

MISURE COMPARATIVE DI PRESTAZIONE DI CATENE DI AMPLIFICATORI A SEMICONDUITTORE CON E SENZA STABILIZZAZIONE DEL GUADAGNO

M. Magnani, M. Salsi, A. Bononi, M. Bertolini (*cognome@tlc.unipr.it*)
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione – Università degli Studi di Parma
Viale G. P. Usberti 181/A, 43100 Parma

We compared the performance of concatenations of traditional SOAs, Gain-Clamped SOAs and Linear Optical Amplifiers for use either in an optical metropolitan area network or within a SOA-based optical switch.

1. Introduzione

Lo sviluppo sia di reti ottiche metropolitane che di commutatori ottici veloci richiede amplificatori ad alta integrabilità, dunque con minimo ingombro e con prezzi ridotti. Entrambe queste caratteristiche si riscontrano negli amplificatori ottici a semiconduttore (SOA), costituiti da un singolo chip e dotati di una elettronica di controllo estremamente più semplice dei più comuni amplificatori in fibra drogata (EDFA).

Questo lavoro, sviluppato nel progetto MIUR OSATE e continuazione di simili studi per il progetto WONDER [1], effettua un confronto sperimentale di prestazioni tra SOA tradizionali e SOA stabilizzati in guadagno (*gain-clamped*); le due tipologie di SOA stabilizzati esaminate sono: 1) i Gain-Clamped-SOA (GC-SOA) [2], in cui il laser stabilizzante, co-propagante col pettine dei segnali (WDM) da amplificare, è generato da un reticolo di ingresso ed uno di uscita che forniscono la retroazione ottica per il suo sostentamento; 2) i più recenti Linear Optical Amplifiers (LOA) [1], in cui sono presenti una schiera di laser stabilizzanti, oscillanti in direzione ortogonale a quella di propagazione dei segnali WDM e confinati all'interno del dispositivo.

2. Cenni teorici

Nei dispositivi a semiconduttore l'amplificazione ottica ha luogo grazie al fenomeno dell'emissione stimolata. Gli elettroni vengono pompati in banda di conduzione dalla corrente di alimentazione (*bias*) del dispositivo, la quale ha una funzione analoga ai laser di pompa che alimentano gli EDFA. Alla luce di questa ed altre importanti analogie tra la tecnologia SOA ed EDFA il nostro gruppo ha recentemente proposto [3] un modello dinamico a singola variabile di stato (chiamata *reservoir*) per i SOA, estensione di un simile modello per gli EDFA. Il *reservoir* identifica il numero complessivo di elettroni in banda di conduzione presenti all'interno della zona attiva. Il guadagno del dispositivo dipende da questa unica variabile di stato, che è proporzionale alla densità media dei portatori.

Lavorando in regimi prossimi alla saturazione, il guadagno risulta determinato dal valore della potenza in ingresso. In un ambiente di rete WDM, la presenza/assenza di canali in trasmissione può portare alla generazione di transitori di potenza in linea che, se di intensità sufficientemente elevata, possono dare vita ad interferenze sugli altri canali (*Cross-Gain Modulation*, XGM). Grazie al *gain-clamping*, si ottiene un allargamento della regione di linearità della caratteristica di guadagno in funzione della potenza di uscita ed una conseguente riduzione di questo cross-talk, spostando la saturazione a potenze maggiori.

Tutto questo a discapito però di una riduzione del valore di guadagno ai piccoli segnali e del rapporto segnale-rumore (OSNR) in uscita. Infatti, a parità di bias, l'oscillazione laser stabilizzante fissa il *reservoir* ad un valore inferiore, riducendo il guadagno e aumentando così la cifra di rumore.

3. Misure Statiche

La prima serie di misure effettuate sui dispositivi è stata con segnali CW. Gli amplificatori testati sono stati: 1) SOA Alphion PIC-C 2) GC-SOA e 3) LOA Finisar. Sono state

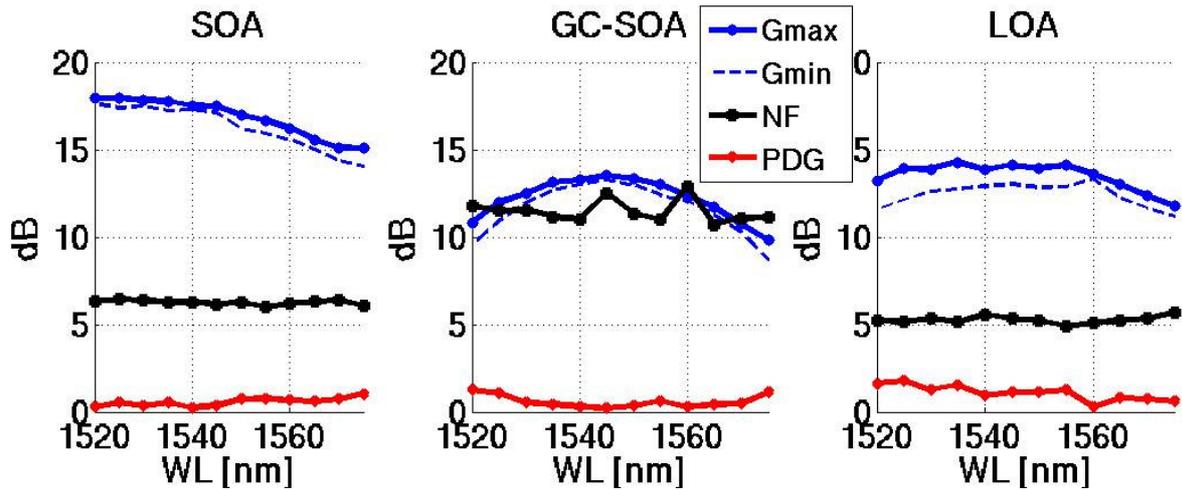


Figura 1: Profili di Guadagno, Noise Figure e Polarization Dependent Gain.

misurate le caratteristiche di ciascun amplificatore (tre per ciascun tipo) al variare della loro corrente di alimentazione, in modo da determinare per ciascuno il migliore punto di lavoro: a tal proposito sono state scelte le correnti nominali per i SOA e quelle massime per gli amplificatori stabilizzati, per ottenere la massima estensione della regione di linearità. In particolare sono state misurate le curve di guadagno al variare della potenza, il profilo di guadagno, la cifra di rumore (*Noise Figure*, NF) e la dipendenza del guadagno dalla polarizzazione (*Polarization Dependent Gain*, PDG) al variare della lunghezza d'onda.

Dai risultati riportati in figura 1 si può notare che i profili di guadagno per i tre tipi sono estremamente diversi tra loro: i SOA presentano un picco di guadagno a λ inferiori, i GC-SOA hanno un profilo molto incurvato con un picco ben definito a $\lambda_{peak} \cong 1545$ nm, mentre i LOA presentano un profilo molto piatto su $\lambda = 1535 \div 1555$ nm. I dispositivi sono comparabili in termini di PDG, ma mentre i SOA e i LOA sono simili anche in termini di NF, i GC-SOA sono intrinsecamente più rumorosi, avendo un profilo dell'inversione media non costante lungo la direzione di propagazione nel dispositivo, con un minimo all'ingresso e all'uscita [4]. In figura 2(a) sono invece riportate le caratteristiche di guadagno in funzione della potenza di uscita: si può osservare come il clamping estenda la regione di linearità a discapito di una riduzione del guadagno ai piccoli segnali.

4. Misure di Cross-Gain Modulation (XGM)

Per rilevare il XGM si è utilizzato uno schema di tipo pump-probe: un segnale ad alta potenza modulato OOK/NRZ viene accoppiato con un segnale CW a bassa potenza che

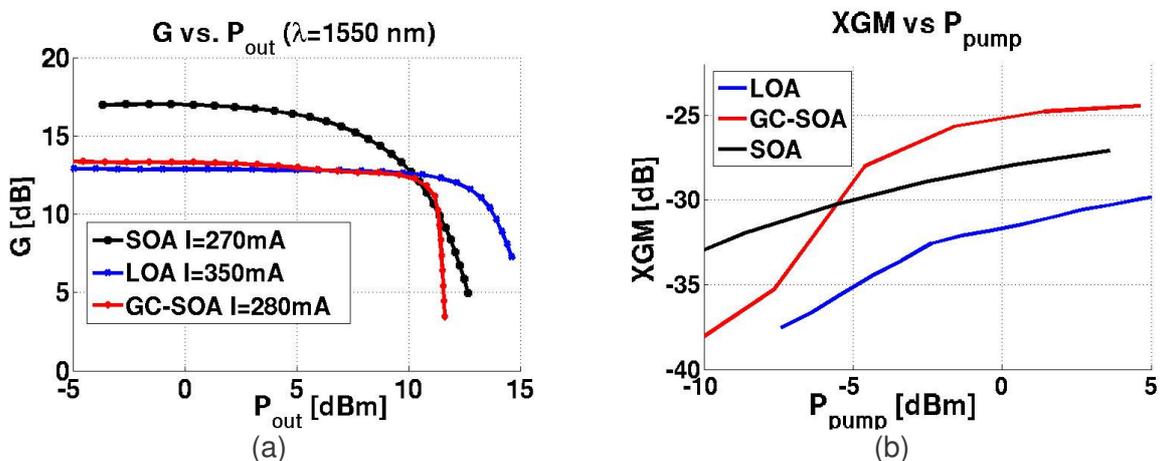


Figura 2: (a) G vs. Pout: estensione regione di linearità con la stabilizzazione del guadagno; (b) XGM vs. Ppump: $f = 1.25$ GHz, $P_{probe} = -13$ dBm.

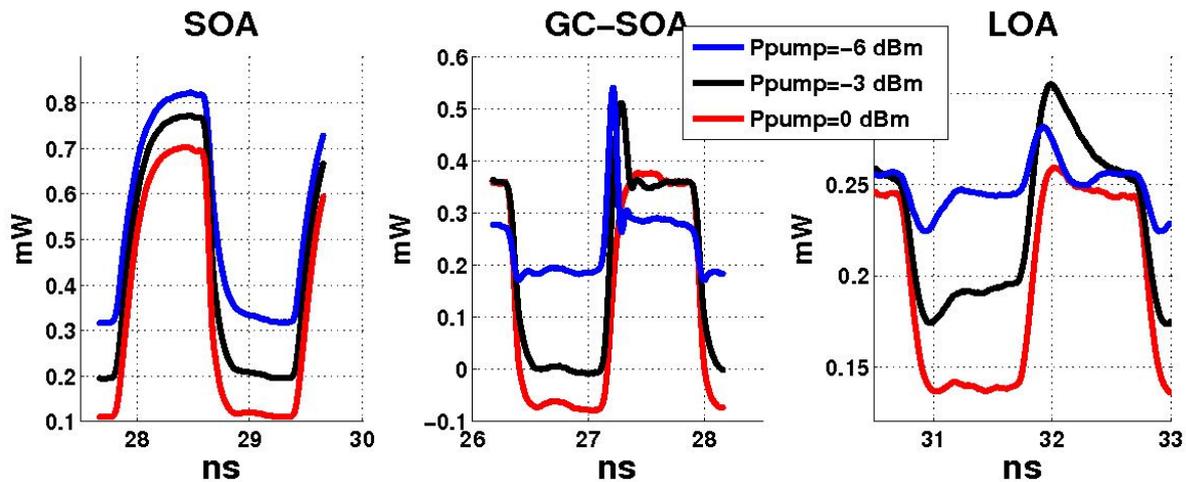


Figura 3: Andamento temporale del probe: risposta dei dispositivi ad un'onda quadra.

funge da sonda (probe) del valore di guadagno istantaneo. Il XGM è definito come il rapporto tra l'ampiezza picco-picco della modulazione impressa sul probe e la sua potenza media.

Come si può osservare in figura 2(b), il XGM cresce al crescere della potenza di pump in ingresso. Per i SOA questa crescita avviene uniformemente, mentre la presenza del clamping nei GC-SOA e nei LOA porta alla nascita di un ginocchio sulla curva. Questo fenomeno è causato dalla saturazione del dispositivo (spegnimento del laser di clamping) che avviene una volta superato un determinato valore di potenza ($P \approx -4.5$ dBm per i GC-SOA e $P \approx -2$ dBm per i LOA). Risulta essere più marcato per i GC-SOA perchè esiste un unico laser, mentre i laser nelle diverse cavità dei LOA si spengono gradualmente. In situazione di clamping acceso il XGM viene comunque ridotto. I risultati sono stati ottenuti con una frequenza dell'onda quadra di modulazione OOK di pompa di 1.25 GHz.

La figura 3 mostra l'andamento temporale del segnale di probe al variare della potenza media di pompa. I SOA non presentano sovraelongazioni, fornendo una risposta tipica dei sistemi di primo ordine e quindi di un filtro passa-basso. Dai transistori, si può evincere una frequenza di taglio di $f_{SOA} = 0.8 \div 1$ GHz: superata questa frequenza, la modulazione di pompa comincia ad essere reiettata. Nel caso dei GC-SOA sono evidenti sovraelongazioni ed oscillazioni di rilassamento del laser: il clamping trasforma il filtro passa-basso in un passabanda, in questo caso centrato a $f_{GC-SOA} \approx 10$ GHz (frequenza dell'oscillazione). Per i LOA il discorso è più complesso: ciascuna cavità presenta una propria frequenza di oscillazione. La risposta complessiva è la composizione temporale delle risposte di tutte le cavità e per questo motivo non si osserva una oscillazione ben marcata: a dominare è la cavità la cui oscillazione di rilassamento è la più lenta, da cui $f_{LOA} \approx 1.5$ GHz. Superata la soglia di saturazione, anche gli amplificatori stabilizzati si comportano come i SOA.

5. Misure di BER su un sistema WDM multispan

E' stato analizzato un caso semplificato di sistema WDM: trasmissione di quattro canali ($\lambda_1 = 1547.35$ nm, $\lambda_2 = 1548.15$ nm, $\lambda_3 = 1548.95$ nm, $\lambda_4 = 1549.75$ nm) comodulati con una PRBS di $2^{31}-1$ su tre tratte emulate con attenuatori programmabili. Al ricevitore, di tipo noise-loaded per evidenziare le penalty dovute a distorsioni del segnale, è stato utilizzato un filtro centrato su λ_3 con banda $B_0 = 0.8$ nm.

Tra ciascuna tratta i segnali sono amplificati, utilizzando alternativamente tre GC-SOA, tre SOA o tre LOA. Lo studio delle prestazioni è stato condotto al variare della potenza per canale ($P_{CH} = -16 \div -8$ dBm) e al variare del bit-rate ($R = 1.25, 2.5$ e 10 Gb/s). A questi bit-rate, i tempi di risposta dei dispositivi in esame (figura 3) sono paragonabili ai tempi di bit: quindi è indifferente la presenza o meno di pacchetti di trasmissione, poiché questi amplificatori sono in grado di rispondere direttamente alla modulazione dei segnali.

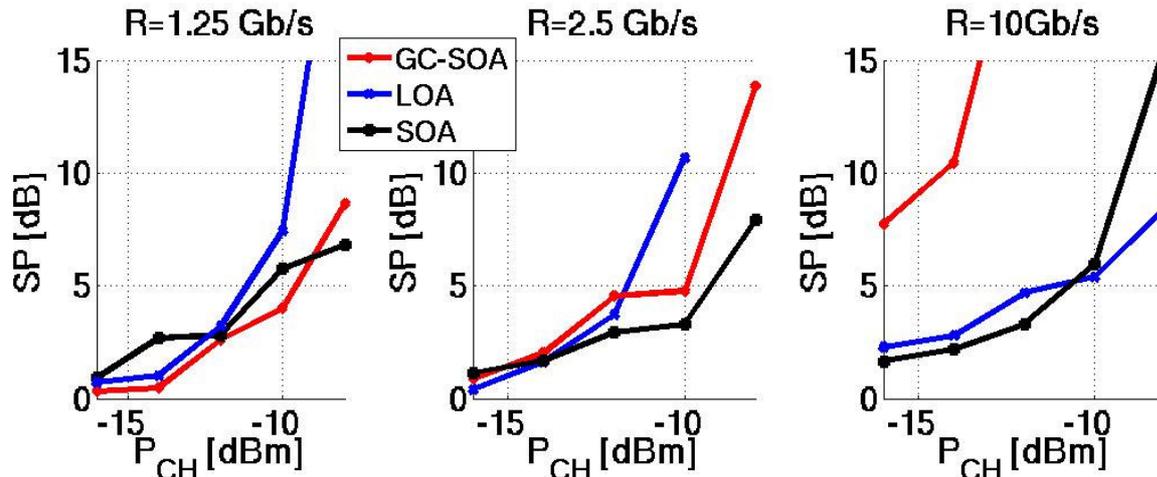


Figura 4: SP (@ BER = 10^{-9}) su un sistema multitratta ai diversi bit-rate.

In figura 4 si può osservare la Sensitivity Penalty (SP) nei confronti di una trasmissione back-to-back, misurata in corrispondenza di un Bit-Error Rate (BER) = 10^{-9} . Tali penalty sono troppo grandi per essere spiegate esclusivamente con il XGM. Il problema principale in questi dispositivi a semiconduttore è il Four-Wave Mixing (FWM). A conferma di questo, mentre a 1.25 Gb/s e 2.5 Gb/s le penalty erano trascurabili per $P_{CH} = -16$ dBm, a 10 Gb/s questo non accade, a causa del fatto che una maggiore quantità di rumore di FWM entra nel filtro di ricezione. Nel caso dei GC-SOA a 10 Gb/s la SP risulta essere addirittura di 8 dB per $P_{CH} = -16$ dBm: in questo caso l'effetto peggiore non è causato dal FWM segnale-segnale, ma è dovuto al FWM tra segnale-laser di clamping (che è multimodale con spaziatura $\Delta\lambda = 0.4$ nm tra i modi) che per basse potenze è al massimo della sua intensità: questo dà vita a prodotti di FWM che cadono tra i segnali ed entrano nel ricevitore. Inoltre a 10 Gb/s anche le oscillazioni di rilassamento vanno ad incidere sulla penalty rilevata per i GC-SOA.

6. Conclusioni

Le misure effettuate hanno dimostrato che la stabilizzazione di guadagno nei SOA estende la regione di linearità abbattendo effettivamente il XGM. Inoltre trasforma il filtro equivalente del dispositivo da passa-basso a passa-banda, rendendolo immune dai disturbi a bassa frequenza.

Purtroppo si è osservato che in una trasmissione multicanale non è il XGM il rumore principale che affligge questi tipi di dispositivi, quanto il forte FWM che si genera al loro interno quando le potenze di segnale cadono all'interno della regione estesa di linearità. Questo fenomeno vanifica il miglioramento prestazionale promesso dal gain-clamping.

In conclusione, per le applicazioni prese in esame, i SOA risultano essere più competitivi dei GC-SOA e dei LOA, poiché garantiscono prestazioni assolutamente comparabili con quelle fornite da questi ultimi, ma ad una complessità e ad un prezzo ridotti.

Bibliografia

- [1] M. Salsi, *et al.*, "Misure su amplificatori ottici lineari per la rete ottica metropolitana a pacchetto WONDER", in *Proc. Fotonica 2005*, paper A8.2
- [2] G. Soulage, *et al.*, "Clamped Gain travelling wave semiconductor optical amplifier as a large dynamic range optical gate", in *Proc. ECOC '94*, 1994, vol.1, pp. 451-454
- [3] W. Mathlouthi *et al.*, "Fast and Efficient Dynamic WDM Semiconductor Optical Amplifier Model", *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 24, No.11, Nov. 2006, pp 4353-4365
- [4] G. Giuliani, *et al.*, "Noise Analysis of Conventional and Gain-Clamped Semiconductor Optical Amplifiers", *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 18, No.9, Set. 2006, pp 1256-1263