

Simulação do desempenho de chaves eletro-ópticas utilizando amplificadores ópticos a semicondutor

Cristiano M. Gallep e Evandro Conforti

Departamento de Microonda e Óptica – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computacional - Unicamp

Resumo — Através da simulação computacional, são apresentados resultados do desempenho de dois tipos de chaves ópticas, acionadas eletronicamente, baseadas em amplificadores ópticos a semicondutor (SOA): em configuração simples e em arranjo interferométrico tipo Mach-Zehnder. Para o primeiro tipo, razão de contraste de ganho de 33dB, com tempos de 270ps (subida) e 190ps (descida) foram obtidos. No segundo tipo, tempos ainda menores, da ordem de 100ps, foram obtidos, para operação em ganho profundamente saturado, porém com grande perda na razão de contraste, que é reduzida de 40dB (ótimo), para menos de 10dB. Uma forma de manter-se o contraste no nível ótimo seria a utilização de níveis crescentes da corrente de alimentação com a potência óptica de entrada, fato que pode não ser de fácil implementação prática.

Palavras-chaves — amplificador óptico a semicondutor, chaves ópticas, dinâmica de ganho óptico, redes ópticas.

I. INTRODUÇÃO

O Amplificador Óptico a Semicondutor (SOA - *semiconductor optical amplifier*) é um dispositivo que poderá ser muito utilizado no expansivo mercado das redes ópticas de telecomunicação [1]. Como dispositivo eletroóptico multifunção, pode ser utilizado em sistemas ópticos como elemento de amplificação, detecção *in-line*, modulação, ou processamento óptico do sinal [2-3]. Com o amadurecimento das técnicas de processamento do sinal no domínio óptico, pretende-se eliminar a conversão para o domínio eletrônico, onde é realizado atualmente tal processamento, e a reconversão para o domínio óptico, onde o sinal é transmitido. Tal procedimento é dispendioso para o sistema no que tange a custo, complexidade, velocidade e consumo de potência, constituindo um dos gargalos das redes ópticas atuais.

Com o aperfeiçoamento do modelamento dos dispositivos eletro-ópticos e a crescente velocidade dos computadores atuais, a simulação das características de funcionamento desses dispositivos constitui importante ferramenta para a diminuição dos custos e dos tempos de concepção e desenvolvimento. Neste contexto, o programa *SOASim* [4] foi criado para facilitar a simulação e análise, no domínio temporal, da amplificação dos sinais luminosos por SOAs, a

partir de modelamento eficiente proposto por Agrawal [5]. A comparação dos resultados fornecidos pelo programa com dados experimentais foi realizada para os casos de operação em saturação profunda [6], com controle dinâmico de ganho [6-7] e nas respostas ao degrau e ao impulso de corrente eletrônica de alimentação [8], mostrando boa capacidade de predição dos resultados.

A partir do algoritmo implementado para o programa *SOASim*, foi desenvolvido para este trabalho o *MZIwSOA*, programa que simula o comportamento de um sinal óptico dividido entre dois braços de um interferômetro tipo Mach-Zehnder, amplificado e combinado novamente à saída do interferômetro. Tal amplificação pode ocorrer em ambos (dupla) ou em apenas um dos braços (simples) do interferômetro. O comprimento de cada um dos braços pode ser configurado de maneira que os sinais a serem combinados possuam uma diferença de fase conveniente.

Neste trabalho são apresentados e comentados resultados teóricos para características relevantes de operação do SOA como chave óptica acionada eletronicamente. Os diagramas são apresentados na Fig.1, nas configurações simples (a) e em arranjo interferométrico tipo Mach-Zehnder com amplificação simple (b).

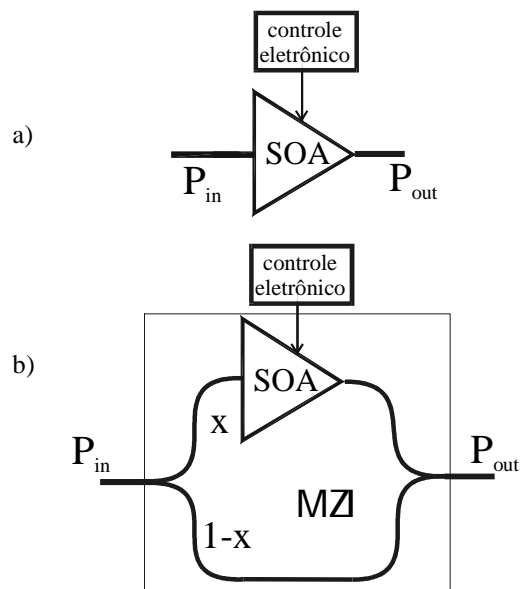


Fig. 1 – Duas configurações para chaves eletroópticas baseadas em amplificadores ópticos a semicondutor: simples (a) e em arranjo interferométrico (b).

II. MODELAMENTO

O modelamento completo utilizado pode ser consultado em [4]. Os parâmetros utilizados na simulação com o *SOASim* e com o *MZIwSOA* foram extraídos a partir da comparação das simulações com dados experimentais [4,6-8] e são apresentados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Comprimento de onda de operação	1.550 μm
Densidade de portadores na transparência	$2.10^{18}/\text{cm}^3$
Ganho de seção transversal	$2.10^{16}.\text{cm}^2$
Coefficiente de atenuação	20/cm
Refletividade nas facetas	0.0001
Fator de ênfase de largura de linha	5
Índice de refração efetivo	3.4
Fator de confinamento	0.4
Perda de inserção	5 dB
Coefficientes de recombinação de portadores:	
por defeitos/armadilhas	$5.10^7/\text{s}$
radioativo	$5.10^{-10}.\text{cm}^3/\text{s}$
Efeito Auger	$7.5.10^{-29}.\text{cm}^6/\text{s}$
Dimensões da cavidade ativa: Largura	1.4 μm
Altura	0.2 μm
Comprimento	350 μm

Os coeficientes de recombinação dos portadores por armadilhas (*A*), radioativo (*B*) e Auger (*C*), são utilizados para o cálculo, a cada passo temporal, do tempo de vida diferencial dos portadores elétricos no interior da região ativa, τ_c , como expresso em (1):

$$\tau_c = \left(\frac{dR}{dN} \right)^{-1} = (AN + BN^2 + CN^3)^{-1} \quad (1)$$

onde *R* é taxa total de recombinação e *N* a densidade dos portadores [5]. Desta forma, as flutuações do tempo de vida em relação à densidade de portadores elétricos são levadas em conta no comportamento dinâmico do dispositivo.

Este tempo de vida diferencial é o fator limitante da resposta dinâmica do amplificador. Na aproximação para pequenos sinais aqui utilizada, as propriedades dinâmicas das não-linearidades são governadas pelo tempo de vida efetivo dos portadores τ_{eff} , [9]:

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_c}{1 + P/P_{sat}} \quad (2)$$

onde *P* é a média da potência óptica propagando no interior da região ativa e P_{sat} a potência de saturação da amplificação. Desta forma, ao operar-se o dispositivo em profunda saturação, pode-se reduzir os tempos de resposta de centenas para poucas dezenas de picossegundos [10].

O fator de ênfase de largura de linha [5] determina a relação entre as componentes real e imaginária do ganho óptico, de forma que quanto maior o seu valor, maior a

mudança de fase inserida no sinal óptico para um determinado ganho de amplitude.

III. RESULTADOS

As figuras de mérito comumente utilizadas para a caracterização do desempenho de uma chave óptica são: 1) os tempos de mudança de estado da chave, denominados t_{sub} , na transição entre o baixo (*lb – low bias*) e o alto (*hb – high bias*) nível de corrente de polarização (*off-on*); 2) t_{desc} , na transição inversa (*on-off*); 3) a relação entre os níveis estáticos destes estados, ambos em função da potência óptica de entrada [10]. Esses tempos são definidos como o intervalo temporal da transição entre 10% e 90% do nível superior atingido para a subida (*off-on*), e vice-versa na descida (*on-off*).

Um exemplo típico da resposta (potência óptica de saída, P_{out}) de um SOA a um degrau de corrente é ilustrado na Fig.2, para uma potência óptica de entrada $P_{in}=0.02\text{W}$ (SOA profundamente saturado). Pode-se notar claramente a dinâmica mais lenta do dispositivo na resposta da transição de subida em relação a transição de descida. Tal diferença (entre os tempos de subida e descida) pode ser explicada pela dependência dinâmica do tempo de vida dos portadores com a concentração dos mesmos, explicitada em (1). Desta forma, imediatamente antes do degrau de descida da corrente eletrônica, o tempo de vida dos portadores é baixo devida a alta densidade dos mesmos e o dispositivo tem uma melhor resposta dinâmica que na subida do degrau eletrônico, onde a baixa densidade inicial de portadores resulta numa resposta mais lenta do SOA.

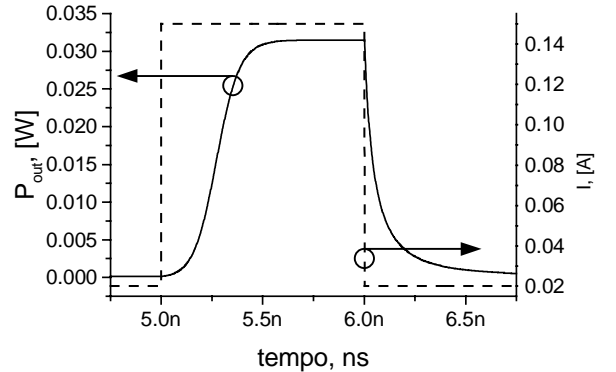


Fig. 2 - Potência óptica de saída (linha cheia) em resposta a degrau de corrente de polarização (linha tracejada).

Simulando os tempos de resposta da chave óptica simples (Fig.1(a)) para diversos níveis de potência óptica de entrada, obteve-se a Fig.3. Nesta figura observa-se o comportamento de saturação profunda do SOA para P_{in} maior que 5 mW. A partir deste valor, o tempo de subida começa a diminuir e o de descida a aumentar de maneira como que fossem convergir para um mesmo valor.

Para os mesmos níveis de potência de entrada, foram coletados os ganhos ópticos para nível de corrente alto (G_{hb} ,

$I_{hb}= 150\text{mA}$) e baixo (G_{lb} , $I_{lb}= 20\text{mA}$). A razão do contraste de ganho C ($G_{hb}- G_{lb}$) que caracteriza a diferença entre o nível de potência óptica de saída para a chave “fechada” (*off*) e “aberta” (*on*), foi também obtida. Estes três resultados são apresentados na Fig.4, onde a saturação de ganho pode ser notada a partir de $P_{in} = 0.5 \text{ mW}$, potência a partir da qual começa a cair o nível da razão ganho/atenuação do SOA.

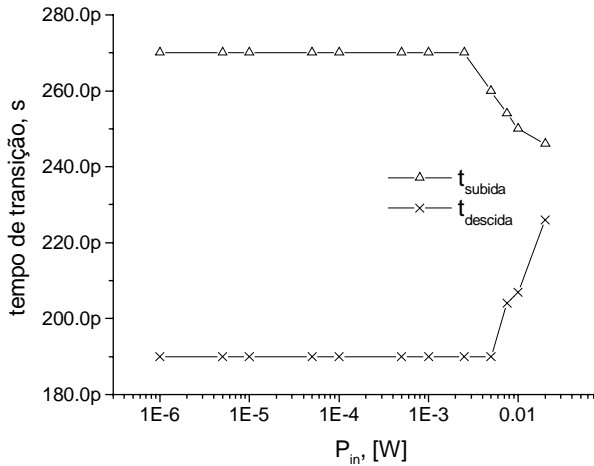


Fig. 3 - Tempos de subida e descida versus potência óptica de entrada para SOA configuração simples da Fig.1(a).

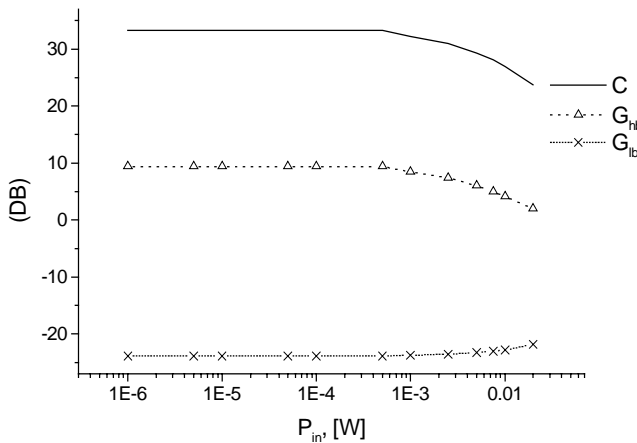


Fig. 4 - Razão de contraste de ganho C , ganho para nível alto de corrente G_{hb} e para nível baixo de corrente G_{lb} , versus potência óptica de entrada para SOA simples da Fig.1(a).

Tentando diminuir os tempos de resposta obtidos com a chave baseada no SOA em configuração simples, implementou-se o programa *MZIwSOA* para simular o chaveamento eletro-óptico via SOA em arranjo interferométrico tipo Mach-Zehnder (Fig.1b). Com esse tipo de montagem, a diferença de fase introduzida no sinal amplificado em um dos braços do interferômetro é utilizada para realizar uma combinação destrutiva ou construtiva com o sinal que propaga pelo outro braço, sem amplificação neste caso. Este tipo de arranjo interferométrico utilizando SOAs

foi utilizado para implementação prática de *add/drops* e demultiplexadores, com controle totalmente óptico, em taxas de até 40 Gbit/s [11,12].

Para simular-se o chaveamento na estrutura, calibraram-se os níveis baixo e alto do degrau de corrente eletrônica. Desta forma, o sinal óptico amplificado apresenta-se com uma diferença de fase de $-\pi$ (53.2mA) e -4π (187.4mA), respectivamente, para $P_{in}= 10 \mu\text{W}$. Após ser amplificado pelo SOA, o sinal em um dos braços do interferômetro interage destrutivamente com o sinal que viaja pelo outro braço quando $I_{bias}=I_{lb}$ e interage construtivamente quando $I_{bias}=I_{hb}$. Para minimizar o sinal presente na saída quando $I_{bias}=I_{lb}$, os sinais parciais (cada um de um braço) precisam ter a mesma amplitude para cancelarem-se completamente. Para possibilitar tal ocorrência, o fator x de divisão de potência entre os braços foi calibrado para 0.42, isto é, o braço com elemento ativo recebe 42% da potência de entrada e o restante é acoplado ao braço passivo. Assume-se acoplamento perfeito dos sinais nos guias dos braços.

Comparando os resultados das Fig. 4 e 5, observa-se um ganho na razão de contraste de ganho C de 9 dB, para o caso ótimo de $P_{in}= 10 \mu\text{W}$, em relação à configuração simples da Fig.4. Porém, o desempenho é degradado facilmente com o crescimento de P_{in} . Esta alteração interfere suficientemente no ganho do SOA, de maneira a afastar as diferenças de fase dos pontos ótimos, como mostrado na Fig.6, resultado claro da saturação de ganho do dispositivo.

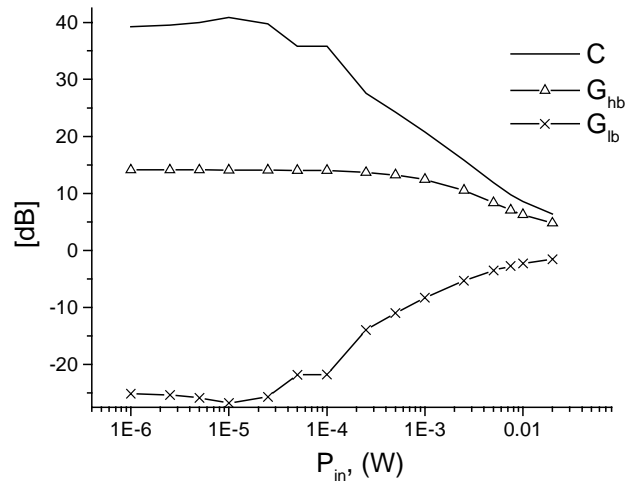


Fig. 5 - Razão de contraste de ganho C , ganho para nível alto de corrente G_{hb} e para nível baixo de corrente G_{lb} , versus potência óptica de entrada para SOA em arranjo interferométrico tipo Mach-Zehnder (MZI) da Fig.1(b).

Com relação aos tempos de transição, apresentados na Fig.7, observa-se melhora de cerca de 25%, em comparação à Fig.3, no que se refere à subida do degrau. Porém, os tempos de descida degradam-se consideravelmente, dobrando seu valor. Nota-se, a partir de $P_{in}= 1 \text{ mW}$, uma queda brusca nesses tempos. Porém, nesta região, a razão de contraste C (Fig.5) já se apresenta bastante degradada. Para $P_{in}< 1 \text{ mW}$, os tempos de subida e descida apresentam um

comportamento oscilatório com P_{in} . Tal oscilação poderia ser explicada por alterações no tempo de relaxação da cavidade devido às alterações no nível da potência de entrada. Esse comportamento oscilatório pode ser observado também na Fig.5, somada a uma exponencial de saturação de ganho.

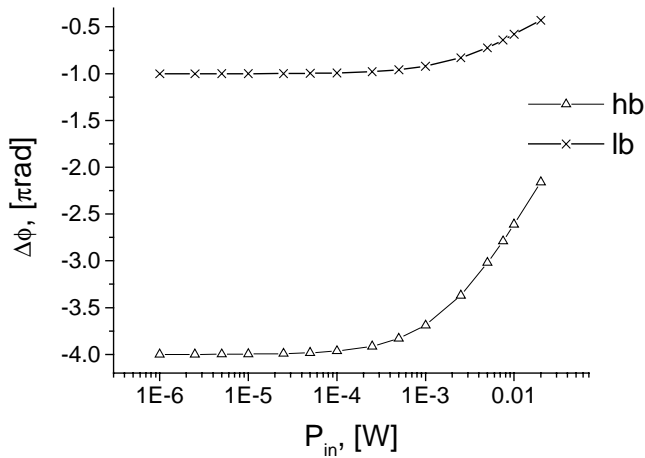


Fig. 6 - Diferença de fase entre os sinais finais nos dois braços do interferômetro MZ da Fig.1(b).

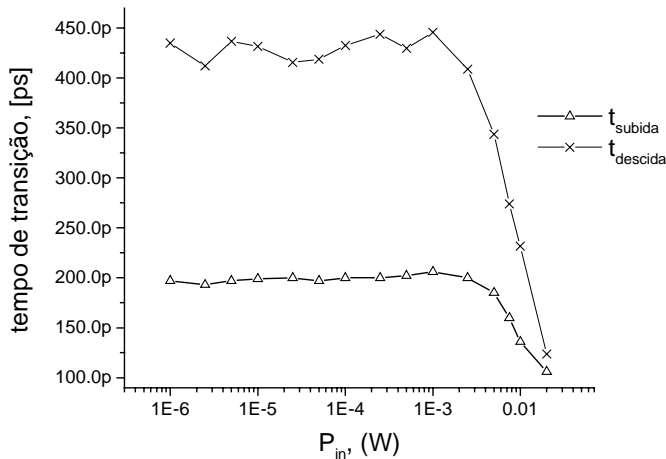


Fig. 7 - Tempos de subida e descida versus potência óptica de entrada para SOA configuração MZI da Fig.1(b).

Uma maneira de se compensar a saturação de ganho do SOA, de forma a tornar o desempenho estático da chave (C) independente da potência óptica de entrada, é utilizarem-se níveis crescentes para a corrente de alimentação do SOA, como ilustrado na Fig.8. Nessa figura observa-se que os ganhos são praticamente constantes com o crescimento da potência óptica de entrada, fato devido aos valores utilizados para os níveis do degrau de corrente. Tais valores de corrente foram otimizados de forma que as diferenças de fase fossem mantidas nos valores ótimos ($-\pi/-4\pi$), apresentando valores crescentes com o aumento da potência óptica de entrada.

Na Fig.9 é apresentado o comportamento dos tempos de chaveamento óptico para a configuração otimizada descrita. Observa-se que os tempos de transição caem gradualmente com o aumento da potência óptica de entrada, não apresentando a queda abrupta devido à saturação da Fig.7. Observam-se também tempos inferiores a 100 ps quando da operação com potência óptica de entrada de 10 mW, onde o dispositivo se encontra profundamente saturado

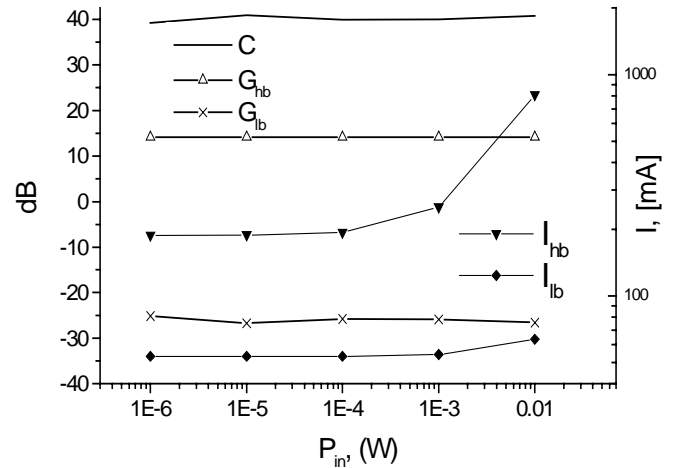


Fig.8 - C , G_{hb} , G_{lb} , I_{hb} e I_{lb} versus potência óptica de entrada para SOA em configuração MZI otimizada.

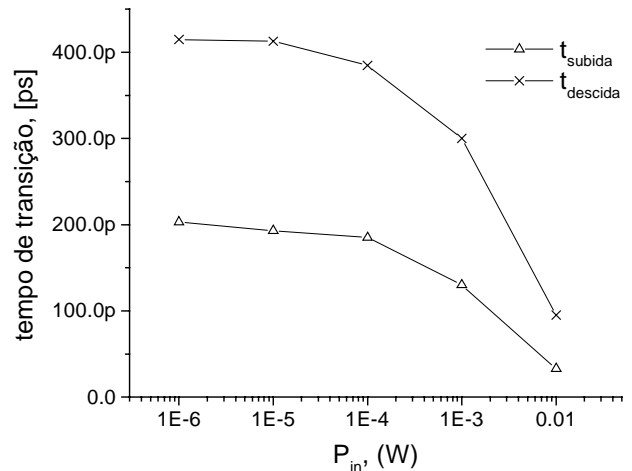


Fig.9 - Tempos de subida e descida versus potência óptica de entrada para SOA configuração MZI otimizada.

III. CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Foram apresentados resultados de simulação computacional para as características de operação para dois tipos de chaves ópticas acionadas eletronicamente e baseadas em amplificadores ópticos a semiconductor, SOA. Para o primeiro tipo, em configuração simples, a razão de contraste de ganho apresentou valores máximos de 33 dB, para uma operação em ganho não saturado e degrau instantâneo de

corrente de alimentação de 20-150-20 mA. Os tempos de chaveamento obtidos nesta configuração foram de 270ps (t_{subida}) e 190ps ($t_{descida}$), chegando, quando profundamente saturado o dispositivo, à 246ps e 226ps, respectivamente.

No segundo tipo de configuração, utilizando arranjo interferométrico tipo Mach-Zender, foram obtidos chaveamentos com contraste $C = 40\text{dB}$ e tempos da ordem de 200ps (t_{subida}) e 425ps ($t_{descida}$), para operação fora da saturação e degrau instantâneo da corrente de alimentação de 53.2-187.4-53.2 mA, chegando à 106ps e 123ps, respectivamente, quando em saturação profunda do SOA. Porém, para o caso interferométrico a operação do SOA sob saturação reduz drasticamente a razão de contraste de ganho C , figura de mérito do chaveamento, já que a diferença de fase entre os sinais dos dois braços do interferômetro depende do ganho do SOA. Uma forma de se manter as diferenças de fase nos valores ótimos, independentemente da profundidade de saturação do dispositivo, é otimizar-se os níveis de corrente utilizados no chaveamento com a potência óptica de entrada de forma que se mantenha o contraste praticamente invariante.

Possíveis problemas para a implementação prática dessas chaves estariam, entre outros, nos níveis limitados de potência óptica de entrada dos SOAs, devido à fragilidade das coberturas anti-refletivas utilizadas, limitando o nível de saturação que poderia ser atingido; na dificuldade tecnológica da construção de estruturas monolíticas que integrassem um interferômetro passivo e a cavidade ativa; no crescimento dos efeitos eletrônicos (capacitâncias e indutâncias) parasitas e de aquecimento que podem ser muito aumentados com o crescimento corrente de alimentação como os níveis utilizados na simulação. Uma solução para a integração MZI-SOA estaria na construção de dispositivos totalmente ativos, porém com problemas relativos à saturação do ganho [13].

Para a realização da simulação do chaveamento totalmente óptico, como utilizado em [11-12], um novo modelamento para o SOA, incluindo estruturas MQW, multi-canais co e contra-propantes, está sob estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 - M. J. O'Mahony - "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems" - *J. Lightwave Tech.*, Vol. 6, Nº. 4, abril/1988.
- 2 - R. J. Manning, A. D. Ellis, A. J. Poustie e K. J. Blew - "Semiconductor laser amplifier for ultrafast all-optical signal processing" - *J. Optical Soc. of America B*, Vol. 14, Nº 11, pag. 3204-3216, nov./1997.
- 3 - Y. Shibata, Y. Yamada, K. Habara e N. Yoshimoto - "Semiconductor laser diode optical amplifiers/gates in photonic packet switching" - *J. Lightwave Tech.*, Vol. 16, Nº 12, pag. 2228-2235, dez./1998.
- 4 - C. Gallep, E. Conforti, J. P. B. Custódio, A. Bordonalli, S. H. Ho e S. M. Kang, - "SOASim: a Simulator for Semiconductor Optical Amplifier with Feed Gain Control" - Proceedings do IMOC'99 (International Microwave and Optoelectronics Conference), Rio de Janeiro / 9-12 ago/1999, pag. 386-390.
- 5 - Agrawal G. P. & Dutta N. K., *Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold - 1993.
- 6 - E. Conforti, S. H. Ho, A. Bordonalli, C. M. Gallep, J. P. B. Custódio, R. Simão e S. M. Kang, - "Optical Carrier Reuse with Gain Compression and Feed-Forward Semiconductor Optical Amplifiers" - Proceedings do IMOC'99 (International Microwave and Optoelectronics Conference), Rio de Janeiro / 9-12 ago/1999, pag. 381-385.

7 - E. Conforti, C. M. Gallep, A. Bordonalli, S. H. Ho e S. M. Kang - "Eye diagrams of extinction ratio improvement using feed-forward current injection in a semiconductor optical amplifier" - submetido ao IX SBMO (IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica), a ser realizado em João Pessoa, Paraíba, Brasil, de 07 a 10 de agosto de 2000.

8 - C. M. Gallep, F. A. Lebeis e E. Conforti - "Resposta à modulação de corrente em amplificadores ópticos a semicondutor" - submetido ao IX SBMO, como anterior.

9 - M. J. Adams, D. A. O. Davies, M. C. Tatham e M. A. Fisher - "Nonlinearities in semiconductor laser amplifiers" - *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 27, 1995, pag. 1-13.

10 - A. Ehrhardt, M. Eisel, G. Großkopf, L. Kuller, Reinhold Ludwig, W. Pieper, R. Shnabel e H. G. Weber - "Semiconductor Laser Amplifier as Optical Switching Gate" - *J. Lightwave Technology*, Vol. 11, Nº 8, pag. 1287-1295, ag./1993.

11 - E. Jahn, N. Agrawal, H. J. Ehrke, R. Ludwig, W. Pieper e H. G. Weber - "Monolithically integrated asymmetric Mach-Zehnder interferometer as a 20Gbit/s all-optical add/drop multiplexer for OTDM systems" - *Electronics Lett.*, Vol. 32, Nº 3, pag. 216-217, fev./1996.

12 - E. Jahn, N. Agrawal, M. Albert, H. J. Ehrke, D. Franke, R. Ludwig, W. Pieper, H. G. Weber e C. M. Weinert - "40Gbit/s all-optical demultiplexing using a monolithically integrated Mach-Zehnder interferometer with semiconductor laser amplifiers" - *Electronics Lett.*, Vol. 31, Nº 21, pag. 1857-1858, out./1995.

13 - C. Janz - "Integrated SOA-based interferometers for wavelength conversion and photonic signal processing" - *Proceedings of LEOS'99* (Laser and Optoelectronic Symposium), pag. 782.