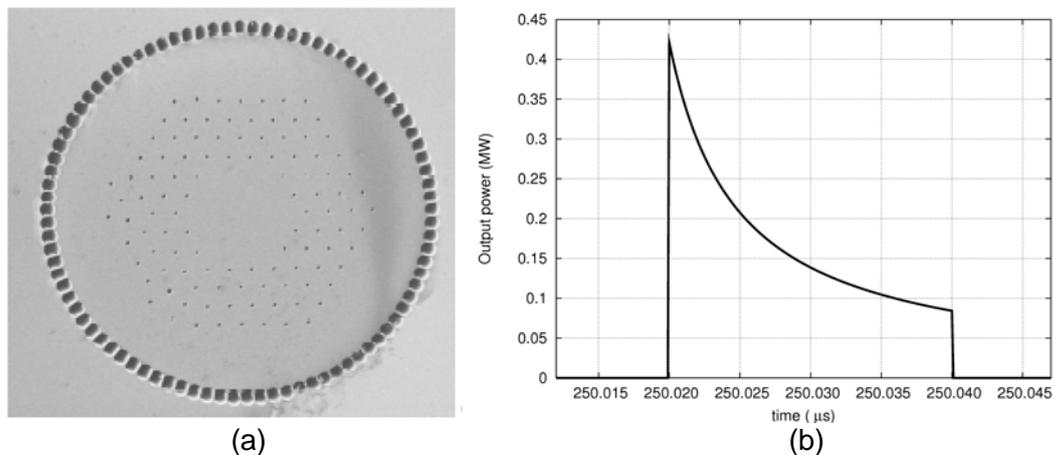


Figura 4: (a) Sezione trasversale della rod-type PCF air-cladding [8]. (b) Profilo temporale della potenza istantanea dell'impulso in uscita, l'energia dell'impulso è circa  $3.35 \text{ mJ}$ .

## 5. Conclusioni

Il regime dinamico di diversi amplificatori in fibra drogata con Yb è stato 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. Poiché in alcune applicazioni industriali la precisa forma temporale dell'impulso può essere un fattore critico, il modello qui presentato può essere utilizzato per prevedere il profilo temporale dell'impulso in uscita dal laser in fibra.

## Bibliografia

- [1] J. Limpert et al, "The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, May/June 2007, pp. 537-545.
- [2] R. Paschotta et al, "Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 33, July 1997, pp. 1049-1056.
- [3] Y. Jeong et al, "Single-mode plane-polarized ytterbium-doped large-core fiber laser with 633-W continuous-wave output power", *Optics Letters*, Vol. 30, 2005, pp.955-957.
- [4] J. Limpert et al., "High-average-power millijoule fiber amplifier system", in *Proc. Conf. Lasers Electro-Optics (CLEO)*, Vol. 1, 2002, pp. 591-592.
- [5] 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.
- [6] A. Bononi et al, "Doped-Fiber Amplifier Dynamics: A System perspective", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, May 1998, vol. 16, pp. 945-956.
- [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, March 2003, pp. 782-788.
- [8] J. Limpert et al, "Extended single-mode photonic crystal fiber lasers", *Optics Express*, vol. 14, pp. 2715-2720, April 2006.
- [9] F. Poli, A. Cucinotta, D. Passaro, S. Selleri, J. Lægsgaard, J. Broeng, "Rare-earth doped rod-type PCFs," *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 15, January/February 2009, pp. 54-60.