

**Elisa Duca, Silvello Betti**

Università degli studi di Roma – “Tor Vergata”

**Silvia Di Bartolo, Davide Massimiliano Forin**

Università degli studi di Roma – “Tor Vergata”

(Dottorandi dell' Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione)

**Giorgio Maria Tosi Beleffi, Franco Curti**

Ministero dello Sviluppo Economico - Comunicazioni

Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione

## **EFFETTI DI MODULAZIONE INDOTTA ATTRAVERSO SEGNALI CONTINUI TRANSITANTI IN AMPLIFICATORI OTTICI A SEMICONDUITTORE (SOA)**

### **(MODULATION EFFECT INDUCED BY CONTINUOUS WAVES IN SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER)**

**S**ommario: il SOA è un dispositivo fortemen-  
te non lineare, studiato a fondo sia dal  
punto di vista teorico, che sperimentale, che simu-  
lativo. Il modello matematico più utilizzato è quel-  
lo delle Rate Equations che lega la densità dei por-  
tatori alla potenza ottica dei segnali transitanti nel-  
l'amplificatore. Scopo del modello simulativo pre-  
sentato di seguito è superare i limiti imposti dai  
modelli basati sulle Rate Equations in cui le distor-  
sioni di fase dei segnali in esame non vengono  
prese in considerazione. Questo scopo è raggiun-  
to legando la densità dei portatori al campo ottico

dei segnali transitanti nell'amplificatore.

**A**bstract: nonlinearities in SOAs have been  
deeply investigated both theoretically and  
experimentally. Moreover, many simulative  
models have been proposed, based on Rate  
Equations, relating the carrier density to the over-  
all optical power traveling the amplifier. Aim of  
this paper is to propose an enhanced general  
model for nonlinearities induced in SOAs, overco-  
ming the limitations of Rate Equations based  
model. Our model relates the carrier density to  
the optical field, and it allows to evaluate the inter-

#### **I. Introduzione**

Come noto dalla teoria, l'amplificazione di un segnale in un mezzo attivo, quale è un amplificatore ottico a semiconduttore (SOA), è ottenuta dall'interazione tra portatori e fotoni. La presenza dei portatori nel mezzo attivo si ottiene tramite pompaggio elettrico a cui la densità dei portatori e quindi il guadagno del mezzo è direttamente proporzionale. Il controllo della densità delle cariche, quindi di guadagno d'amplificazione, tramite corrente di iniezione, induce una variazione dell'indice di rifrazione nella regione attiva dell'amplificatore; il segnale transitante nell'amplificatore subisce variazioni di fase come conseguenza.

La variazione della densità di carica viene prodotta anche dalla variazione in potenza del segnale da amplificare in relazione al fatto che ci sarà un diverso assorbimento delle cariche nel tempo. Tali fenomeni sono tanto più evidenti quanto più è grande la profondità di modulazione d'ampiezza del segnale in questione. Lo zero ed uno logico subiscono, come conseguenza, una diversa amplificazione e i fronti di salita e discesa uno sfasamento proporzionale alla variazione dell'indice di rifrazione. Gli stessi fenomeni si producono su segnali non modulati in ampiezza, ma la loro osservazione è permessa solo sotto opportune condizioni.

Nel presente lavoro vengono analizzate le non linearità del SOA su segnali ad inviluppo costante

comparando i risultati teorici con quelli simulativi e con alcuni test sperimentali. La maggior parte dei modelli simulativi su dispositivi ottici a semiconduttore si basano sul modello matematico delle Rate Equations in cui le informazioni sulla fase del segnale vengono perse. Partendo da un diverso approccio matematico [1] viene proposto di seguire un nuovo modello simulativo che supera tali limitazioni permettendo di studiare fenomeni di sfasamento anche su segnali continui

## 2. Suscettività non lineare

Il parametro principale da considerare nel nuovo approccio simulativo è la suscettività che lega il campo ottico del segnale da amplificare (**E**) con la polarizzazione indotta dal segnale (**P**). L'interazione carica-fotone può essere espressa come segue [2]:

$$(1) \quad \dot{N}(t) = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_s} - \frac{i\varepsilon}{4\hbar} [\mathbf{P}^* \mathbf{E} - \mathbf{P} \mathbf{E}^*]$$

con  $I$  corrente di pompa,  $V$  volume della regione attiva,  $\tau_s$  tempo di vita dei portatori.

L'espressione analitica classica del vettore di polarizzazione è:

$$(2) \quad \mathbf{P} = \chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E} \mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}$$

dove la suscettività del secondo ordine può essere trascurata poiché non contribuisce in maniera significativa allo stato di polarizzazione.

Dal punto di vista quantico, il vettore di polarizzazione può essere scritto prendendo in considerazione la matrice di densità degli stati [3-4]:

$$(3) \quad \mathbf{P} = \frac{1}{V} \sum_k \mu_k [\rho_{cv}(t, \omega_k) + \rho_{vc}(t, \omega_k)]$$

La somma è realizzata sullo spettro discreto dei livelli di energia permessi. Questa operazione è permessa solo nel caso in cui al segnale occupi una banda minore di quella afferente ad un unico livello energetico, cioè che il segnale sia a banda stretta.

Considerando che la  $\chi^{(1)}$  è associata al contributo lineare della polarizzazione e la  $\chi^{(3)}$  a quello non lineare, l'effetto Kerr, è possibile direttamente scomporre, dopo alcuni calcoli [5], la suscettività in parte lineare:

$$(4) \quad \chi_L(\omega_k, t) = \int_{E_g/\hbar}^{\infty} \frac{\mu^2(\zeta)}{\varepsilon_0 \hbar} f(\zeta, \omega_k) d\zeta$$

e non lineare:

$$(5) \quad \chi_{SPM}(\omega_k, t) = \int_{E_g/\hbar}^{\infty} -\frac{\mu^4(\zeta)}{\varepsilon_0 \hbar^3} f(\zeta, \omega_k) \bar{\gamma} \frac{2i\gamma |E_{0k}|^2}{(\omega_k - \zeta)^2 + \gamma^2} d\zeta$$

$$(6) \quad \chi_{XPM}(\omega_k, t) = \int_{E_g/\hbar}^{\infty} -\frac{\mu^4(\zeta)}{\varepsilon_0 \hbar^3} f(\zeta, \omega_k) \bar{\gamma} \sum_{m \neq k} \frac{2i\gamma |E_{0m}|^2 d\zeta}{(\omega_m - \zeta)^2 + \gamma^2}$$

$$\chi_{FWM}(\omega_k, t) = \int_{E_g/\hbar}^{\infty} -\frac{\mu^4(\zeta)}{\varepsilon_0 \hbar^3} f(\zeta, \omega_k) \sum_j \sum_m \sum_{n \neq m} \frac{E_{0m} E_{0j} E_{0n}^*}{E_{0k}} \left( \frac{1}{\omega_m - \omega_n + i\gamma_v} + \frac{1}{\omega_m - \omega_n + i\gamma_c} \right) \left( \frac{1}{\omega_m - \zeta + i\gamma} - \frac{1}{\omega_n - \zeta - i\gamma} \right) d\zeta$$

(7)

con suscettività totale:

$$\bar{\chi}(\omega_k) = \chi_L(\omega_k) + \chi_{SPM}(\omega_k; \omega_k, -\omega_k, \omega_k) +$$

$$\sum_{m \neq k} \chi_{XPM}(\omega_k; \omega_m, -\omega_m, \omega_k) +$$

$$\sum_m \sum_{n \neq m} \sum_j \chi_{FWM}(\omega_k; \omega_m, -\omega_n, \omega_j).$$

(8)

## 3. Densità dei portatori

Considerando una approssimazione [1] della soluzione dell'Eq. (1):

$$(9) \quad N(t) = \bar{N} + \sum_K \Delta N(K\Omega) e^{-jK\Omega t} + \Delta N^*(K\Omega) e^{jK\Omega t}$$

derivandola ed eguagliandola alla Eq. (1) si ottiene:

$$(10) \quad \bar{N} = \frac{I\tau_s}{qV} + \frac{\epsilon\tau_s}{2\hbar} \sum_{k=1}^M \bar{\chi}^*(\omega_k, t) |E_{0k}|^2$$

$$\Delta N(K\Omega) = \frac{i\epsilon}{4\hbar} \sum_{k,j} \frac{\bar{\chi}^*(\omega_k, t) - \bar{\chi}(\omega_j, t)}{\frac{1}{\tau_s} - jK\Omega} E_{0k}^* E_{0j}$$

Osservando tale soluzione, risulta chiaro che la densità dei portatori è modulata anche da segnali continui.

In particolar modo, se la regione attiva dell'amplificatore è attraversata da un pettine di segnali continui, la loro spaziatura equivale alla frequenza di modulazione dei portatori.

#### 4. Simulazioni

Implementando le equazioni precedentemente descritte, sono state realizzate delle simulazioni del fenomeno di modulazione alla frequenza di spaziatura ( $\Delta\lambda_1$ ) di due continue (CW1 e CW2) viaggianti nell'amplificatore, trascurando l'ASE.

Una terza continua (CW3) viene fatta transitare nel dispositivo per valutare l'efficienza del processo in funzione della posizione spettrale.

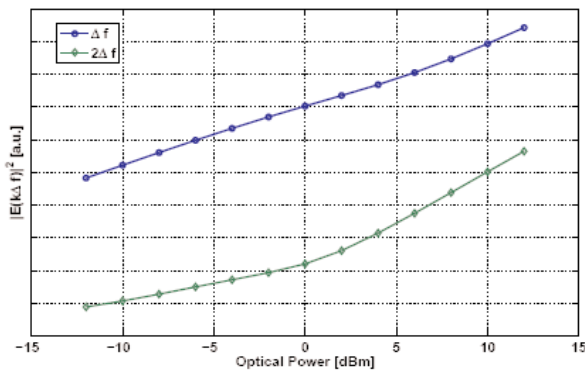


Fig. 1.a: Risposta del SOA al variare della frequenza di CW3 distante  $\Delta f$  e  $2\Delta f$  dalla coppia CW1-CW2: al crescere della potenza di CW1-CW2 la componente di modulazione dell'ondapiù vicina alla coppia di continue cresce in maniera

Secondo la teoria, la variazione dei portatori introdotta dalla coppia di continue, impone sulla terza continua, posta ad una distanza spettrale  $\Delta\lambda_2$  dalla coppia di onde, una modulazione la cui profondità è funzione dell'efficienza del processo e dalla distanza spettrale  $\Delta\lambda_1$ .

Inoltre l'efficienza del processo aumenta col crescere della saturazione del guadagno.

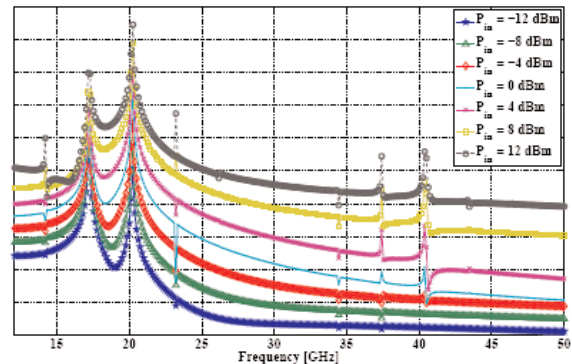


Fig. 1.b: Risposta del SOA per CW3 a 1530nm al variare della potenza di CW1-CW2

#### 5. Set-up sperimentale

Il set up utilizzato è quello mostrato in Fig.2.

I test sperimentali mostrano chiaramente gli effetti di modulazione dei portatori del SOA indotta dalla coppia di continue alla frequenza della loro componente di battimento.

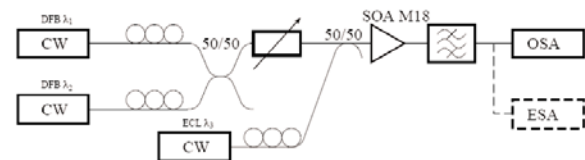


Fig. 2. Set-up sperimentale.  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  hanno una spaziatura variabile di  $\Delta\lambda$ ;  $\lambda_3=1530\text{nm}$ . Il SOA utilizzato è un Alcatel bulk M18 con corrente di pilotaggio di 150mA.

Inviando nell'amplificatore una terza continua, si può osservare come in uscita essa presenti nuove componenti di modulazione nel suo spettro ottico (Fig. 3.b).

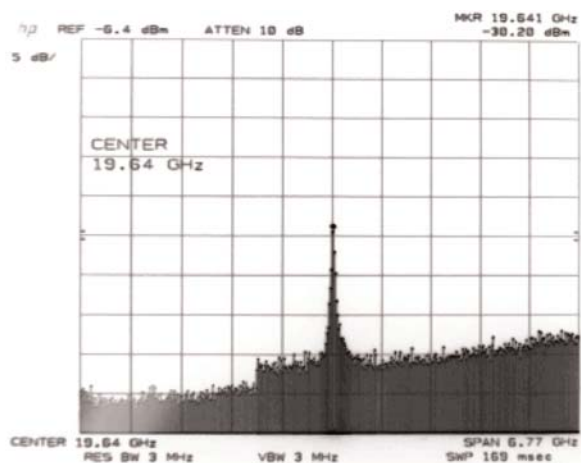


Fig.3.a Spettro elettrico di  $\lambda_3$  con  $\lambda_3=0.15\text{nm}$

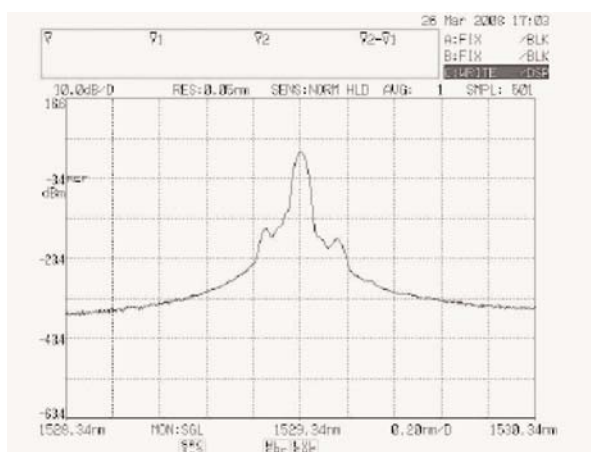


Fig.3.b Spettro ottico di  $\lambda_3$  con  $\lambda_3=0.15\text{nm}$

Inoltre osservando lo spettro elettrico del segnale si nota la presenza di una componente alla frequenza di modulazione (Fig.3.a)

Le due continue a 1542.85 e 1543 nm, generate da due DFB lasers, sono inviate al SOA con-

temporaneamente ed in modo co-propagante alla terza continua a 1530nm, generata da un ECL laser. A causa delle interazioni non lineari delle CW con i portatori dell'amplificatore, le cariche subiscono una modulazione alla frequenza corrispondente alla spaziatura delle due continue dette di pompa poiché generano il fenomeno sotto osservazione. La distanza tra le due continue è opportunamente scelta per visualizzare la componente di modulazione sull'analizzatore di spettro elettrico presente nei nostri laboratori (0-22GHz). Il filtro a banda passante in cascata al SOA permette di selezionare l'uscita dell'amplificatore intorno a 1530 nm.

Si può concludere che l'onda nata dal battimento della coppia di continue, avendo una frequenza dell'ordine dei GHz a cui il SOA è in grado di rispondere, modula la densità dei portatori ad una frequenza pari alla differenza delle frequenze delle due continue [6]. L'efficienza della modulazione dipende da vari fattori tra cui la potenza e la polarizzazione della coppia di segnali che generano il fenomeno stesso.

## 6. Conclusioni

Si è dimostrato che utilizzando un modello matematico basato sul campo ottico e non sulla sua intensità, è possibile osservare non linearità non visibili con modelli basati su Rate Equations. Grazie a questo modello è stato possibile dimostrare analiticamente e verificare sperimentalmente come una coppia di segnali continui induca effetti di modulazione su una terza onda continua dovuti alla variazione della densità dei portatori e quindi del guadagno di amplificazione e dell'indice di rifrazione.

## Reference

- [1] G.P.Agrawal. Population pulsation and nondegenerate four-wave mixing in semiconductor laser and amplifiers. J.Opt. Soc. Am. B., 5:147-159, Jan. 1988.
- [2] C.Z. Ning, R.A. Indik, and J.V.Moloney. Effective bloch equations for semiconductor lasers and amplifiers. IEEE Journal of Quantum Electronics, 33:1543-1550, Sep. 1997.
- [3] M.Asada and Y.Sumeatsu. Density-matrix theory of semiconductor lasers with relation broadening model-gain and gain-suppression in semiconductor lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, 21:434-442, May. 1985.
- [4] A. Uskov, J. Mörk, and J. Mark. Wave mixing in semiconductor laser amplifiers due to carrier heating and spectral-hole burning. IEEE Journal of Quantum Electronics, 30(8):1769-1781, Aug. 1994.
- [5] S. Betti and E. Duca. Soa nonlinearity effects induced on constant envelope signals in wdm systems. Submitted to IEEE Photonic Technology Letters.
- [6] D.M. Forin, F. Curti, G.M. Tosi Beleffi, and F. Matera. All-optical fiber 2 + 1 auxiliary carrier transponderregenerator. IEEE PTL, 17:429-31, Feb. 2005.