

# MISURE SU AMPLIFICATORI OTTICI LINEARI PER LA RETE OTTICA METROPOLITANA A PACCHETTO WONDER

Massimiliano Salsi, Armando Vannucci, Alberto Bononi  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione - Università degli Studi di Parma  
Viale delle Scienze 181/A, 43100 Parma  
cognome@tlc.unipr.it

*We investigate the static and dynamic properties of the recently introduced Linear Optical Amplifiers, as possible candidates to be used in the novel metro WDM packet network Wonder for optical node amplification.*

## 1. Introduzione

Nell'ambito dei Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN), il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) ha finanziato, nel 2003, il progetto WONDER, mirato allo studio e alla dimostrazione di una nuova rete ottica a pacchetto ad elevate capacità per ambiente metropolitano [1]. Il progetto - coordinato dal Politecnico di Torino e a cui partecipano diverse Università Italiane - rappresenta l'evoluzione di un precedente prototipo di rete (RingO) [2], ed è basato su un'architettura a doppio anello fisico in fibra in configurazione *folded bus*, in cui l'architettura di ogni nodo sfrutta efficacemente la tecnologia ottica disponibile. L'architettura di ogni nodo della rete WONDER prevede l'impiego di due amplificatori ottici, uno sull'anello di trasmissione e uno sull'anello di ricezione, il cui compito è quello di recuperare le perdite di tratta e le perdite subite nell'elaborazione ottica interna al nodo.

Come è noto, la natura irregolare e discontinua del traffico in una rete a pacchetto *burst-mode* è tale da indurre dei transitori di guadagno negli amplificatori ottici, per cui il guadagno disponibile per un pacchetto in transito è influenzato dalla presenza o assenza di pacchetti di dati negli slot temporali precedenti [3]. Benché con costanti di tempo molto diverse, tale fenomeno si verifica sia negli amplificatori in Erblio (EDFA) che in quelli a semiconduttore (SOA), e richiede opportune tecniche di stabilizzazione (*clamping*) del guadagno, per evitare il deleterio impatto sul rapporto segnale-rumore dei vari pacchetti e dunque sulle prestazioni della rete. Nell'ambito della scelta e della convalida di una tipologia di amplificatore adeguato per la rete WONDER, abbiamo individuato, come possibili candidati, dei nuovi amplificatori a semiconduttore stabilizzati, di recente concezione: i LOA (Linear Optical Amplifier) [4].

La struttura interna dei LOA è progettata in modo da far instaurare una serie di oscillazioni laser *verticali* – cioè trasversali, rispetto alla direzione di propagazione del segnale -, non visibili dall'esterno, ma tali da stabilizzare il guadagno dell'amplificatore in maniera simile a quanto accade impiegando la tecnica di *gain-clamping* nei tradizionali SOA (GC-SOA). I vantaggi che questi amplificatori offrono sono innanzitutto in termini di costo: l'amplificatore, integrato su chip, ha un costo decisamente minore di un EDFA. Inoltre, il fatto che il clamping è realizzato internamente al dispositivo offre un duplice vantaggio: da un lato economico, non dovendo disporre di componentistica (accoppiatori, filtri, grating) per realizzare il clamping esternamente; dall'altro si ha un vantaggio in termini di dinamica: poiché il meccanismo di retroazione si svolge tutto all'interno del dispositivo, i tempi di reazione ad un transitorio di potenza sono ridotti di un ordine di grandezza [5].

Nel presente lavoro ci proponiamo di investigare il comportamento statico e dinamico degli amplificatori lineari a semiconduttore (LOA), per verificarne le caratteristiche di guadagno, rumorosità, e soprattutto per quantificare la linearità, ovvero la tolleranza al *cross-gain modulation*: in un ambiente di rete multi-lunghezza d'onda (WDM), la presenza/assenza di pacchetti sui vari canali, avendo un impatto sul guadagno dell'amplificatore, influenza i livelli di potenza dei pacchetti in transito, producendo un'interferenza (*cross-talk*) che degrada le prestazioni.

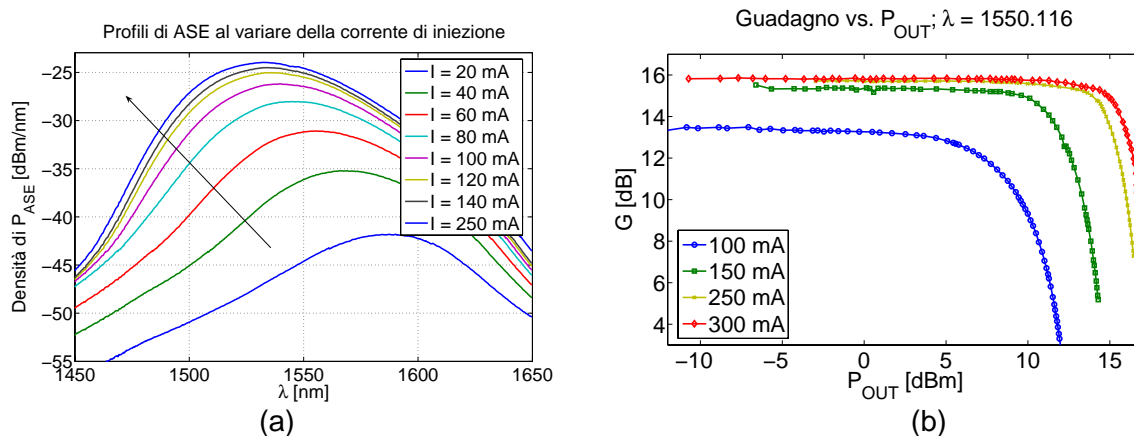


Figura 1: Curve sperimentali al variare della corrente di alimentazione: (a) profili di emissione spontanea; (b) guadagno in funzione della potenza di uscita.

## 2. Analisi sperimentale delle prestazioni

Lo studio dei LOA è stato distinto in due fasi: esperimenti statici ed esperimenti dinamici. Con la prima fase si è inteso valutare il comportamento dell'amplificatore al variare della potenza del flusso laser di stabilizzazione mediante l'uso di segnali CW. I parametri variabili sono stati la corrente di alimentazione, la potenza dei segnali in ingresso e la loro lunghezza d'onda. I risultati degli esperimenti condotti si possono così riassumere: la corrente di alimentazione, superata una soglia di circa 110 mA, innesca in tutto il dispositivo la nascita di laser verticali che stabilizzano il guadagno. Tale fenomeno è ben visibile nelle curve della Figura 1(a) dove, all'aumentare della corrente di alimentazione, si osserva una crescita del profilo di potenza di emissione spontanea amplificata (ASE) fintanto che non si raggiunge il valore di soglia. L'aumento della corrente oltre soglia va ad accrescere l'intensità dei laser interni. Questi sono responsabili della stabilizzazione del guadagno ad un valore di circa 16 dB. Tale guadagno viene mantenuto costante fintanto che la potenza aggregata in ingresso non supera un valore limite  $P_{SAT}$ , oltre il quale i laser si spengono ed il guadagno, non più stabilizzato, decresce.

La corrente di alimentazione gioca un ruolo importante nella valutazione del valore di  $P_{SAT}$ . Come si può osservare dalla Figura 1(b), anche se il guadagno ha praticamente raggiunto il valore di 16 dB con soli 150 mA di corrente di alimentazione, è possibile ottenere valori di  $P_{SAT}$  maggiori portando la corrente ad un valore di 250 mA. Aumentando ulteriormente non si ottengono miglioramenti in grado di giustificare il maggiore assorbimento di corrente dell'amplificatore e il conseguente maggiore assorbimento del *thermo-electric cooler* (TEC). Il TEC rappresenta un aspetto importante in fase di progettazione del nodo di rete a causa della grande quantità di calore che deve smaltire per mantenere il LOA ad una temperatura di circa 15°C. Lavorando con una corrente di 250 mA si ottiene un valore di  $P_{SAT}$  di circa -2 dBm. Questo è un valore fondamentale per il power budget della rete ottica metropolitana. Un altro risultato ottenuto riguarda il profilo di guadagno  $G(\lambda)$  il cui andamento in decibel è di tipo parabolico. Tale parabola, sulla banda nominale da 1530 a 1560 nm, si può approssimare con due semirette con l'origine nel vertice, a 1550 nm, come mostrato in Figura 2(a). Il tilt sulla destra è di 0.1 dB/nm, mentre è ancora minore sulla sinistra, risultando in una variazione di guadagno di 1 dB sulla banda nominale.

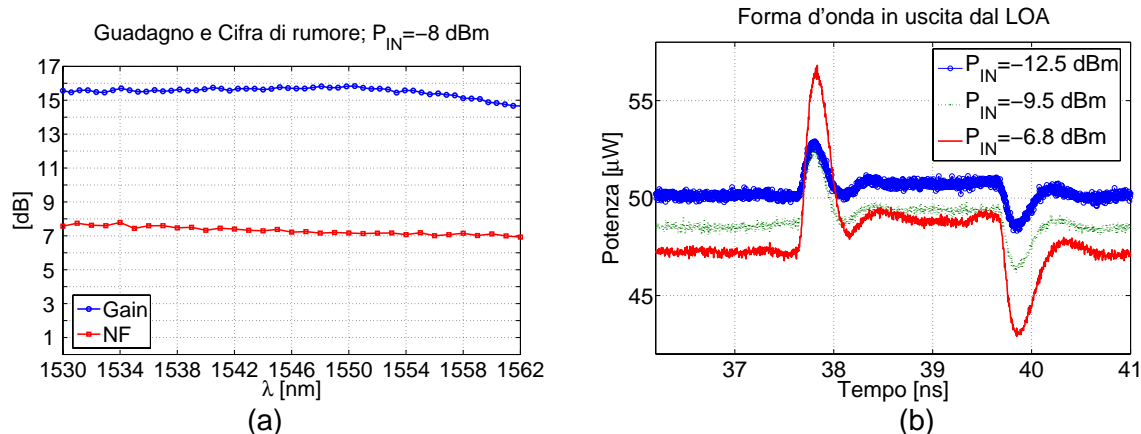


Figura 2: (a) Guadagno e cifra di rumore; (b) Risposta del segnale di probe al gradino di potenza di una pompa.

In Figura 2(a) è anche mostrata la cifra di rumore di circa 7 dB sulla banda nominale. I risultati della seconda fase di esperimenti, svolta con segnali modulati, sono stati ottenuti con delle potenze in ingresso che, istantaneamente, erano sempre inferiori a  $P_{SAT}$ . In ogni caso lo spegnimento dei laser interni e il conseguente peggioramento del cross-talk dell'amplificatore avviene in modo graduale. La giustificazione di questo fenomeno si trae dall'analisi di alcune simulazioni numeriche relative ai LOA presenti in letteratura [6] in cui si comprende chiaramente come lo spegnimento del laser interno interessi per prime le zone in prossimità dell'uscita dell'amplificatore, causando un graduale peggioramento delle prestazioni con l'aumentare della potenza in ingresso ovvero con l'estendersi della regione del dispositivo in cui i laser interni sono spenti.

Abbiamo misurato come varia il guadagno di un debole canale di *probe* ( $P_{IN} = -22$  dBm) quando un canale molto più intenso, detto *pump*, viene spento e acceso a bassa frequenza (500 KHz). La frequenza scelta simula il traffico a pacchetti della rete WONDER e i livelli di potenza utilizzati sono tali da indurre una variazione della potenza di ingresso al LOA superiore al 95% del totale. Definendo come in [4] il *cross-talk* come il rapporto tra la massima variazione della potenza e la potenza media in uscita dall'amplificatore, si ottiene un valore di *cross-talk* di -15 dB, mentre un tradizionale SOA presenterebbe variazioni totalmente inaccettabili di guadagno.

La Figura 2(b) mostra la variazione di potenza del canale di *probe* dovuta al *cross-gain modulation* indotto da variazioni veloci del segnale di *pump*, al variare della potenza  $P_{IN}$  di quest'ultimo. Il valore di *cross-talk* a regime, riferito ai livelli di potenza raggiunti dopo il transitorio dal segnale di probe, è ancora pari a -15 dB. In Figura 2(b) si osserva anche che il fronte ripido di salita del segnale di *pump* (circa 50 ps) è causa di un'oscillazione di rilassamento sul *probe* con un semiperiodo di circa 400 ps. I valori di potenza media del segnale di *pump* sono quelli riportati nella legenda; si noti che i transitori di potenza diventano evidenti solo quando la potenza di picco del canale di *pump* è tale da avvicinarsi alla  $P_{SAT}$ .

Infine abbiamo analizzato un caso vicino al traffico della rete WONDER: sono stati utilizzati 4 canali ( $\lambda_1 = 1549.2$  nm,  $\lambda_2 = 1550.8$  nm,  $\lambda_3 = 1554.1$  nm,  $\lambda_4 = 1556.4$  nm) di uguale potenza, pari a -16 dBm di potenza media per canale in ingresso al LOA, modulati indipendentemente a 2.5 Gbit/s con pattern pseudocasuali di lunghezza  $2^{31} - 1$  bit. Misurando il fattore Q su di un canale al variare del numero di canali accesi contemporaneamente, si sono ottenuti i valori della seguente tabella:

Numero canali	1	2	3	4
Q	11.99	11.95	11.87	11.78

L'informazione principale che deriva da questi risultati è che, per questi livelli di potenza, non ci sono differenze sostanziali al variare del numero di canali [7]. Pertanto è possibile affermare che gli amplificatori ottici lineari sono ben in grado di soddisfare le necessità del

traffico di una rete come WONDER, essendo le prestazioni di ogni canale insensibili alla presenza/assenza di potenza negli altri canali. Il numero massimo di canali che potranno essere utilizzati nella rete WONDER dipende fortemente dalle perdite all'interno dei nodi e dalla sensibilità dei ricevitori utilizzati, ed è oggetto di ulteriori indagini.

## 5. Conclusioni

In un ambiente di rete metropolitana WDM a pacchetto, la scelta degli amplificatori ottici da impiegare nei nodi della rete deve seguire delle linee guida che tengano conto di diversi parametri. Il massimo guadagno disponibile e la cifra di rumore dell'amplificatore – cioè i classici parametri di prestazione di un amplificatore – giocano un ruolo ridimensionato dalla modesta attenuazione delle tratte, che riduce la criticità del *power-budget*. Viceversa, il rapporto segnale-rumore dei vari canali viene seriamente degradato dalle interferenze inter-canale dovute al fenomeno di *cross-gain modulation*, che si presenta negli amplificatori ottici operanti in saturazione (EDFA o SOA). Sono pertanto necessarie tecniche di stabilizzazione (*gain-clamping*) del guadagno, che implicano l'uso di componenti ottici aggiuntivi. Una soluzione semplice ed economica, investigata in questo lavoro, è rappresentata dall'impiego di amplificatori ottici lineari (LOA), dispositivi integrati di piccole dimensioni, con guadagno inferiore (circa 16 dB) e rumorosità superiore (NF di circa 7 dB), rispetto ai tipici valori relativi agli EDFA o ai SOA. Per contro, oltre ad una notevole piattezza del profilo di guadagno (meno di 0.1 dB/nm, per  $\lambda \in [1530; 1565]$ nm), i LOA operano in regime lineare, con guadagno stabilizzato dalla presenza di oscillazioni laser interne, risultando in un *cross-talk* di circa – 15 dB nel caso peggiore da noi misurato e in dinamiche di stabilizzazione del guadagno molto più rapide rispetto agli EDFA, ed anche ai SOA con *gain-clamping* tradizionali. Come parametro sistemistico, abbiamo constatato che in un sistema WDM 4x2.5Gb/s con -10 dBm di potenza media in ingresso al LOA, il fattore Q di un singolo canale rimane praticamente costante al variare del numero di canali attivi nel sistema da 1 a 4.

## Ringraziamenti

Ci è gradito ringraziare gli altri partecipanti al progetto Wonder, l'Ing. R. Di Muro di Marconi Communications per le donazioni di laser e demux usati negli esperimenti, l'Ing. L. Poti del CNIT di Pisa e l'Ing. G. Di Maio per le preziose consulenze sulle misure di laboratorio.

## Bibliografia

- [1] A. Bianciotto and R. Gaudino, "Wonder: Overview of a Packet-Switched MAN Architecture", in *Optical Networks and Technology* (editors: Kitayama, Masetti-Placci, Prati), Springer, 2004, pp. 87-94.
- [2] A. Carena, V. De Feo, J. M. Finocchietto, R. Gaudino, F. Neri, C. Piglione, P. Poggiolini, "RingO: An Experimental WDM Optical Packet Network for Metro Applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, N. 8, ottobre 2004, pp. 1561-1571.
- [3] M. Karàsek, A. Bononi, L. Rusch, M. Menif, "Gain Stabilization in Gain Clamped EDFA Cascades Fed by WDM Burst-Mode Packet Traffic", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 18, N. 3, marzo 2000, pp. 308-313.
- [4] D. A. Francis, S. P. DiJaili, J. D. Walker, "A single chip Linear Optical Amplifier", in *Proc. Optical Fiber Communication (OFC 2001)*, paper PD13, marzo 2001.
- [5] J. Oksanen, J. Tulkki, "On Crosstalk and Noise in an Optical Amplifier With Gain Clamping by Vertical Laser Field", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, N. 9, settembre 2003, pp. 1914-1919.
- [6] C.-Y. Jin, Y.-Z. Huang, L.-J. Yu and S.-L. Deng, "Detailed Model and Investigation of Gain Saturation and Carrier Spatial Hole Burning for a Semiconductor Optical Amplifier With Gain Clamping by a Vertical Laser Field", *IEEE J. of Quantum Electronics*, Vol. 40, N. 5, maggio 2004, pp. 513-518.
- [7] J. J. Crijns, L. H. Spiekman, G. N. van den Hoven, E. Tangdionga, H. de Waardt, "Static and Dynamic Switching Performance of a Metro WDM Ring Using Linear Optical Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, N. 10, ottobre 2002, pp. 1481-1483.