

Simulações do desempenho de um conversor de comprimento de onda baseado em amplificador óptico a semiconductor

André L. Rayol Cavalcante, Cristiano M. Gallep e Evandro Conforti, Senior Member, *IEEE*

Resumo—A implementação das futuras redes ópticas de alto desempenho depende do processamento do sinal no domínio óptico. Muitos subsistemas têm sido desenvolvidos no intuito de tornar o processamento óptico uma realidade. O conversor de comprimento de onda promete agregar muitas facilidades e maior flexibilidade a estas redes. Apresenta-se, neste trabalho, simulações para um conversor de comprimento de onda via modulação cruzada de ganho baseado em amplificador óptico a semiconductor (SOA). Seu princípio de funcionamento é demonstrado e possíveis melhorias em seu desempenho são indicadas.

Palavras-Chave—amplificador óptico a semiconductor, conversão em comprimento de onda, modulação por ganho cruzado, redes totalmente ópticas.

Abstract—All optical networks promise high performance with large capacity. In order to achieve this, all optical processing is required. Wavelength converters can offer many ways to carry out processing functions. A wavelength converter, based on cross gain modulation by semiconductor optical amplifier, is presented. Limitations and advantages are analyzed. Also, it is shown how conversion bandwidth can be increased by SOA's built parameters.

Keywords—all optical networks, cross gain modulation, wavelength conversion, semiconductor optical amplifier

I. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos sistemas de comunicação tem possibilitado o surgimento de novos serviços nos últimos tempos. Educação à distância, tele-medicina, vídeo “on demand”, aplicações multimídia e outros só são viáveis graças a grande velocidade e a outras facilidades encontradas nestes sistemas. A internet, meio de comunicação já bastante popularizado, demandou, como os outros, rápida evolução na transferência de informações. Como meio de transmissão capaz de sustentar esse elevado tráfego, a fibra óptica está apta a dar suporte a redes de maior velocidade que ainda estão por vir. Mesmo com tanto avanço, a banda disponibilizada pela fibra continua subutilizada. As redes WDM (*wavelength division multiplex*) surgem como sistemas que oferecem a possibilidade de utilização mais eficiente da largura de banda deste meio de transmissão.

Para que as redes WDM possam demonstrar todo seu potencial é necessário que o processamento do sinal seja realizado

no domínio óptico. Busca-se então a implementação de redes totalmente ópticas, conjunto de sistemas e subsistemas onde o sinal elétrico, uma vez convertido em sinal óptico, não é mais convertido em sinal elétrico até atingir o seu destino [1].

Até hoje, sistemas de comunicação ópticos consistem basicamente em links ópticos de conexão ponto a ponto entre comutadores eletrônicos [2]. A evolução das futuras redes, como as redes WDM, dependerá de componentes de alto desempenho para a realização de funções no domínio totalmente óptico. Atualmente novos meios são utilizados na obtenção de subsistemas de processamento. Têm-se, por exemplo, os amplificadores a fibra dopada com Érbio (EDFA - Erbium doped fiber amplifiers) e os amplificadores ópticos a semiconductor (SOA - semiconductor optical amplifier). Qualquer que seja o meio utilizado para fins de processamento, este deve apresentar considerável não-linearidade. Além desta, o SOA é um dispositivo promissor na obtenção de funções de processamento, por suas características de dinâmica dos portadores, compactação, largura de banda e integração com outros dispositivos.

A motivação deste trabalho está no estudo de um destes dispositivos: o conversor em comprimento de onda. Mais especificamente, na investigação de potencialidades de um conversor em comprimento de onda baseado em amplificador óptico a semiconductor (SOA).

II. O AMPLIFICADOR ÓPTICO A SEMICONDUTOR

Constituído a partir de uma cavidade laser, o amplificador óptico a semiconductor pode ser obtido basicamente de duas maneiras: pela operação da cavidade abaixo do limiar de oscilação (chamado de *Fabry-Perot SOA* - FP-SOA), ou através do recobrimento das facetas com um material anti-reflexivo, a fim de diminuir significativamente a realimentação na cavidade (chamado de *TW-SOA* - *traveling-wave SOA*) [3].

A amplificação nestes dispositivos obedece ao mesmo princípio utilizado no laser, ou seja, é conseguida via emissão estimulada. O ganho óptico é possível graças à inversão de população, conseguida quando o dispositivo é bombeado, seja este bombeio óptico ou elétrico. O ganho varia com o comprimento de onda e com a potência do sinal incidente [3].

A. Não-linearidades em SOAs

Ao operar-se o amplificador óptico a semiconductor (SOA) com sinal de entrada alto o suficiente, de modo a atingirem-se

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, FAPESP e CNPq. A. L. R. Cavalcante e C. M. Gallep são alunos e E. Conforti é professor do Departamento de Microonda e Óptica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp.

níveis de saturação, a densidade de portadores varia significativamente, provocando a variação do ganho e do índice de refração da cavidade. Tal comportamento é não linear, provocando efeitos indesejáveis principalmente no que se refere à amplificação simultânea e mistura de canais em sistemas FDM (*frequency division multiplexing*) e WDM (*wavelength division multiplexing*). Entre estes efeitos estão a saturação do ganho, a interferência por saturação induzida (*saturation-induced SI crosstalk*) e por modulação induzida da densidade de portadores (*carrier-modulation-induced - CMI*).

Apesar de apresentarem efeitos indesejáveis na amplificação multicanal, essas não-linearidades têm sido identificadas como fontes potenciais para a obtenção de funções, que serão aplicadas principalmente no processamento de sinais no domínio óptico. Entre elas estão: conversão de comprimento de onda, multiplexação e demultiplexação óptica, regeneração 2R (*regeneration & reshape*), regeneração 3R (*regeneration, retiming & reshape*) [4], recuperação de relógio, chaveamento espacial e temporal e compensação da dispersão. Tais funções baseiam-se em efeitos não lineares como: auto-modulação de fase (SPM - *self-phase modulation*) [5], modulação cruzada de ganho (XGM - *cross gain modulation*) [6], modulação cruzada de fase (XPM - *cross phase modulation*) e mistura de quatro ondas (FWM - *four wave mixing*).

III. CONVERSORES ÓPTICOS

Muitas vantagens serão agregadas às redes pela inserção de conversores de comprimento de onda em sua configuração. Algumas delas são maior capacidade e flexibilidade das redes, através da reutilização e bloqueio de comprimentos de onda. Diminui-se também o gerenciamento central, deixando esta função mais dividida entre os diversos nós.

A capacidade dos sistemas WDM é limitada pelo número de canais que podem ser empregados, pelo congestionamento de comprimentos de onda e por requisitos característicos de cada sistema. O número de comprimentos de onda na rede WDM determina o número de canais independentes [7]. Apesar desse número ser grande o suficiente para atender a demanda de informação, pode não ser grande o suficiente para suportar o número de nós. Neste caso a probabilidade de bloqueio cresce em função da possibilidade de contenção de comprimentos de onda. Ou seja, o desempenho e a velocidade geral da rede caem por que, apesar de haver banda suficiente para a transmissão da informação não há, ainda que momentaneamente, como alocar o comprimento de onda que está sendo utilizado naquele momento, o que ocasiona atrasos. Uma forma de solucionar este problema é converter os comprimentos de onda dos sinais que se deseja transmitir, em outros comprimentos de onda. O benefício da conversão em comprimento de onda varia com a arquitetura e com o tráfego da rede. Uma rede pequena pode não precisar de conversores e não ter altas taxas de bloqueio. Já uma rede grande, com considerável tráfego, será amplamente beneficiada com a conversão. Geralmente o benefício cresce com o crescimento do tráfego.

Conversores baseados em amplificadores ópticos a semicondutor são particularmente interessantes por sua capacidade de integração e por sua implementação quase sempre mais

simples. Nestes, a conversão, no domínio totalmente óptico, é conseguida através de efeitos não-lineares como XGM, XPM e FWM. Os conversores podem ser utilizados como parte integrante de comutadores e roteadores entre outros [8].

IV. MODULAÇÃO CRUZADA DE GANHO (XGM)

O princípio da modulação cruzada de ganho (XGM) é demonstrado na Fig. 1. Um sinal modulado em amplitude, de comprimento de onda λ_1 , é injetado no amplificador e modula o ganho do SOA devido à sua saturação. Um segundo sinal, de onda contínua (CW), em um comprimento de onda λ_2 previamente escolhido, é também injetado no amplificador. Este sinal é então modulado pela variação do ganho do SOA. Desta maneira, o sinal de saída em λ_2 terá a mesma informação que o sinal em λ_1 . Um filtro na saída do SOA pode eliminar o sinal em λ_1 . O esquema contra-propagante permite que o sinal de entrada seja convertido em um sinal de mesmo comprimento de onda (possibilitando a não conversão). Neste caso, o filtro não é utilizado. Nos dois casos, o sinal de saída aparece invertido com relação ao sinal de entrada [9].

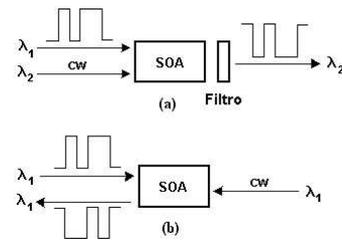


Fig. 1. (a) Esquema XGM co-propagante (b) Esquema XGM contra-propagante.

A conversão em comprimento de onda é uma aplicação baseada em efeitos não-lineares como modulação cruzada de ganho (XGM) e modulação cruzada de fase (XPM). Suas propriedades dinâmicas dependem diretamente do tempo de vida efetivo dos portadores τ_{eff} . Combinando altas correntes de polarização a moderadas potências de entrada (mW) pode-se reduzir consideravelmente o tempo de vida dos portadores. Para isso, a potência óptica deve estar presente continuamente ou em alta frequência, de maneira que a população de portadores não consiga restaurar seu valor significativamente em relação ao valor de saturação [10]. Tal princípio é utilizado para obter respostas rápidas na conversão em comprimento de onda via XGM.

A equação que demonstra o acoplamento entre os feixes no XGM, para pequenos sinais, é dada por [11]:

$$\frac{\partial p_i}{\partial z} = [\Gamma a_i (N - N_{o,i}) - \alpha_{int}] p_i + \Gamma P_i a_i n_p. \quad (1)$$

com

$$n_p = \frac{-\sum_i (N_e - N_{o,i}) \frac{p_i}{E_{sat,i}}}{\frac{1}{\tau_c} + \sum_i \frac{1}{\tau_{s,i}} + j\omega}, \quad (2)$$

onde Γ , α_i , $N_{o,i}$, N_e , α_{int} , $E_{sat,i}$, τ_c , τ_s são o fator de confinamento, o coeficiente de ganho da secção transversal, a densidade de portadores necessária à transparência, a densidade de portadores em regime, as perdas internas do amplificador, a energia de saturação, o tempo de vida das emissões espontâneas e estimuladas, respectivamente. Supõe-se na análise um sinal modulado com variação temporal senoidal em que as potências de regime são P_1 e P_2 , e as potências oriundas da modulação estão representadas por p_1 e p_2 .

A. Considerações sobre a largura de banda de conversão

A magnitude da perturbação para a população de portadores é governada pela Eq. (2), que descreve a resposta da densidade de portadores devido à amplificação dos sinais de perturbação. A Eq. (2) fornece também a frequência de corte (3 dB) dada por $\frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau_{eff}}$, onde o tempo de vida efetivo local τ_{eff} é dado por:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_c} + \sum_i \frac{1}{\tau_{s,i}}. \quad (3)$$

Pode-se imaginar que o mesmo limite em frequência se aplica ao mecanismo de conversão em comprimento de onda. Entretanto, medidas experimentais mostram outro comportamento. Considerações sobre a Eq. (1), mostram que seu último termo, que representa o acoplamento da componente de onda contínua na componente de sinal variante no tempo, age de forma a comprimir o ganho para baixas frequências. Para altas frequências a densidade de portadores não consegue acompanhar a variação do sinal, deste modo, a compressão é removida [11]. Este efeito tende a aumentar a largura de banda além daquela que é determinada pelo denominador da Eq. (2). Tal efeito, relacionado à propagação dos sinais dentro do amplificador óptico a semiconductor, aumenta a largura de banda de conversão, tornando o conversor óptico baseado em SOA apto a operar em maiores taxas. A discrepância no valor da largura de banda calculado pela Eq. (3) e o valor medido experimentalmente ocorre porque a relação entre o tempo de vida efetivo dos portadores e a largura de banda só é válida localmente. A resposta do SOA à modulação deve considerar a evolução longitudinal dos sinais no dispositivo.

Analisando a propagação dentro do SOA teria-se: um pulso e um sinal de onda contínua incidem sobre a mesma face do amplificador, e se propagam ao longo de sua região ativa. Na parte inicial do amplificador, devido à resposta lenta dos portadores (região de relativa baixa potência), o pulso sofre distorções (filtragem). Essas distorções se apresentam na forma de picos nas transições do pulso. Na parte final do SOA, em função da potência já ser significativamente maior, e devido aos pronunciados picos nos pulsos, os portadores são mais rapidamente excitados. Como consequência, seu tempo de vida diminui o que acaba aumentando a largura de banda. Esse efeito decorrente da propagação dentro do dispositivo é conhecido como *traveling-wave* e *saturation filtering* e é responsável pelo aumento na largura de banda de conversão além do que seria esperado levando-se em conta somente o tempo de vida efetivo dos portadores [12].

Pode-se identificar parâmetros que aumentam a largura de banda dos conversores baseados em SOA. Através de um modelo que considera os efeitos longitudinais no amplificador [13] percebe-se que a largura de banda aumenta com o incremento da corrente de polarização do dispositivo, com a potência óptica de entrada, com o fator de confinamento e com o ganho diferencial. O cascadeamento de dispositivos também influencia a largura de banda de conversão como será mostrado nas simulações.

V. SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentadas os resultados das simulações relativas ao ganho de conversão em comprimento de onda via modulação cruzada de ganho. As simulações foram feitas de forma a verificar a eficiência de conversão bem como a influência de mudanças em parâmetros de construção do amplificador óptico a semiconductor neste processo.

Para a simulação foi utilizado o software Z-SOA [14], um programa desenvolvido na linguagem C com interface amigável. O Z-SOA, através de resultados anteriormente apresentados, já demonstrou sua eficácia tendo sido utilizado também na previsão de respostas como, por exemplo, no chaveamento eletro-óptico ultra-rápido (técnica PISIC) [15]. No Z-SOA pode-se ajustar os parâmetros relativos à cavidade, bem como outros parâmetros relativos à simulação.

A Fig.2 mostra o ganho de conversão simulado. Um aspecto que deve ser notado é a característica de passa-baixa presente no canal de saída. Apesar de não terem sido apresentadas curvas para o canal de entrada do sinal modulado, o fato de ter-se o canal de saída como um passa-baixa, reforça a idéia de que o canal de entrada comporta-se como um passa-alta, o que balancearia a resposta do SOA dentro da região ativa do amplificador. Deste modo, tem-se para o canal de entrada, uma curva complementar à curva apresentada na Fig.2. Em função destas características, ter-se-á o efeito de propagação de onda dentro do dispositivo (*traveling-wave*) [13] responsável pelo aumento na largura de banda dos conversores baseados em SOA.

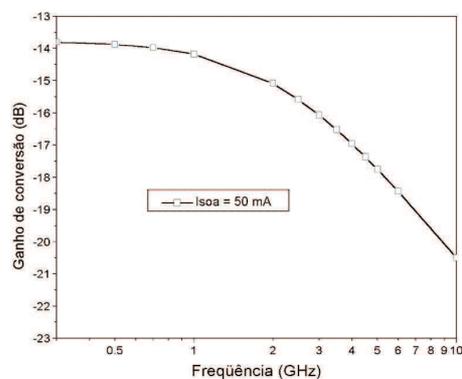


Fig. 2. Ganho de conversão simulado.

A Tabela I mostra os parâmetros tomados como padrão nas simulações. Em todas as comparações apresentadas nesta seção, serão explicitados os parâmetros que foram modificados

ficando os parâmetros que não forem mencionados automaticamente quantificados com os valores apresentados na tabela.

TABELA I
VALORES DE REFERÊNCIA PARA A SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Corrente SOA	50 mA	Coefic. espalhamento	100 m^{-1}
Comprimento (L)	0,65 mm	Perda de inserção	3,2 dB entrada 2,32 dB saída
Largura (x)	0,25 mm	Reflexão nas facetas	0,1%
Espessura (y)	0,1 mm	Coeficiente de difusão	$7,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
λ_1	1541 nm	Corrente de transparência	19,15 mA
λ_2	1568 nm	Coeficiente ganho a1	$2,5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Coeficiente recomb. A	$3 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	Coeficiente ganho a2	$4,3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
Coeficiente recomb. B	$4,5 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$	Coeficiente ganho a3	$1 \times 10^{25} \text{ m}^{-4}$
Coeficiente recomb. C	$7,5 \times 10^{-41} \text{ m}^6/\text{s}$	Coeficiente ganho a4	$4 \times 10^{-32} \text{ m}^4$
P1	794 mW	Coeficiente absorção	2000 m^{-1}
P2	370 mW	Fator de confinamento.	0,4

A. Influência da Corrente de Polarização

A primeira comparação realizada foi a do aumento da largura de banda com o aumento da corrente de polarização, explicitada na Fig. 3.

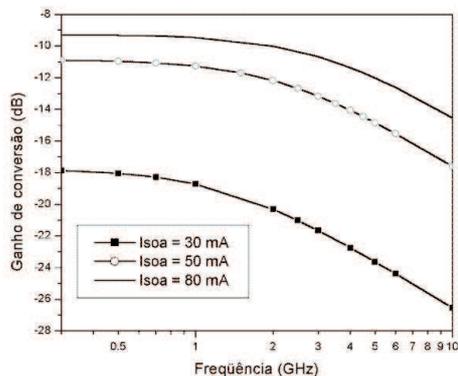


Fig. 3. Variação da largura de banda com o aumento da corrente de polarização.

Foram realizadas simulações para três correntes de polarização nos valores de 30, 50 e 80 mA. Através destas curvas, pôde-se perceber que o ganho de conversão aumenta com a corrente de polarização do amplificador óptico. Este é um resultado esperado já que o ganho do SOA será maior para correntes de polarização maiores, gerando conseqüentemente, um maior sinal na saída. É importante ressaltar que o crescimento do ganho de conversão não apresenta variações tão significativas para correntes de polarização maiores. Próximo à corrente máxima suportada pelo dispositivo em regime, o ganho verificado é ainda menor. Tal comportamento pode ser

facilmente entendido se for considerado que quanto maior a corrente de polarização a que está submetido o amplificador, para uma mesma potência de entrada, mais saturado estará o ganho do amplificador. Ou seja, com o aumento da corrente de polarização há um aumento do ganho mas não de maneira proporcional (região de saturação), sendo este aumento cada vez menor a medida que se aumenta a corrente. Além disso, o crescimento da corrente de polarização ocasiona um aumento na ASE (Amplified Spontaneous Emission - ruído de emissão espontânea amplificado), consumindo maior número de portadores que poderiam ser utilizados na geração do ganho.

Percebe-se que SOAs com maior volume são mais vantajosos por possuírem maior densidade de corrente de regime, deste modo pode-se afirmar que para um amplificador óptico com características similares, o SOA de maior comprimento apresenta maior largura de banda de conversão (operando à mesma densidade de corrente).

A Fig 4 mostra o resultado da simulação feita variando-se o comprimento do dispositivo com a respectiva corrente de polarização aumentada proporcionalmente (mantendo-se a densidade de corrente). Foi simulado o ganho de conversão para um amplificador com comprimento no valor de 0,653 mm com corrente de polarização de 50 mA e para um amplificador com o dobro do comprimento do SOA anterior com corrente de polarização igual a 100 mA.

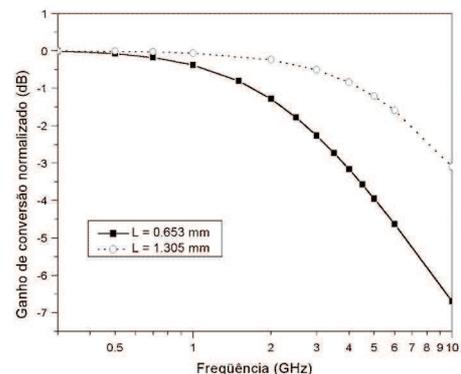


Fig. 4. Variação da largura de banda com o comprimento da cavidade ativa.

Pode-se perceber um aumento considerável na largura de banda de conversão. No maior SOA além da possibilidade de operação a maiores correntes, a largura de banda de conversão aumenta porque os efeitos de propagação dentro do dispositivo são evidenciados.

B. Influência da Potência de Entrada

A influência da potência de entrada na largura de banda de conversão também foi verificada através das simulações. A Fig. 5 mostra o comportamento da largura de banda para correntes de entrada nos valores de 0,06 mW, 1,16 mW e 3,16 mW.

Não surpreendentemente, o ganho de conversão é maior para maiores potências de entrada. Deve-se notar que as diferenças entre os ganhos de conversão não são tão grandes como as que foram apresentadas para os casos nos quais variavam-se as correntes de polarização. O aspecto relevante nestas

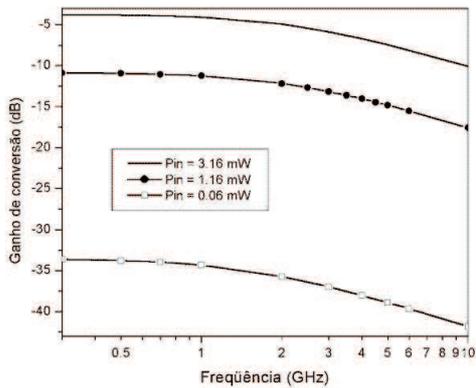


Fig. 5. Variação da largura de banda com o aumento da potência de entrada.

curvas está no aumento da largura de banda que se consegue com o aumento na potência de entrada. É fácil entender que se mais potência for injetada no SOA, mais rapidamente os portadores serão saturados, o que, como já foi analisado, leva a um aumento na largura de banda.

C. Influência do Fator de Confinamento

O fator de confinamento representa a quantidade de campo elétrico que está confinado na cavidade. Matematicamente este fator aparece multiplicando o ganho. Deste modo pode-se esperar que pequenas variações no seu valor provoquem considerável variação na largura de banda de conversão, como mostra a Fig. 6. As simulações foram realizadas para os valores 0,2, 0,4 e 0,6.

Como as comparações têm seu foco principal na largura de banda de conversão, todas as curvas geradas foram normalizadas com relação ao ganho para baixas frequências de forma a facilitar a visualização das mudanças ocorridas nesta característica.

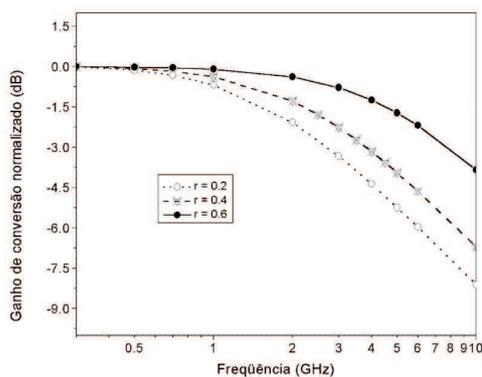


Fig. 6. Variação da largura de banda com o fator de confinamento.

D. Influência do Ganho Diferencial

A curva de ganho do amplificador, nas simulações, é função de quatro coeficientes, a1, a2, a3 e a4 [15]. A modificação do ganho diferencial foi feita apenas através da alteração do coeficiente a1. A Fig. 7 explicita o aumento da largura

de banda com a1, e conseqüentemente com o ganho. As simulações foram feitas para valores de a1 iguais a 1,5, 2,5 e 3.

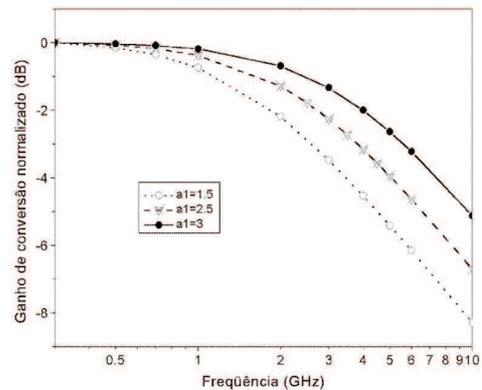


Fig. 7. Variação da largura de banda com o ganho diferencial.

Em relação a melhoria da largura de banda de conversão em função do ganho diferencial, a utilização de SOAs de poços quânticos pode ser mais vantajosa por estes possuírem maiores valores nesta característica.

E. Característica de Filtragem do Amplificador

A característica de filtragem imposta pelo amplificador ao canal 1 (sinal modulado), também pôde ser verificada através das simulações. A Fig. 8 mostra os sinais de saída para pulsos com diferentes valores de potência na entrada. A distorção sofrida pelos pulsos a medida que se aumenta a potência de entrada comprova que o canal 1 se comporta com um filtro passa-alta quando operado na saturação.

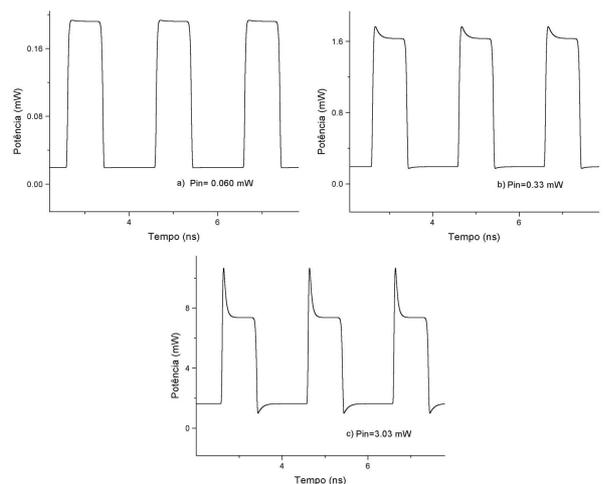


Fig. 8. Distorções nos pulsos demonstrando a característica passa-alta do canal 1. a) Pin: 0,06 mW, b) Pin: 0,33 mW, c) Pin: 3,03 mW.

Além disso a simulação da evolução do pulso ao longo do comprimento da cavidade ativa, mostrada na Fig. 9 confirma os efeitos de propagação que ocorrem no interior do dispositivo. Pode-se perceber que as altas componentes de frequência presentes no sinal são transferidas principalmente no final do

dispositivo (região de maior distorção do pulso). A filtragem ocorre ao longo da extensão do SOA, o que evidencia a importância do comprimento do amplificador na largura de banda de conversão.

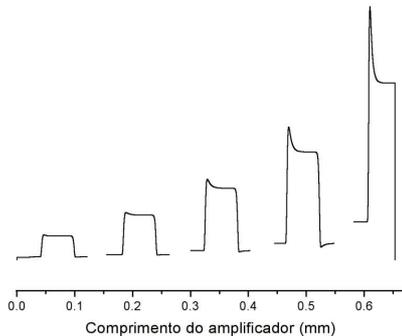


Fig. 9. Evolução do pulso ao longo do comprimento do amplificador.

F. Cascadeamento

Pode-se demonstrar uma relação praticamente linear entre o número de amplificadores presentes em uma cascata e o aumento da largura de banda de conversão [16]. Para verificar este fato, simulou-se a resposta para dois amplificadores cascateados, mostrada na Fig. 10. O cascadeamento foi simulado para SOAs idênticos. Na simulação, o cascadeamento provocou um aumento de 66% na largura de banda de conversão.

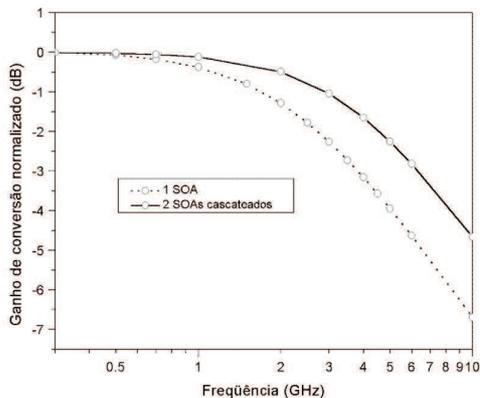


Fig. 10. Simulação para uma cascata com dois amplificadores.

VI. CONCLUSÕES

O princípio de funcionamento de um conversor de comprimento de onda, baseado em modulação cruzada de ganho via amplificador óptico a semiconductor, foi demonstrado. O estudo deste dispositivo acompanha uma forte tendência da comunidade científica na implementação de sub-sistemas para processamento de sinais no domínio totalmente óptico.

Mostrou-se também que as não-linearidades estão sendo utilizadas na implementação de funções de processamento no domínio óptico. Um dispositivo especialmente interessante é o conversor de comprimento de onda. Os benefícios para as novas redes foram discutidos, bem como as facilidades

na obtenção de outras funções, caso os conversores possam ser agregados a dispositivos como roteadores e comutadores ópticos.

Simulações computacionais foram realizadas de maneira a comprovar previsões teóricas. Em todos os casos, indicações de como o desempenho do conversor poderia ser melhorado foram explicitadas.

Ao final deste trabalho pode-se concluir que o amplificador óptico a semiconductor, por características como largura de banda, compactação e não-linearidades, é um promissor componente na obtenção de sub-sistemas de processamento. Percebe-se também que o conversor via XGM baseado em SOA apresenta boa eficiência aliada a simples implementação, além de atingir elevadas taxas de transmissão o que o torna apto a integrar as futuras redes ópticas.

REFERÊNCIAS

- [1] J. P. B. Custódio, "Compressão dinâmica do ganho em cascatas de amplificadores ópticos a semiconductor: simulação e medidas," dissertação de Mestrado FEEC UNICAMP, Out. 1997.
- [2] I. White et al., "Wavelength switching components for future photonic networks," *IEEE Communication Magazine*, pp. 74-81, Set. 2002.
- [3] G. P. Agrawal, *Semiconductors lasers*, 2a ed., New York, 1993.
- [4] J. Leuthold, B. Mikkelsen, R. E. Behringer, G. Raybon, C. H. Joyner, P. A. Besse, "Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 860-862, Aug. 2001.
- [5] G. P. Agrawal, N. A. Olsson "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 2297-2306, Nov. 1989.
- [6] M. Asghari, I. H. White, "Wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 7, pp. 1181-1190, Jul. 1997.
- [7] D. Syvridis, "All-optical wavelength converters based on semiconductor optical amplifiers," *Semiconductor Conference, 2000*, pp. 65-71.
- [8] K. Vlachos et al., "Ultrafast time-domain technology and its application in all-optical signal processing," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 9, pp. 1857-1868, Set. 2003.
- [9] C. Joergensen et al., "All-optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gb/s using semiconductor optical amplifiers," *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 3, no. 5, pp. 1168-1180, Oct. 1997.
- [10] M. J. Adams, D. A. O. Davies, M. C. Tatham, M. A. Fisher, "Nonlinearities in semiconductor laser amplifiers," *Optical and Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1-13, 1995.
- [11] D. A. O. Davies, "Small-signal analysis of wavelength conversion in semiconductor laser amplifiers via gain saturation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 617-619, Jun. 1995.
- [12] D. D. Marcenac, A. E. Kelly, D. Nasset, D. A. O. Davies, "Bandwidth enhancement of wavelength conversion via cross-gain modulation by semiconductor optical amplifier cascade," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 17, pp. 1442-1443, Aug. 1995.
- [13] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S. L. Danielsen, K. E. Stubkjaer, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 942-954, Jun. 1996.
- [14] C. M. Gallep, "SOASIM: simulador de controle dinâmico de ganho em amplificadores ópticos a semiconductor, incluindo validação experimental e aplicações," dissertação de Mestrado FEEC UNICAMP, Ago. 1999.
- [15] C. M. Gallep, "Redução do tempo de chaveamento eletroóptico em amplificadores ópticos a semiconductor," tese de Doutorado FEEC UNICAMP, Ago. 2003.
- [16] A. Mecozzi, D. Marcenac, "Switches and frequency converters based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 6, pp. 749-751, Jun. 1997.