

Equalização do Ganho de Amplificadores Ópticos Usando Grades de Bragg

Beatriz de Jesus Soare e Marcelo E. Vieira Segatto

Resumo—Amplificadores a fibra dopada com Érbio apresentam uma faixa de ganho de aproximadamente 35 nm, tornando possível o uso intenso de sistemas WDM na terceira janela de transmissão. Um grande problema associado a esse tipo de amplificador é a não uniformidade do ganho na faixa de comprimentos de onda de interesse (1550 nm). Nesse trabalho, grades de Bragg em fibra são utilizadas, por meio de simulação, com o objetivo de equalizar a curva de ganho. Os resultados mostram que a escolha criteriosa da grade pode tornar o ganho do amplificador plano em toda a faixa de interesse.

Palavras-Chave—Grades de Bragg, EDFA, ganho, equalização, Comunicações Ópticas.

Abstract—Erbium-doped fiber amplifiers have an a gain bandwidth of approximately 35 nm, which makes the intensive use of WDM systems possible at the third window. A problem associated with this type of amplifier is the non-uniformity of its gain curve in the wavelengths of interest (1550 nm). In this work, fiber Bragg gratings are used to equalize the gain curve. The results show that a criterious choice of the grating can make the gain of the amplifier flat over the whole wavelength band.

Index Terms—Fiber Bragg Gratings, EDFA, gain, equalization, Optical Communications.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos amplificadores ópticos a fibra dopada e compensadores de dispersão [1] possibilitaram o surgimento de sistemas de comunicações ópticas multiplexados em comprimento de onda, ou sistemas WDM, ultra longos e com taxas de transmissão tão altas quanto 40 Gbit/s.

Em poucos anos, os amplificadores a fibra dopada com Érbio (EDFA) revolucionaram as comunicações ópticas, pois amplificam o sinal diretamente no domínio óptico. Sua curva característica do ganho, no entanto, não é plana, o que pode causar problemas como a distorção do sinal óptico e relações sinal-ruído baixas.

Beatriz de Jesus Soares e Marcelo E. Vieira Segatto, Laboratório de Telecomunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, E-mails: beatriz@labtel.ele.ufes.br, segatto@ele.ufes.br.

Existem várias técnicas para equalização do ganho de

EDFA's, dentre elas podemos destacar a aplicação de filtros Mach-Zehnder ópticos [2], filtros em fibra [3] e filtros acustoópticos em cascata com o amplificador [4]. Em todos os casos deseja-se obter um filtro cuja característica espectral seja a inversa do amplificador. Neste artigo analisou-se o uso de grades de Bragg em fibra [5-7] como dispositivo equalizador de ganho. Grades em fibra possuem uma série de vantagens para esse tipo de aplicação: sua construção é rápida e relativamente barata quando comparada com outros tipos de filtros, sua característica espectral pode ser projetada para virtualmente seguir qualquer perfil desejado e, principalmente, essa característica pode ser alterada após sua fabricação [6].

A figura 1 ilustra o esquema do equalizador proposto. Um circulador óptico é inserido após o EDFA, o sinal de saída do amplificador é refletido na grade e volta para o circulador. A grade em fibra utilizada deve possuir uma característica espectral inversa a do amplificador, fazendo com que a resposta do sistema EDFA + circulador + grade seja plana. Duas vantagens do esquema proposto podem ser observadas: com a grade em seu modo de reflexão, o comprimento físico de cada seção é pequeno, fazendo com que sua fabricação seja facilitada e, com ela atuando como um filtro passa-faixa, grande parte do ruído do amplificador é eliminado, diminuindo assim os efeitos nocivos da ASE.

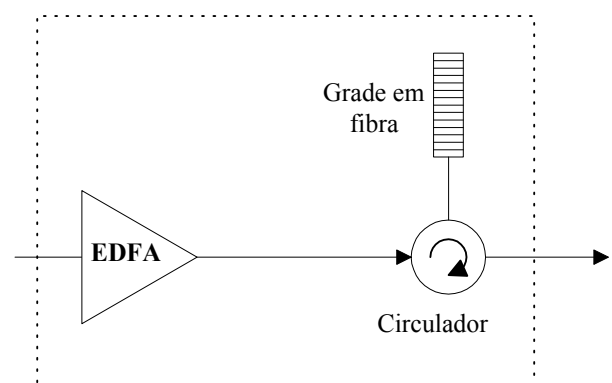


Fig. 1 – Amplificador com ganho equalizado.

Este artigo está dividido como segue: na Seção II é abordado o amplificador e o modelamento do ganho. Na

Seção III a grade de Bragg é descrita. Na Seção IV é tratada a equalização do ganho e por fim são apresentadas as conclusões na Seção V.

II. MODELAMENTO DO GANHO

O EDFA é obtido pela dopagem do núcleo de uma fibra monomodo com Érbio e bombeio com luz num comprimento de onda na faixa de 500, 800, 1000 ou 1500 nm, obtendo-se melhores desempenhos para 980 e 1480 nm. O comprimento de onda do sinal varia entre 1530 e 1560 nm. A potência óptica é transferida do laser de bombeio para o sinal pela emissão estimulada, permitindo atingir ganhos elevados. O ganho depende do comprimento do amplificador L e da potência de bombeio P_p [8].

Nossa discussão será limitada para o caso de um sistema de 2 níveis, com um número arbitrário de sinais de entrada: o nível terra e o nível de excitação. Bombeando o amplificador com laser operando em 980 ou 1480 nm consegue-se obter a inversão de população de elétrons, ou seja, a fração de elétrons que se encontra no nível excitado passa a ser muito superior à fração no nível terra. Assim, se considerarmos uma inversão completa da população (todos os elétrons estão no nível excitado), qualquer fóton com comprimento de onda de, por exemplo, 1550 nm que incidir no amplificador irá estimular a emissão de outros fótons com a mesma energia e momento linear (emissão estimulada de fótons). Esse mesmo fóton incidente será absorvido pelo meio se não existir inversão da população (todos os elétrons se encontram no nível terra), de onde se conclui que a inversão de população deverá ser completa para o ganho do amplificador ser elevado. Por outro lado, um elétron que se encontre no nível excitado pode decair espontaneamente para o nível terra (emissão espontânea de fótons), podendo o fóton gerado nesse processo estimular a emissão de outros fótons. Esses fótons não são coerentes e, sendo amplificados, compõem um ruído que será somado ao sinal. Tal ruído amplificado é conhecido como ASE. Para amplificadores com ganho menor que 20 dB (nosso caso), esse efeito pode ser desprezado. É importante observar que este ruído é de natureza intrínseca (quântica), não podendo ser totalmente suprimido, representando uma limitação fundamental do amplificador.

O modelo utilizado para a obtenção do ganho leva em consideração um amplificador de comprimento L , com densidade de átomos ativos ρ no interior de um volume ativo de área de seção transversal A . Um número arbitrário N de sinais de comprimento de onda λ_k e potência $P_k(z,t)$ se propagam pelo amplificador na direção indicada por u_k . Para sinais entrando em $z = 0$, $u_k = 1$, enquanto sinais entrando em $z = L$, $u_k = -1$. A equação de taxa para a fração da população do nível excitado $N_2(z,t)$ é:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = -\frac{N_2(z,t)}{\tau} - \frac{1}{\rho A} \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial P_j(z,t)}{\partial z}. \quad (1)$$

A fração da população do nível terra $N_1(z,t)$ é obtida de $N_1(z,t) + N_2(z,t) = 1$. A luz na fibra está sujeita a absorção ou emissão estimulada em taxas que dependem do comprimento de onda. A seção transversal para emissão estimulada e absorção no comprimento de onda λ_k são σ_k^e e σ_k^a . A variação da potência do k-ésimo sinal é descrita como:

$$\frac{\partial P_k(z,t)}{\partial z} = \rho u_k \Gamma_k [(\sigma_k^e + \sigma_k^a) N_2(z,t) - \sigma_k^a] P_k(z,t) \quad (2)$$

onde Γ_k é o fator de confinamento do amplificador no comprimento de onda λ_k .

Nas condições de estado estacionário, as densidades de população e as potências ópticas não dependem do tempo. Daí, relembrando que $u_k^2 = 1$ e obtendo $N_2(z,t)$ fazendo $\partial N_2(z,t) / \partial t = 0$ em (1), podemos escrever (2) como:

$$\frac{u_k}{P_k(z)} dP_k = - \left[\alpha_k + \frac{1}{P_k^{IS}} \sum_{j=1}^N u_j \frac{dP_j(z)}{dz} \right] dz, \quad (3)$$

onde $\alpha_k = \rho \Gamma_k \sigma_k^a$ e $P_k^{IS} = A / \Gamma_k (\sigma_k^e + \sigma_k^a) \tau$ são, respectivamente, a constante de absorção e potência de saturação intrínseca do k-ésimo sinal. Integrando (3):

$$P_k^{out} = P_k^{in} e^{-\alpha_k L} e^{(P_{in} - P_{out}) / P_k^{IS}}, \quad (4)$$

onde P_k^{in} e P_k^{out} são as potências de entrada e saída do k-ésimo sinal e

$$P_{in} \equiv \sum_{j=1}^N P_j^{in},$$

$$P_{out} \equiv \sum_{j=1}^N P_j^{out} \quad (5)$$

são as potências totais de entrada e saída. A equação (4) pode ser reduzida a uma equação transcendental simples:

$$P_{out} = \sum_{k=1}^N A_k e^{-B_k P_{out}},$$

$$A_k \equiv P_k^{in} e^{-\alpha_k L} e^{P_{in} / P_k^{IS}},$$

$$B_k \equiv \frac{1}{P_k^{IS}}. \quad (6)$$

Desde que A_k e B_k sejam constantes conhecidas, se α_k , P_k^{IS} e as potências de entrada forem determinadas, esta equação pode ser resolvida para P_{out} . Uma vez calculada a potência de saída total, o resultado pode ser substituído em

(4) para obter diretamente a potência de saída P_k^{out} para cada comprimento de onda.

As equações (4)-(6) são simples. Com elas, a determinação do ganho ou atenuação de N sinais que passam pelo amplificador, foi simplificada. Antes era necessário resolver N equações diferenciais. Agora, apenas uma equação transcendental deve ser resolvida. As diversas propriedades dos materiais e da fibra foram substituídas por dois parâmetros independentes do comprimento do amplificador para cada comprimento de onda utilizado: a constante de atenuação α_k e a potência de saturação intrínseca P_k^{IS} . Esses parâmetros são facilmente determinados pela medida da absorção monocromática simples. Eles caracterizam de forma conveniente as fibras dopadas com Érbio. Uma vez conhecidos para um determinado conjunto de comprimentos de onda, para qualquer tipo de fibra, o ganho e as propriedades de saturação do amplificador de qualquer comprimento feito desse tipo de fibra podem ser preditos.

As referidas equações não dependem de u_k , provando que o ganho independe se o sinal está se propagando no mesmo sentido ou em sentido contrário ao bombeio [8]. O ganho do amplificador para cada comprimento de onda pode ser escrito como:

$$G_k = 10 \log_{10} \left(\frac{P_k^{out}}{P_k^{in}} \right) [\text{dB}] \quad (7)$$

e ilustrado na figura 2.

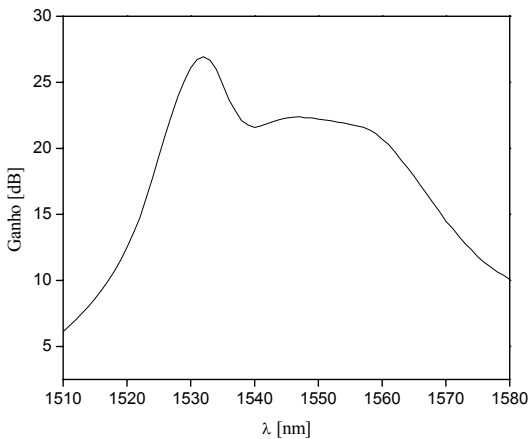


Fig. 2. Curva ganho x comprimento de onda.

III. GRADE DE BRAGG EM FIBRA

Uma grade de Bragg em fibra consiste de uma perturbação

periódica no índice de refração efetivo do núcleo n_{eff} de uma fibra monomodo, descrita por

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (8)$$

onde ν é o *fringe*, $\phi(z)$ é o *chirp* da grade (para grades uniformes $\phi(z) = 0$), $\overline{\delta n_{eff}}$ é o valor médio “dc” da mudança do índice de refração espacial sobre o período Λ da grade.

A condição de Bragg é

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (9)$$

A luz que se propaga ao longo do núcleo será espalhada em cada plano da grade. Se a condição de Bragg não for satisfeita, os comprimentos de onda refletidos em planos subsequentes se tornarão progressivamente fora de fase, vindo eventualmente a serem cancelados. Essa reflexão, muito baixa em cada plano, ocorre em virtude do descasamento do índice de refração. Quando um comprimento de onda que satisfaz a condição de Bragg encontra a fibra, as contribuições dos comprimentos refletidos se somam (interferência construtiva) na direção contrária à direção de propagação formando um pico refletido reverso, cujo comprimento de onda central λ_B é definido

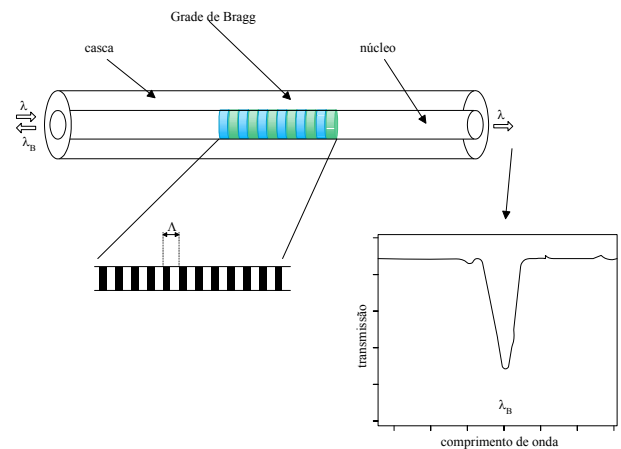


Fig. 3. Grade de Bragg uniforme.

pelos parâmetros da grade. Esse processo está ilustrado na figura 3.

IV. EQUALIZAÇÃO DO GANHO DO EDFA

Neste trabalho implementou-se uma rotina para simular o sistema da figura 4, composto por um gerador de seqüência NRZ com taxa de transmissão de 2.5 Gbit/s, 80 Km de fibra

óptica monomodo padrão e o amplificador equalizado. Para o projeto do amplificador equalizado da figura 1, foram utilizados como parâmetros o número de sub-grades que compõe a grade, o comprimento de onda de Bragg (λ_B), o $\overline{\delta n_{eff}}$ e o comprimento (l) de cada sub-grade. A região de equalização do ganho escolhida vai de 1526 a 1562 nm e os parâmetros do amplificador utilizados são mostrados na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DO EDFA UTILIZADO.

λ_p	1480 nm
L	5 m
P_p	17 dBm
A	$4,5239 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
ρ	$10^{25} \text{ átomos/m}^3$

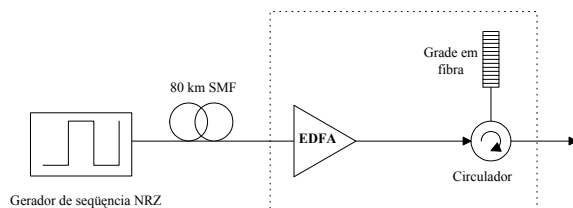


Fig. 4. Sistema simulado.

Cada sub-grade foi projetada para refletir uma pequena parte do espectro, tornando sua escolha mais fácil. Inicialmente determina-se o número total de sub-grades e os respectivos λ_B . Posteriormente o comprimento das sub-grades e variação efetiva do índice de refração foram determinados com o auxílio do programa computacional FGP (*Fibre Grating Program*), desenvolvido para esse propósito [9]. A grade projetada contém 19 seções, e os valores dos parâmetros λ_B , $\overline{\delta n_{eff}}$ e l estão ilustrados na Tabela II.

A figura 5 mostra as respostas do amplificador e da grade formada pelas 19 sub-grades. Nota-se na figura a curva de equalização formada pela grade. Uma grande vantagem do projeto das sub-grades é a redução do ruído do amplificador uma vez que o ganho é equalizado somente dentro das bandas passantes do sistema WDM.

A figura 6 ilustra o ganho, a refletividade e o ganho equalizado do amplificador. Nota-se nesta figura que o ganho foi equalizado em 7.66 dB na faixa de 1530 nm e que a variação da curva resultante, i.e. ganho equalizado, é agora de apenas 0.63 dB.

TABELA II
COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG, VALOR MÉDIO "DC" DA MUDANÇA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO E COMPRIMENTO DE CADA SEÇÃO DA GRADE.

λ_B [nm]	$\overline{\delta n_{eff}}$	l [mm]
1526	0.00032	5
1528	0.000188	5
1530	0.00014	5
1532	0.000128	5
1534	0.000156	5
1536	0.000208	5
1538	0.000275	5
1540	0.000297	5
1542	0.000292	5
1544	0.00026	5
1546	0.000255	5
1548	0.00026	5
1550	0.000267	5
1552	0.000267	5
1554	0.00028	5
1556	0.0002975	5
1558	0.000322	5
1560	0.0004	5
1562	0.001	10

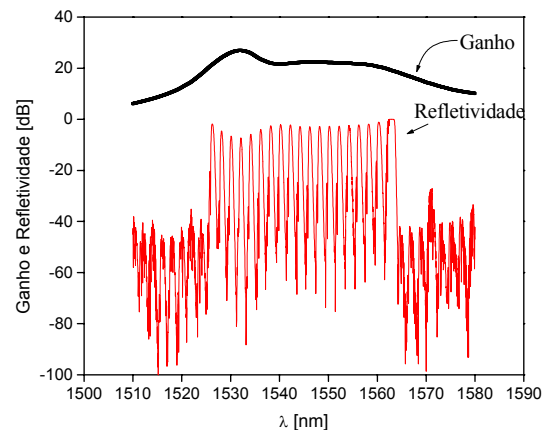


Fig. 5. Curva do ganho do EDFA e da refletividade das grades.

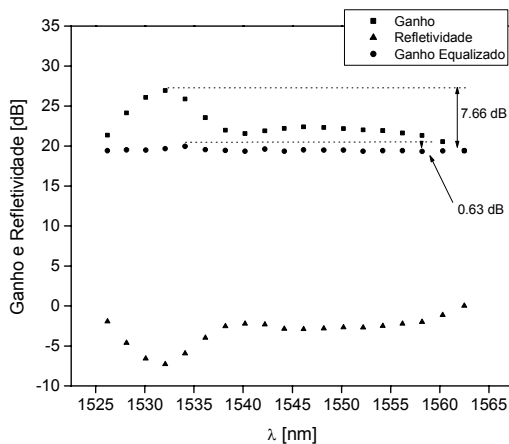


Fig. 6. Resultado alcançado para a equalização do ganho do EDFA. Diferença entre o máximo e mínimo do ganho antes e depois da equalização.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma técnica de equalização de ganho de amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio, utilizando-se grades de Bragg em fibra.

Os resultados mostraram que a grade de Bragg se mostrou eficiente na equalização do ganho do EDFA. A diferença entre os valores máximo e mínimo do ganho equalizado é de 0.63 dB, valor este muito menor que o ganho sem equalização, 7.66 dB.

Uma escolha mais criteriosa das grades pode ser realizada com o auxílio de técnicas de otimização. Duas dessas técnicas, o *Simulated Annealing* [7] ou *Algoritmo Genético* [8], estão atualmente em implementação e os resultados serão apresentados em breve.

REFERÊNCIAS

- [1] G. P. AGRAWAL, "Fiber-Optic Communication System," *John Wiley Professional*, 1992.
- [2] K. INOUE, T. KOMINATO e H. TOBA, "Tunable Gain Equalization Using a Mach-Zehnder Optical Filter in Multistage Fiber Amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, pp. 718-720, 1991.
- [3] L. R. CHENG, D. J. F. COOPER e P. W. E. SMITH, "Transmission Edge Filters for Power Equalization of EDFA's," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, pp. 822-824, Julho, 1990.
- [4] F. SU, R. OLSHANSKY, G. JOYCE, D. A SMITH e J. E. BARAN, "Gain Equalization in Multiwavelength Lightwave Systems Using Acoustooptic Tunable Filters," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, pp. 269-271, 1992.
- [5] T. ERDOGAN, "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 1277-1294, Agosto, 1997.
- [6] R. KASHYAP, "Fiber Bragg Gratings," *Academic Press*, 1999.
- [7] OTHONOS, K. KALLI, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", *Artech House*, 1999.
- [8] M. A. A. SALEH, R. M. JOPSON, J. D. EVANKOW, J. ASPELL, "Modeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, pp. 714-717, Outubro, 1990.
- [9] M. E. V. SEGATTO, "All Optical Bit Parallel Transmission", Tese de Doutorado, Universidade de Londres, 2001.
- [10] J. BAE, J. CHUN, "Design Of Fiber Bragg Gratings Using The Simulated Annealing Technique For An Ideal WDM Filter Bank" Scientific Computing Laboratory, South Korea, 2000.
- [11] J. M. JOHNSON, Y. R. SAMII, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 39, pp. 7-21, Agosto, 1997.