

Uso de Fibras Ópticas dopadas com P_2O_5 em Sistemas de Telecomunicações com Amplificadores Raman

Lopes, J. P. R.¹; Castellani, C. E. S.²

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

joaop.lopes@hotmail.com¹, carlos.castellani@ufes.br²

Resumo

O aumento exponencial na demanda de transmissão de dados, em termos tanto de capacidade quanto velocidade, motivado sobretudo pelo avanço da internet, tornou essencial o desenvolvimento de sistemas de telecomunicações mais robustos e eficientes. Nesse contexto se faz necessário que se desenvolvam amplificadores ópticos capazes de suprir esta necessidade. Uma maneira de atingir este objetivo é com a utilização de amplificadores ópticos baseados no espalhamento Raman em enlaces de fibras ópticas dopadas com altas concentrações de fósforo (P_2O_5), que juntos permitem projetar sistemas com altos ganhos em uma banda óptica possivelmente até maior que 100 nm. A alta não-linearidade das fibras de fósforo, apresentando picos do espectro de ganho Raman em diferentes regiões de separação em frequência, permite uma maior versatilidade no projeto dos amplificadores do que se consegue com o uso das tradicionais fibras de sílica. Aqui apresentamos um estudo numérico comparativo entre estes dois tipos de fibra para o uso em sistemas de telecomunicações, bem como uma técnica de otimização destes amplificadores com fibras de fósforo que permite atingir ganhos médios de até 6 dB com ripple abaixo de 3 dB para uma banda óptica de 120 nm em um enlace de transmissão de 10 km.

Abstract

The exponential increase in demand for transmission data, in terms of both capacity and speed, motivated mainly by the advancement of the Internet, made essential the development of more robust and efficient telecommunications systems. In this context, it is necessary to develop optical amplifiers capable of meeting this need. One possibility to achieve this is by using optical amplifiers based on Raman scattering in optical fibers doped with high concentrations of phosphorus (P_2O_5), which together allow the design of systems with high gains in an optical band possibly even larger than 100 nm. The high nonlinearity of the phosphorus fibers, and its Raman gain spectrum presenting peaks in different frequency separation regions, allow a wider versatility for designing optical amplifiers than what can be achieved with the use of traditional silica fibers. Here we present a comparative numerical study between these two types of fibers for use in telecommunication systems, as well as a technique of optimization of such amplifiers based on phosphorus fibers that allow achieving average gains of up to 6 dB with ripple below 3 dB over a 120 nm optical band on a 10 km transmission link.

Keywords (Palavras chaves): Raman Amplifier, Phosphorus-doped fiber, large bandwidth.

1. Introdução

Até a década de 90, sistemas de telecomunicações com amplificadores à fibra dopada com érbio (EDFA) eram comuns, pois com tais amplificadores para obtenção de altos valores de ganho necessita-se apenas de baixas potências de bombeio (dezenas de mW) [1]. Existe a desvantagem da largura de banda se limitar às bandas C e L (1530-1625 nm), porém se tratava de um bom custo-benefício para a época. Ocorre que para lidar com o crescimento exponencial de tráfego de dados e internet esta largura de banda se tornou insuficiente e outro método que se mostrou como alternativa foi o uso de amplificadores ópticos baseados no efeito do espalhamento de Raman [2].

O emprego da tecnologia de amplificadores Raman nos sistemas de telecomunicações é de extrema importância, pois supera essa restrição de largura de banda que é intrínseca ao uso dos amplificadores a fibra dopada com Érbio. Isto é devido ao seu mecanismo de ganho possuir características como, ocorrência em qualquer tipo de fibra óptica e possibilidade de amplificar qualquer comprimento de onda do sinal, bastando para isso uma escolha adequada do comprimento de onda dos lasers de bombeio [3].

2. Amplificadores Raman

A resposta de um meio dielétrico como a fibra óptica a grandes intensidades de luz é não-linear, e o espalhamento Raman é um resultado desse processo. De maneira geral, a luz incide nas moléculas do meio, que se excitam a níveis vibracionais instáveis e logo decaem de volta a um nível de energia menor, emitindo fótons. Se as moléculas decaírem a um estado vibracional de energia superior ao estado inicial, o fóton emitido terá uma energia diferente do fóton incidente absorvido, logo este estará em um comprimento de onda superior. O tipo de material usado define a variação de frequência entre os fótons incidentes e emitidos, e com isso o espectro de ganho Raman.

Em um sistema de telecomunicações de múltiplos comprimentos de onda, é importante que todos os comprimentos de onda do sinal tenham potências ópticas similares. A variação entre o ganho máximo e mínimo do sinal é conhecida como ripple, e é desejável que esse atributo seja minimizado. Para isso, em amplificadores Raman obtém-se este perfil utilizando múltiplos bombeios em diferentes comprimentos de onda, que transferem potência para o sinal, mas que também interagem entre si.

Inicialmente, muitas das pesquisas envolvendo amplificadores Raman eram realizadas utilizando as fibras ópticas existentes até então, sendo mais comum a fibra de sílica monomodo, em inglês, *single-mode fiber (SMF)*. No entanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias, outros tipos de fibras passaram a ser construídas, com diferentes características de ganho e atenuação, o que possibilita novas pesquisas que explorem estes atributos nas configurações de amplificadores Raman. Nesse contexto, fibras dopadas com elementos exóticos como fósforo, germânio e telúrio, já são uma realidade [4, 5] e seu emprego pode ser uma alternativa à ampliação da capacidade e velocidade dos sistemas de telecomunicações.

Nesta pesquisa especificamente, o foco estabeleceu-se em projetar amplificadores ópticos que estendam a largura de banda para comprimentos de onda além do tradicional atingido pelas fibras de sílica, utilizando para isso uma fibra óptica dopada com óxido de fósforo P_2O_5 (FORC – Photonics P-SM-5) cuja curva de ganho Raman está apresentada pela Figura 1.

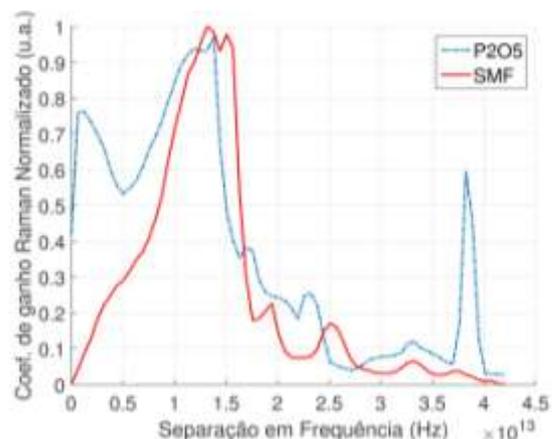


Figura 1: Comparação de curvas de ganho Raman das fibras ópticas monomodo (SMF) e dopada com óxido de fósforo (P_2O_5)

Como nota-se pela visualização da Figura 1, a fibra escolhida para esta pesquisa, dopada com P_2O_5 , tem uma outra grande vantagem que é possuir mais de um pico de ganho Raman, sendo um deles com alta separação em frequência. Este fator auxilia a construção tanto de amplificadores Raman, quanto de lasers Raman, pois permite configurações de bombeios que a fibra SMF não consegue. Um fato que contribui para tal é que menos cascatas de transferência de potência são necessárias para alcançar regiões de comprimentos de onda mais afastados, pela maior separação em frequência existente, como visto na Figura 2 [6].

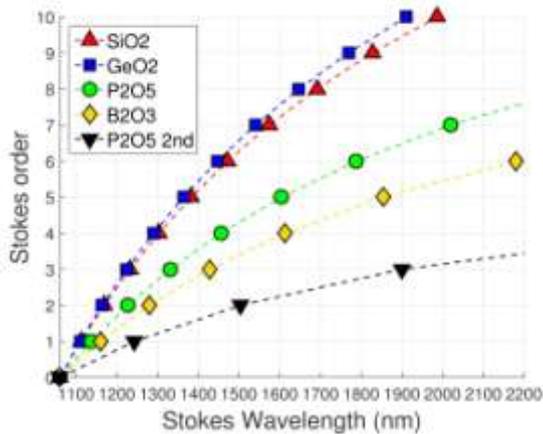


Figura 2: Exemplo da separação em frequência para fibras ópticas dopadas com diferentes tipos de materiais.

3. Metodologia proposta e análise

Devido à grande quantidade de interações não-lineares existentes em uma configuração de amplificador Raman com múltiplos lasers de bombeio, os códigos computacionais que consideram todos estes efeitos possuem tempo de processamento demasiadamente longo, pois métodos numéricos iterativos são utilizados para resolver as equações diferenciais não-lineares de evolução de potência. Como alternativa a isto, é possível utilizar também de um método analítico [7] o qual negligencia alguns efeitos, como a depleção dos bombeios pelo sinal, mas que prediz com boa aproximação valores de ganho e ripple, para valores não muito altos de potência dos bombeios.

A princípio, realizando um estudo de caso comparativo entre amplificadores construídos com a fibra dopada

com P_2O_5 e a SMF, demonstra-se que é possível obter ganhos médios mais altos com a fibra de fósforo, para fibras de diferentes comprimentos, sob os mesmos parâmetros, vide a Figura 3, cujos resultados apresentados foram obtidos pelo método numérico.

Para tanto, foi utilizado apenas um bombeio, situado em 1450 nm e com potência igual a 800 mW. E o sinal ocupava uma banda de 60 nm, de 1520 a 1580 nm. Isto pode ser explicado pela não-linearidade mais alta da fibra de fósforo, apesar de que pelas também altas perdas, não ser eficiente para grandes extensões de fibra. Em relação a isto, é importante constatar que o coeficiente de atenuação α das fibras SMF e de P_2O_5 , na região de 1550 nm relativa ao caso estudado, é de 0,1892 dB/km e 0,8759 dB/km, respectivamente.

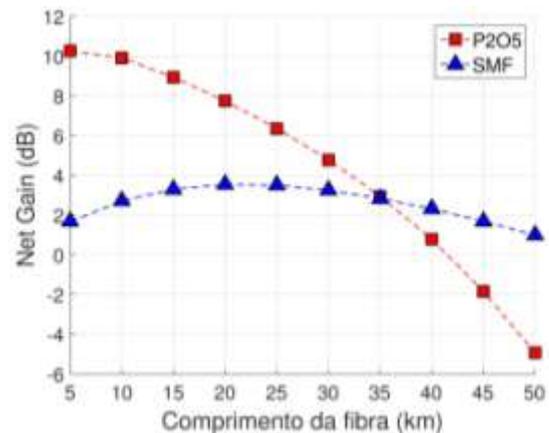


Figura 3: Estudo de caso comparativo entre as fibras SMF e P_2O_5 demonstrando a capacidade de maiores ganhos da fibra de P_2O_5 .

Baseado na metodologia exposta em [8], a qual apropria-se do método analítico para uma investigação inicial do espaço de soluções, gerando uma grande quantidade de casos, decidiu-se proceder da mesma forma para obter uma estimativa razoavelmente boa para expor os aspectos sob pesquisa referentes à fibra óptica de P_2O_5 . Assim, seriam demonstradas explicitamente as vantagens de seu emprego em sistemas de telecomunicações com um caso concreto.

A escolha do comprimento específico de 10 km para o estudo de caso se deu por possibilitar demonstrar as vantagens do uso deste tipo de fibra em redes de curto alcance como este. Existe uma razoável quantidade de aplicações que operam com enlaces de transmissão com distâncias tipicamente entre 5 a 20 km, como por

exemplo, em interconexões e módulos para data centers e redes corporativas. Entretanto, como mostrado na Figura 3, estes resultados não podem ser igualmente considerados no caso de comprimentos muito maiores dos enlaces.

Com a estimativa inicial obtida com o modelo analítico, adquiriu-se os dados exatos utilizando a modelagem numérica citada anteriormente que considera todas as não-linearidades, e o resultado da curva de ganho obtida está exposta na Figura 4. A configuração escolhida forneceu ganho on-off médio de 6,18 dB e ripple de 2,01 dB em uma banda de 120nm (1530 a 1650 nm) e incluía três bombeios com potências e comprimentos de onda como segue: $P_1 = 92,58$ mW, $\lambda_1 = 1461,05$ nm, $P_2 = 19,88$ mW, $\lambda_2 = 1510,97$ nm, $P_3 = 98,24$ mW, $\lambda_3 = 1521,86$ nm.

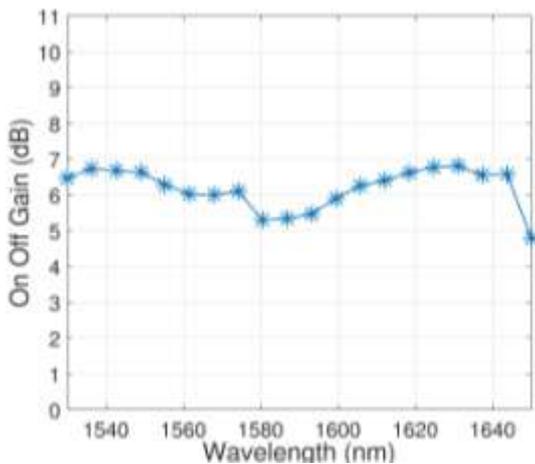


Figura 4: Curva de ganho para uma configuração com 3 bombeios de um amplificador Raman de 10km em uma banda de 120nm.

Este resultado, inclusive permite explorar uma particularidade desta fibra dopada com P_2O_5 que é o pico localizado em alta separação em frequência que pode ser utilizado com um bombeio realizando um “ajuste fino” em uma pequena parte da curva obtida.

De acordo com a equação (1) descobrimos que para uma transferência de potência aproveitando o pico de separação em frequência localizado em 1320 cm^{-1} deve-se adicionar um quarto bombeio em $\lambda_4 = 1354,85$ nm para um ajuste fino na região de 1650 nm. A potência estipulada de $P_4 = 35$ mW permitiu diminuir o ripple para a banda anterior de tal forma que é

desejável estender ainda mais a largura de banda, até um limite superior de 1660 nm.

$$\Delta w(\text{cm}^{-1}) = \left(\frac{1}{\lambda_0(\text{nm})} - \frac{1}{\lambda_1(\text{nm})} \right) \times \frac{(10^7 \text{ nm})}{(\text{cm})} \quad (1)$$

Para a largura de banda anterior de 120 nm, teríamos um ripple de 1,56 dB (melhora de ~ 0.5 dB) e ganho on-off médio de 6,56 dB (melhora de ~ 0.4 dB). Se considerada a largura de banda de 130 nm, o ripple obtido tem o valor de 3,27 dB e ganho on-off médio de 6,38 dB, o que considerando a grande extensão conseguida, se tratam de bons resultados, como vistos na Figura 5.

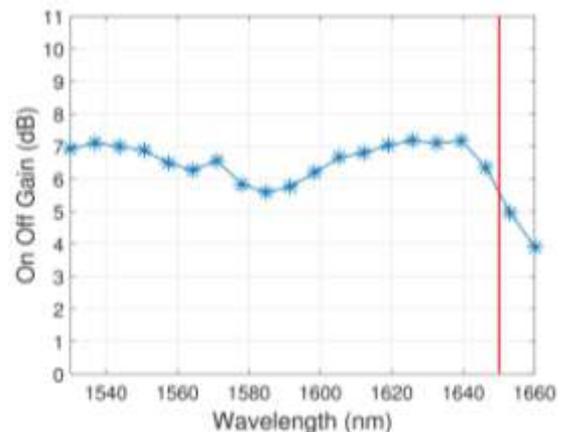


Figura 5: Curva de ganho para uma configuração com 4 bombeios de um amplificador Raman de 10km em uma banda de 130nm.

4. Conclusões

A partir das modelagens realizadas e dos resultados expostos por esta pesquisa, foi possível demonstrar as peculiaridades da fibra dopada com óxido de fósforo P_2O_5 e suas vantagens na construção de amplificadores ópticos Raman. Seus altos valores de ganho ao longo de seu espectro de ganho Raman com picos em diferentes regiões de separação em frequência permitem configurações de amplificadores com extensa largura de banda. Apesar de que pelos também altos valores de atenuação, suas aplicações se restrinjam a enlaces de curto alcance, como por exemplo os usados em data centers.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado pelos autores sob vínculo com o Programa Institucional de Iniciação Científica – PIIC 2017/2018.

6. Referências

- [1] DESURVIRE, E. Erbium Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications. New York: Wiley, 1994.
- [2] NAMIKI, S.; EMORI, Y. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 7(1), 3–16, 2001
- [3] HEADLY, C.; AGRAWAL, G. P. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. 1st ed. Academic Press, 2004.
- [4] SUZUKI, K.; NAKAZAWA, M. Raman amplification in a P2O5-doped optical fiber, Opt. Lett. 13, 666-668, 1988.
- [5] MORI, A.; MASUDA, H.; SHIKANO, K.; SHIMIZU, M. Ultra-wide-band tellurite-based fiber raman amplifier. Journal of Lightwave Technology, 21(5), 1300–1306, 2003.
- [6] CASTELLANI, C. E. S. All fibre wavelength versatile short pulsed laser sources. Tese (Doutorado), Department of Physics, Imperial College, London, 2013.
- [7] CANI, S. P. N. Uma Contribuição ao Modelamento Analítico em Amplificadores Raman. Tese (Doutorado), Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- [8] CASTELLANI, C. E. S.; CANI, S. P. N.; SEGATTO, M. E. V.; PONTES, M. J.; ROMERO, M. A. Design methodology for multi-pumped discrete Raman amplifiers: case-study employing photonic crystal fibers. Opt. Express, 17, pp.14121, 2009.