

# Studio e Caratterizzazione Sperimentale di Transitori in Amplificatori Raman

M. Fuochi, A. Bononi, D. Pontiroli, J. S. Tassé, S. Selleri, A. Cucinotta

*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:** *In this paper the results of a theoretical and experimental characterization of Raman amplifiers are presented. In particular the analysis is focused on the study of transient gain dynamics in saturated Raman amplifiers.*

## Introduzione

La capacità degli attuali sistemi ottici WDM è prevalentemente limitata dalla banda di guadagno degli amplificatori in fibra drogata con erbio (EDFAs). Per superare questo problema la ricerca si è indirizzata verso tecniche di amplificazione ottica alternative. In particolare la realizzazione di sorgenti laser stabili, ad elevata potenza di emissione e a costi accessibili ha consentito la rapida diffusione degli amplificatori Raman nei sistemi di telecomunicazione in fibra ottica. L'interesse verso questa tipologia di amplificatori si è accresciuto in quanto attraverso schemi a pompaggio multiplo si possono realizzare amplificatori a larga banda di guadagno e ridotta figura di rumore [1]. Inoltre, il fatto che la posizione spettrale delle bande di guadagno degli amplificatori Raman, a differenza di quelle degli EDFAs, non siano vincolate dal materiale ottico impiegato, ma dipendano unicamente dalle sorgenti di pompa, consente di utilizzarli per amplificazione anche in bande non convenzionali dove i tradizionali EDFAs non riescono ad operare. Un'altra caratteristica significativa risiede nella possibilità di realizzare, oltre ad apparati di amplificazione concentrata, anche amplificatori Raman distribuiti. L'amplificazione Raman distribuita ha un'enorme importanza soprattutto nei sistemi di trasmissione a lunga distanza, ad esempio nelle tratte transoceaniche, perchè favorisce un miglioramento delle prestazioni complessive, il che si traduce nella possibilità di estendere la lunghezza delle tratte trasmissive o effettuare l'up-grading di sistemi preesistenti.

Un aspetto di notevole importanza riguarda lo studio della dinamica negli amplificatori, poichè i transitori di potenza dei canali amplificati possono causare malfunzionamenti del sistema. Molteplici studi sono stati condotti riguardanti la dinamica del guadagno negli amplificatori in fibra drogata con erbio [2] e recentemente anche negli amplificatori Raman in configurazioni di pompaggio contropropagante [3], [4]. Per questi ultimi gli effetti di transitorio sono dovuti allo svuotamento che il campo di pompa subisce ad opera dell'elevato valore di potenza del segnale. Cosicchè, se il segnale in ingresso all'amplificatore Raman è modulato in intensità ed è ad alta potenza, il corpo centrale del pacchetto vede un guadagno inferiore rispetto al fronte iniziale poichè risente dello svuotamento subito della pompa. Questi transitori, con modalità del tutto analoghe, sono presenti anche nel caso di pompa copropagante. Tuttavia i transitori del segnale nel caso di amplificazione Raman copropagante sono molto più rapidi rispetto al caso di configurazione contropropagante. La differenza è legata al differente valore del parametro di walk off che è indice dello sfasamento tra i segnali e la pompa che si propagano con velocità di gruppo diverse.

In questo articolo vengono presentati i risultati ottenuti dal lavoro teorico e sperimentale svolto sugli amplificatori Raman in fibra ottica ed in particolare le misure riguardanti la dinamica di guadagno quando l'amplificatore lavora in saturazione. Inizialmente si sono caratterizzate alcune tipologie di fibre ritenute significative per ottenere guadagno Raman. Successivamente, scelta la fibra che permette di ottenere le migliori prestazioni, si è allestito un banco per effettuare la misura dei transitori presenti sul segnale amplificato confrontando i risultati con quelli ottenuti tramite simulazioni numeriche.

## Misura del coefficiente di guadagno Raman

Si consideri il caso di amplificazione Raman con una pompa ed un segnale a potenza costante. Se la potenza di segnale è significativamente inferiore a quella di pompa, cioè si può ritenere valida la condizione di non svuotamento della pompa, il guadagno on-off, definito come il rapporto tra la potenza del segnale d'uscita

quando la pompa è accesa e spenta, può essere espresso come:

$$G_{onoff} = e^{\left(\gamma_r P_0 \frac{1-e^{-\alpha_p L}}{\alpha_p}\right)} \quad (1)$$

dove  $\gamma_r = \frac{g_r}{A_{eff}}$  è il coefficiente di guadagno Raman della fibra misurato in  $[W^{-1}m^{-1}]$ ,  $P_0$  è la potenza di pompa iniettata in fibra, mentre il termine  $\frac{1-e^{-\alpha_p L}}{\alpha_p}$  è la cosiddetta lunghezza efficace dove compaiono l'attenuazione alla lunghezza d'onda della pompa  $\alpha_p$  e la lunghezza  $L$  della fibra. Nel caso di segnali d'ingresso non copolarizzati è necessario introdurre nell'argomento dell'esponenziale un coefficiente  $0 \leq k_{pol} \leq 1$  che tenga conto di una riduzione dell'interazione dovuto allo scrambling di polarizzazione tra pompa e segnale. In particolare per sorgenti depolarizzate  $k_{pol} = \frac{1}{2}$ . Misurando il guadagno on-off a diverse lunghezze d'onda di segnale per una data fibra, note l'attenuazione  $\alpha_p$  e la potenza d'ingresso di pompa  $P_0$ , attraverso l'eq. (1) è possibile risalire all'andamento spettrale del coefficiente di guadagno Raman. Il banco adottato è mostrato in Fig. 1 (a).

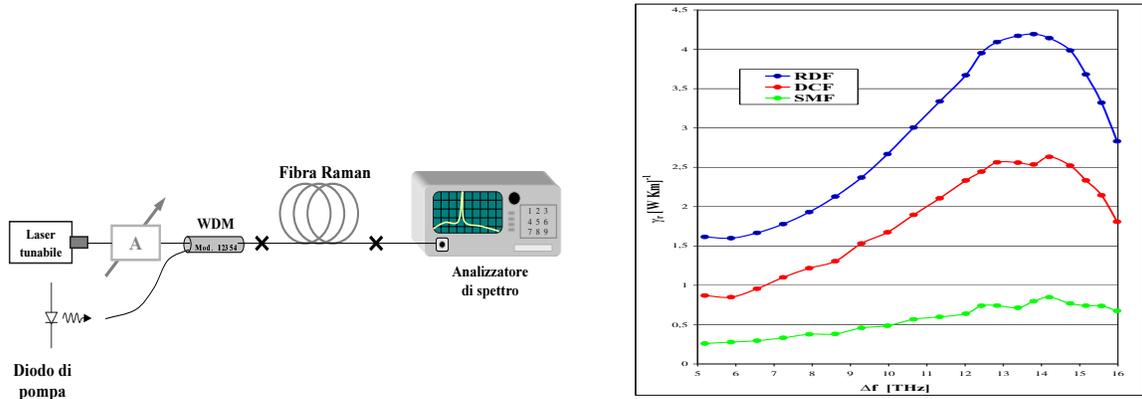


Fig. 1. (a) Setup sperimentale per la misura del coefficiente di guadagno Raman e (b) andamento del coefficiente di Guadagno Raman in funzione della separazione spettrale pompa-segnale.

Come sorgente di pompa si utilizza un diodo laser depolarizzato, a banda larga (10nm) e con picco di emissione centrato a 1490 nm, mentre il segnale di amplificazione viene generato da un laser accordabile con lunghezza d'onda di emissione compresa tra 1490-1600 nm. Il segnale e la pompa sono accoppiati alla fibra di amplificazione attraverso un WDM. La massima potenza di pompa emessa è pari a 250 mW, mentre quella d'ingresso in fibra, valutata note le perdite di inserzione del WDM e dei giunti d'ingresso, è di circa 180 mW. Sulla linea di segnale è collocato un attenuatore variabile che consente di fissare una potenza d'ingresso di segnale pari a -20 dBm, sufficientemente ridotta da poter considerare la condizione di non svuotamento della pompa, ma anche non eccessivamente bassa da diventare confrontabile con la potenza di rumore ASE. I valori della potenza di segnale in uscita dalla fibra con pompa accesa e spenta sono registrati attraverso un analizzatore di spettro ottico (OSA). Sono state effettuate misure su tre tipologie di fibre differenti: fibra standard (SMF)  $L=2.5$  Km, fibra a compensazione di dispersione (DCF)  $L=5$  Km, fibra a dispersione inversa (RDF)  $L=10$  Km. In Fig. 1 (b) sono raffigurati gli andamenti del coefficiente di guadagno Raman in funzione della separazione in frequenza tra pompa e segnale per le tre fibre caratterizzate. Si può osservare che la fibra con le migliori caratteristiche amplificative è la RDF che pertanto è stata selezionata come fibra da utilizzarsi per le misure riguardanti la dinamica di guadagno.

## Dinamica di guadagno Raman

Il sistema di equazioni che descrive l'interazione di un segnale ed una pompa per effetto Raman nel caso generale in cui le potenze possono variare nel tempo (ad esempio per effetto di una modulazione o di un disturbo sovrapposto al segnale utile) è il seguente [5]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial}{\partial t}\right) P(t, z) = \pm [\alpha_p + \hat{\gamma}_r S(t, z)] P(t, z) \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial}{\partial t} \right) S(t, z) = [-\alpha_s + \gamma_r P(t, z)] S(t, z) \quad (3)$$

dove  $P(t, z)$  e  $S(t, z)$  sono le potenze di pompa e di segnale [W] all'istante  $t$  e alla coordinata  $z$ ,  $v_p$  e  $v_s$  sono le velocità di gruppo di pompa e di segnale,  $\alpha_p$  e  $\alpha_s$  i coefficienti di attenuazione di pompa e di segnale,  $\gamma_r$  è il coefficiente di guadagno Raman [ $W^{-1}m^{-1}$ ] tra la pompa ( $\lambda_p$ ) e il segnale ( $\lambda_s$ ) mentre  $\hat{\gamma}_r = \gamma_r \frac{\lambda_s}{\lambda_p}$ . Il segno "+" nella (2) si riferisce al caso di pompaggio contropropagante, in cui  $v_p < 0$ , mentre il segno "-" al caso di pompaggio copropagante, in cui  $v_p > 0$ . Nel sistema sono stati volutamente trascurati i termini di rumore ASE e Rayleigh Back Scattering perché non incidono in modo significativo sui risultati che si ottengono [4]. Se si considera la trasmissione in fibra di un segnale modulato in intensità, risolvendo numericamente il sistema (2) e (3), è possibile valutare i transitori presenti sul segnale amplificato. Si noti che gli effetti di dinamica sul segnale sono legati alla saturazione dell'amplificatore e quindi la loro entità è tanto maggiore quanta più potenza di segnale è accoppiata in fibra. A differenza, però, della saturazione presente negli EDFAs, negli amplificatori Raman è anche richiesta un'elevata potenza di pompa, affinché sia significativa l'interazione, per effetto Raman, tra pompa e segnale. In Fig. 2 si mostrano i risultati delle simulazioni che si ottengono

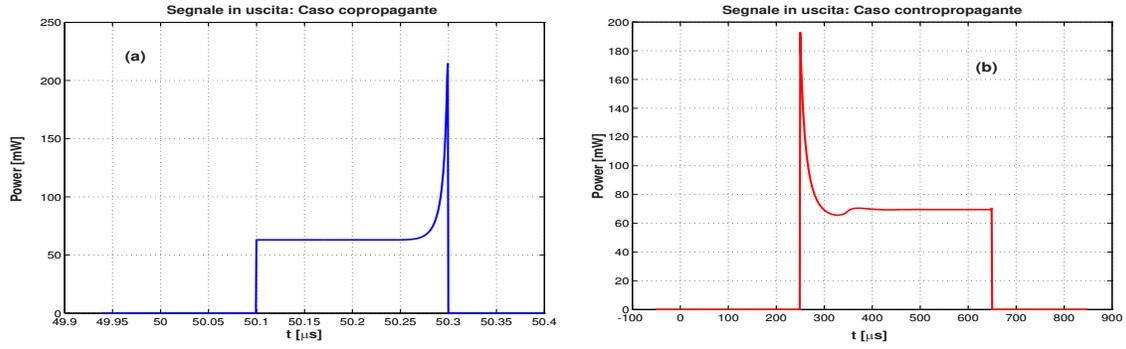


Fig. 2. Transitori sul segnale amplificato nel caso di amplificazione co- (a) e contropropagante (b). Fibra DCF,  $L=10$  Km; potenze d'ingresso: pompa  $P_0 = 480$  mW, segnale  $S_0 = 0$  dBm.

nel caso di pompa co- (Fig. 2(a)) e contropropagante (Fig. 2(b)) per una fibra DCF,  $L = 10$  Km,  $\gamma_r = 3.2$  [ $W^{-1}m^{-1}$ ], potenza di pompa d'ingresso  $P_0 = 480$  mW, potenza di segnale  $S_0 = 0$  dBm. È significativo osservare che, poiché i transitori sono influenzati dal walkoff tra la pompa e il segnale  $d = (\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p})$ , nel caso contropropagante i transitori sono presenti sempre sulla "testa" del pacchetto (poiché è la prima parte del segnale ad incontrare la pompa e quindi a svuotarla), mentre nel caso copropagante a seconda che la pompa si propaghi più o meno velocemente del segnale i transitori sono presenti sulla "testa" ( $v_p < v_s$ ) o sulla "coda" (se  $v_p > v_s$ , come nel caso simulato) del pacchetto. Un altro aspetto significativo riguarda la durata di questi transitori che sono dell'ordine delle centinaia di  $\mu s$  con pompaggio contropropagante, mentre sono pari a 10-100 ns con pompaggio copropagante. Il fatto che i transitori nei due casi di pompaggio abbiano costanti di tempo notevolmente diverse è una conseguenza della differente banda del filtro di cross-talk nelle configurazioni co- e contropropaganti [6].

In Fig. 3(a) è mostrato il setup sperimentale utilizzato per lo studio degli effetti di dinamica negli amplificatori Raman operanti in condizione di saturazione. Nel banco sono presenti una sorgente laser accordabile, un diodo di pompa con massima potenza di emissione pari a 250 mW ( $\lambda_p=1485$  nm) e segnale d'uscita completamente depolarizzato. La lunghezza d'onda del segnale ( $\lambda_s=1585$  nm) è stata fissata in modo da ottenere contemporaneamente un elevato valore di potenza di segnale accoppiato in fibra e la massima interazione possibile tra pompa e segnale per effetto Raman. Il segnale ottico prima di essere accoppiato nella fibra di amplificazione (RDF,  $L=10$  Km) viene modulato in intensità attraverso un modulatore acusto-ottico. Il segnale in fibra è ad onda quadra con frequenza di modulazione pari a 1 KHz e duty cycle 0.5. Lo schema consente di effettuare le misure sia nel caso di pompa co- che contropropagante. In entrambi i casi di pompaggio il segnale amplificato viene rivelato attraverso un fotodiodo la cui uscita è collegata ad un oscilloscopio digitale.

Le misure eseguite nel caso di pompaggio contropropagante hanno permesso di osservare un picco di potenza sul fronte di salita del segnale modulato, ovvero la testa del pacchetto, con livello di potenza alto del segnale pari a 3.2 dBm (potenza effettiva accoppiata in fibra) e rapporto di estinzione tra livello alto e basso di circa 20 dB. In Fig. 3(b) oltre all'andamento temporale misurato è stato graficato anche quello previsto dal

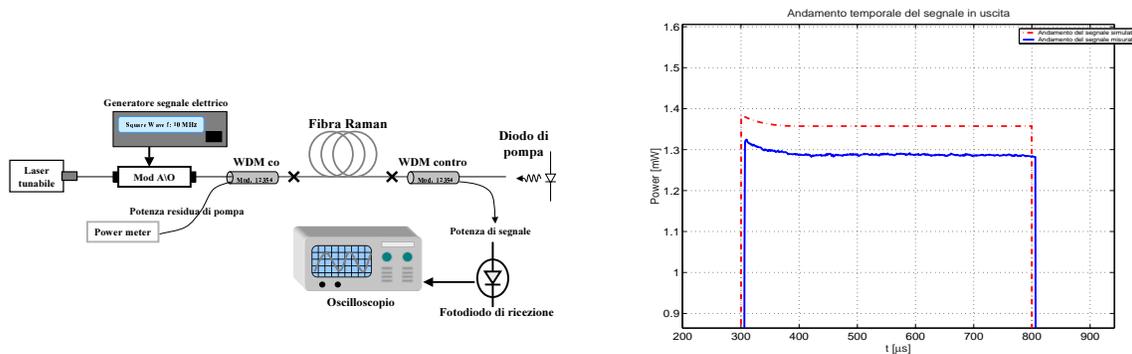


Fig. 3. (a) Setup sperimentale per lo studio degli effetti di dinamica nell'amplificatore Raman e (b) Andamento temporale del segnale amplificato: Confronto tra l'andamento misurato (curva continua) e quello ottenuto con le simulazioni numeriche (curva punto-tratto).

modello teorico. L'offset tra le due curve probabilmente è dovuto all'imprecisione nella misura della potenza di segnale e di pompa in ingresso alla fibra, a causa dell'instabilità delle sorgenti stesse (in particolare del diodo laser di pompa) e della difficoltà nel valutare esattamente le perdite dei giunti tra i WDM di ingresso ed uscita e la fibra di amplificazione stessa.

Si è verificato che l'andamento del segnale è effettivamente legato alla dinamica dell'amplificatore in condizioni di saturazione, secondo il meccanismo precedentemente descritto, in quanto il transitorio individuato scompare se si disattiva il diodo di pompa oppure se si riduce la potenza del segnale portando quindi l'amplificatore a lavorare in una regione dove non si ha saturazione del guadagno.

## Conclusioni

Sono stati mostrati alcuni risultati relativi allo studio e alla caratterizzazione sperimentale degli amplificatori Raman. Dapprima si è misurato il coefficiente di guadagno Raman per alcune fibre. Quindi, scelta la fibra con le migliori caratteristiche amplificative, ci si è concentrati sullo studio dei transitori di guadagno presenti nell'amplificatore in condizioni di saturazione. È stato possibile misurare i transitori sul segnale amplificato nel caso di amplificazione con pompaggio contropropagante. Le misure confermano quanto ottenuto con simulazioni numeriche relative alla propagazione di segnali in fibra, le cui caratteristiche sono state ottenute attraverso parametri misurati sperimentalmente.

**Ringraziamenti:** Si ringrazia Paolo Vavassori della OTI Corning S.p.A. per i componenti ottici messi a disposizione per le misure.

## Bibliografia

1. Shu Namiki and Yoshihiro Emori, "Ultra-broadband Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength division multiplexed high power laser diodes," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol.7, pp. 3-16, 2001.
2. A.K. Srivastava, J.L. Zyskind and J.W. Sulhoff, "EDFA transient response to channel loss in WDM transmission system," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp.386-388, March, 1997
3. C.J. Chan and W.S. Wong "Transient effects in Raman optical amplifiers," *Proc. OAA 2001*, paper OMC2, Stresa, Italy, July 2001.
4. A. Bononi and M. Papararo, "Transient Gain Dynamics in Saturated Counter-pumped Raman Amplifiers," *Proc OFC 2002*, paper ThR1, March 2002.
5. S. Tariq and J. C. Palais, "A computer model on Non Dispersion Limited Stimulated Raman Scattering in optical fiber multiple-channel communications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol 11, pp. 1914-1924, Dec. 1993.
6. C. R. S. Fludger, V. Handerek and R. J. Mears, "Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol 19, pp. 1140-1148, Aug. 2001.