

Aplicações de Amplificadores de Fibra Dopada de Érbio na banda L

Davide B. M. Pereira, Carlos S. Santos, António L. J. Teixeira, J. Ferreira da Rocha, Mário J. N. Lima, Paulo S. B. André

Resumo – Nesta contribuição pretendemos analisar os princípios e algumas das aplicações de amplificadores de érbio a operarem na banda L, contígua à convencional.

Averiguam-se as vantagens do uso de amplificadores ópticos com grande largura de banda nos actuais sistemas de comunicação. Uma recente técnica de equalização de ganho, por bombagem na banda C, é estudada por simulação, e implementada laboratorialmente. É também concretizado experimentalmente um laser na banda L com tunabilidade acima dos 10nm.

Abstract – In this paper we describe the principles and some of the applications of the erbium amplifier for operation in a band extensible to the conventional.

We will investigate the advantages of using optical amplifiers with large bandwidth on the actual communications systems. Also, we will study and implement a recent technique for equalization of the gain by means C-band pumping. Based on this amplifier a 10nm L-band tunable laser will also implemented.

I. INTRODUÇÃO

A Era da Informação, em que vivemos, é caracterizada pela total conectividade entre as populações, usando novas e avançadas tecnologias de comunicação. O aumento do tráfego na Internet, e da Web em particular, são exemplos concretos disso. A necessidade de sistemas de comunicação com elevadas capacidades, para taxas de transmissão cada vez mais elevadas, são uma realidade presente.

Os modernos sistemas de comunicação por fibra óptica permitem conceber sistemas com os requisitos pretendidos, fazendo uso da elevada largura de banda de baixa atenuação da fibra., combinada com a técnica de Multiplexagem no Comprimento de Onda (WDM).

O espectro óptico onde a fibra apresenta menor atenuação é na região dos 1550nm, numa largura de banda de aproximadamente 100nm. Este espectro foi dividido em bandas de 30nm, nomeadamente, banda S⁺ (1450-1480nm), banda S (1480-1530nm), banda C (1530-1570nm), banda L (1570-1610nm), e banda L⁺ (1610-1650nm), para mais fácil referência.

As soluções inicialmente encontradas para amplificação óptica nos 1550nm, centravam-se na utilização da banda C e do Amplificador de Fibra Dopada

de Érbio (EDFA)^[1]. A exploração de ganho na banda C rapidamente se tornou limitada face às exigências necessárias, e outras bandas de baixa atenuação têm vindo a ser exploradas.

Neste trabalho pretendemos fazer um estudo sobre o comportamento do EDFA na banda L e da aplicabilidade a sistemas WDM. Apesar do princípio de obtenção de ganho nesta banda, ter sido descoberto à uma década atrás^[2], este continua a ser objecto de intenso estudo na actualidade^{[3]-[6]}.

Neste artigo começaremos por apresentar as principais funcionalidades do amplificador óptico, e averiguar das necessidades destes dispositivos nos sistemas de comunicação actuais.

Seguidamente, apresentamos na secção III o EDFA, e o seu princípio de funcionamento.

Na secção IV é feito o dimensionamento, e optimização do amplificador para obtenção de ganho equalizado. É aplicada a recente técnica de equalização baseada em bombagem na banda C^{[3],[6]}. Em ^[3] a bombagem é feita com um laser, e os resultados apresentados são obtidos por método experimental, não tendo tido qualquer tipo de validação pela simulação. No trabalho de ^[6] é efectuado o estudo experimental de multi-bombagem na banda C. No presente trabalho, e pela primeira vez, ambos os modos de bombagem são efectuados por simulação e testados no laboratório. Usou-se o simulador VPI ComponentMaker[®] Fiber Amplifier, da Virtual Photonics Incorporated[®]. Os resultados são testados experimentalmente no laboratório, fazendo uso de uma Fibra Dopada com Érbio (EDF) comercializada pela Sumitomo[®].

Testa-se na secção V uma configuração em anel do amplificador, a fim de obtenção de um laser na banda L. O artigo termina com algumas conclusões.

II. NECESSIDADE DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS

O aumento extraordinário que se verificou na capacidade dos sistemas de comunicação por fibra óptica ao longo da década de 90, deveu-se essencialmente a três grandes factores^[7],

- O aparecimento do *amplificador óptico* e a sua rápida divulgação e aceitação no mercado

- A aplicação do amplificador óptico ao WDM
- Desenvolvimento de técnicas de controlo da dispersão, que permitiram resolver parte das limitações inerentes à propagação do sinal devido à dispersão cromática e aos efeitos não lineares da fibra

Com a aplicação WDM diferentes comprimentos de onda podem ser transmitidos na mesma fibra. Cada canal destes pode estar multiplexado no tempo (OTDM), o que permite um aumento ainda mais substancial da capacidade global do sistema. No entanto, a implementação eficaz do WDM necessita de regeneração do sinal entre o emissor e o receptor devido às perdas por atenuação existentes na fibra. Uma das soluções encontradas inicialmente para fazer face a este problema foi o regenerador electrónico.

Na regeneração electrónica os sinais ópticos eram convertidos em sinal eléctricos, por detecção através de um fotodíodo (PIN). No domínio eléctrico os sinais eram depois amplificados, e efectuados reajustamentos de relógio e de impulso. Finalmente o sinal era novamente convertido para domínio óptico por meio de um laser de semiconductor.

As duas grandes desvantagens dos regeneradores electrónicos eram o preço, e limitação dos desempenhos do sistema e a opacidade. Nesta última temos o facto de um regenerador só poder trabalhar a taxas de transmissão pré-determinadas, para um formato de modulação único, e apenas num único comprimento de onda. As desvantagens dos regeneradores tornam-se assim mais evidentes, quando se pretende aumentar a capacidade do sistemas pelo uso do WDM.

O aparecimento do amplificador óptico, especificamente o EDFA, mudou a face dos sistemas de então. O EDFA era capaz de amplificar simultaneamente diversos sinais num largura de banda de 3THz. Com o aparecimento do EDFA os sistemas WDM tornaram-se atractivos. Ao nível de comunicações de longo curso também aqui o EDFA suplantou o regenerador electrónico, pois, as distâncias entre regeneradores tornaram-se maiores e com menores custos associados.

O amplificador óptico é um dispositivo indispensável, que permite uma melhoria das performances das comunicações de longo curso, e das comunicações com WDM. O amplificador melhora assim os índices largura de banda (B) e distância (D), ou seja, aumenta a capacidade dos sistemas (B*D).

III. PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO E MODELIZAÇÃO

Na Fig. 1 é apresentado uma diagrama com os níveis de energia do ião de érbio. O processo de absorção de um fóton ocorre quando for fornecido ao meio um fóton de 980nm ou 1480nm (desprezam-se estados superiores a $I_{9/2}$ para os efeitos que nós pretendemos).

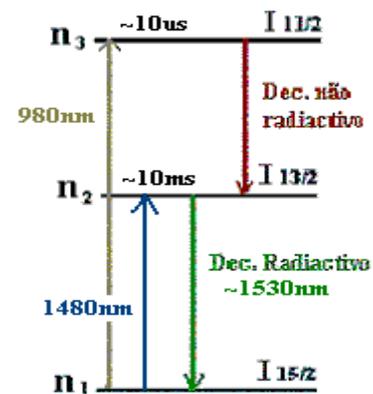


Fig. 1 – Esquema simplificado que ilustra os três níveis de mais baixa energia no ião de Érbio

Este amplificador permite obter ganho na região dos 1550nm, que corresponde ao processo de emissão estimulada de um fóton. Se a emissão não for estimulada, isto é, se não existir um fóton incidente que obrigue um ião em estado excitado a descer de nível, então temos um processo de emissão espontânea, que é ruído. Ao processo de emissão espontânea dá-se o nome de ASE (Amplified Spontaneous Emission). O valor do ruído nos EDFAs é por norma bastante baixo, ronda os 3-5dB.

Uma das figuras de mérito deste amplificador é o facto de possuir um nível meta-estável ($I_{13/2}$) com um tempo de vida elevado (10ms), o que faz com que este amplificador reaja muito bem quando usado em sistemas WDM.

As secções cruzadas quantificam, em termos de probabilidade, a luz absorvida ou emitida, por um ião, para uma transição específica. Assim, a absorção e emissão de potência entre os níveis 1 e 2, vem respectivamente dada por, $P_{abs} = \sigma_a I$ e $P_{em} = \sigma_e I$. Onde σ_a , representa a secção cruzada para a transição entre os níveis 1 e 2 (secção cruzada de absorção), e σ_e é a secção cruzada de emissão (simplicadamente é a transição entre os níveis 2 e 1), ambas são expressas em unidades de área.

A medição rigorosa das secções cruzadas é uma tarefa complicada, sendo necessário recorrer a métodos indirectos, como por exemplo o método de Ladenburg-Fuchbauer (LF)^[8]. Se a concentração dos iões de érbio não variar radialmente, e se o integral de 'overlap' (Γ) entre o modo óptico e a distribuição do érbio, for conhecido, então, segundo Giles usam-se as expressões (1), (2), e evita-se o cálculo das secções cruzadas^[9]. Na equações referidas α designa-se por espectro de atenuação, g^* é o espectro de ganho, n_i é a densidade de iões, e λ é o comprimento de onda.

$$\alpha(\lambda) = \sigma_a(\lambda) * \Gamma(\lambda) * n_i \quad (1)$$

$$g^*(\lambda) = \sigma_e(\lambda) * \Gamma(\lambda) * n_i \quad (2)$$

As secções cruzadas determinadas a partir do método de LF não apresentam a exactidão adequada, é preferível usar, se possível, os parâmetros de Giles na modelação do EDFA^[10]. Na Fig. 2 apresentamos os parâmetros de Giles de ganho e absorção da fibra Sumitomo[®], fornecidos pelo fabricante.

Os espectros de emissão/absorção apresentam uma largura espectral característica do material em si. O formato do espectro é devido às transições, dos iões, que ocorrem no meio (EDF). A largura espectral associada às transições, é devido a dois tipos de efeitos: alargamento Homogéneo, e alargamento Não-Homogéneo. O alargamento Homogéneo, tem a ver com as características de tempo de vida e radioactividade dos iões. O alargamento Não-Homogéneo é resultado da não uniformidade energética dos iões de Érbio, ou seja, existem grupos de iões que possuem diferentes frequências centrais de transição e de largura espectral.

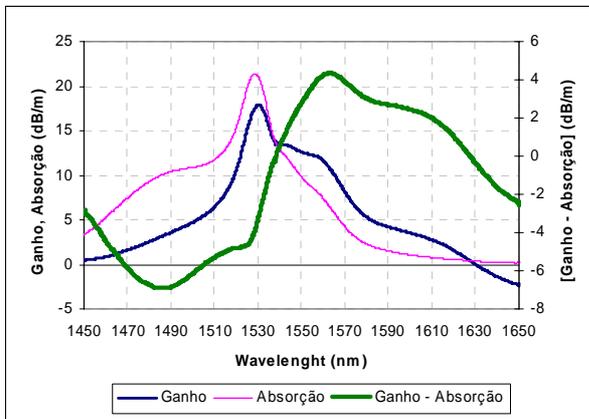


Fig. 2 – Espectros de Emissão e Absorção (dB/m) em função do comprimento de onda (nm), para a fibra usada no laboratório, este dados são fornecidos pela Sumitomo[®]

Uma descrição rigorosa do EDFA só é possível com recurso às equações diferenciais fundamentais, as Equações das Taxas (ET). Estas, no entanto, são de difícil resolução, sendo sujeitas a algumas aproximações por forma a ser possível o seu tratamento. Assim é usual fazer a aproximação ao estado estacionário, e considera-se também que a interacção entre a distribuição espacial dos modos ópticos do sinal e da bomba, com o érbio, constantes ao longo da secção activa. As ET, Equação de Taxas (3) e Equação de Propagação (4), são apresentadas de seguida, para um sistema a dois níveis. Esta simplificação é legítima, uma vez que, para bombagens de 980nm ou 1480nm, o nível n_3 (Fig. 1) terá sempre uma população desprezável, dado o tempo de decaimento para o nível meta-estável ser bastante reduzido (10 μ s).

Em (3), τ representa o tempo de vida no nível meta-estável (n_2), P_k é a potência óptica total numa determinada posição z , para um determinada feixe (k) com frequência ν_k , que é obtida por integração da intensidade (I_k) ao longo de (r,ϕ) ; note-se ainda que i_k é a intensidade normalizada: I_k/P_k .

$$\frac{dn_2}{dt} = \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{ak}}{h\nu_k} n_1(r, \phi, z) - \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{ek}}{h\nu_k} n_2(r, \phi, z) - \frac{n_2(r, \phi, z)}{\tau} \quad (3)$$

absorção emissão espontânea emissão estimulada

Em (4), u_k representa a direcção do feixe de luz (k), que pode ser sentido propagante ($u_k=1$), ou contra propagante ($u_k=-1$). O factor $mh\nu_k \Delta\nu_k$ representa o factor de ruído (ASE) no nível n_2 , em que m representa o número de modos e é em geral 2, como para o caso de fibras que suportam apenas os dois modos de polarização do modo óptico de mais baixa ordem. Note-se ainda em (5), que n_t representa a densidade populacional total dos iões de érbio (n_1+n_2).

$$\frac{dP_k}{dz} = u_k \sigma_{ek} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} i_k(r, \phi) n_2(r, \phi, z) r dr d\phi (P_k(z)) + mh\nu_k \Delta\nu_k - u_k \sigma_{ak} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} i_k(r, \phi) \cdot n_1(r, \phi, z) r dr d\phi (P_k(z)) \quad (4)$$

$$n_t(r, \phi, z) = n_1(r, \phi, z) + n_2(r, \phi, z) \quad (5)$$

densidade local dos iões de érbio

O valor de potência da ASE à saída de uma fibra mono-modo com ganho G , para uma largura de banda $\Delta\nu$, é dada por (6), e a figura de ruído dado por (7). Define-se também um factor de inversão dos iões de érbio, n_{sp} , dado por (8).

$$P_{ASE} = 2 * n_{sp} * h\nu * \Delta\nu * (G-1) \quad (6)$$

$$NF = \frac{P_{ASE}}{h\nu * \Delta\nu * G} + \frac{1}{G} \approx 2 * n_{sp} \quad (7)$$

$$n_{sp} \equiv \frac{N_2}{N_2 - N_1} \Rightarrow \frac{\sigma_e(\lambda) * N_2}{\sigma_e(\lambda) * N_2 - \sigma_a(\lambda) * N_2} \quad (8)$$

No funcionamento do EDFA para a banda L, a ideia subjacente é a de operar em inversões moderadas, fim de se ter absorção nos 1530nm e ganho nos comprimentos de onda superiores como se mostra na Fig. 3 para uma EDF comum.

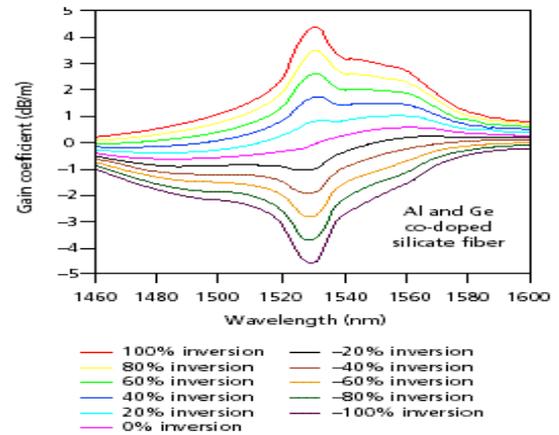


Fig. 3 – Ganhos num EDFA, com uma EDF comum, para diferentes factores de inversão. Fonte: [4]

Para uma fibra a relação entre factor de inversão e ganho associado, pode ser explicado a partir da equação de ganho do EDFA (9). Nesta equação N_1 e N_2 representam a densidade média da população de iões nos níveis n_1 e n_2 respectivamente, e L é o comprimento da fibra. Esta equação determina-se a partir de (3) considerando estado estacionário^[10], ou seja a população é constante nos níveis n_1 e n_2 .

$$G(dB) = 4.34 * (N_2 \sigma_{ek} - N_1 \sigma_{ak}) * \Gamma * L \quad (9)$$

Em condições de forte inversão, $N_1 \approx 0$, o amplificador está num estado de forte bombagem, mas não está saturado, tendo um espectro de ganho idêntico ao de pequeno sinal. Se N_2 começa a diminuir, teremos uma diminuição drástica no ganho em banda C (1530nm), enquanto que nos comprimentos de onda superiores estes são mais transparentes. Se $N_2 < (N_1 \sigma_a) / \sigma_a$, então deixamos de ter efectivamente ganho (ver Fig. 3).

Para se conseguir ganho na banda L com EDFAs convencionais é necessário usar comprimentos elevados de fibra dopada, devido à baixa inversão. Uma alternativa a esta é usar fibras dopadas com alta dopagens de érbio, embora esta solução possa acarretar alguns problemas, tal como o problema de ‘quenching’^[11]. A EDF que iremos usar no Laboratório, Sumitomo[®], tem mérito no facto de ter apenas 30m de comprimento, usar alta concentração de érbio, e não sofrer de ‘quenching’.

IV. OPTIMIZAÇÃO PARA WDM

O uso de amplificadores em WDM requer uniformidade do ganho, sob pena de alguns canais serem excessivamente favorecidos em detrimento de outros.

Na Fig. 4 apresentamos o setup do amplificador. São usadas duas bombas co- e contra-propagantes de 980nm, um isolador óptico para prevenir reflexões e acopladores 980nm/1550nm com perdas médias de 0.9dB. A fibra Sumitomo com 30m e que coincide com, o melhor comprimento de acordo com simulações efectuadas. O laser auxiliar (control source) liga na entrada do amplificador.

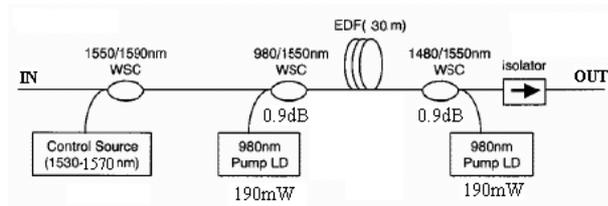


Fig. 4 – Setup do amplificador de banda L usado

Começou-se por efectuar o estudo de multi-bombagem na banda C, usando na entrada do amplificador (porta IN) a ASE de um amplificador comercial de banda C. O espectro da ASE de banda C pode ser visualizado na Fig. 5.

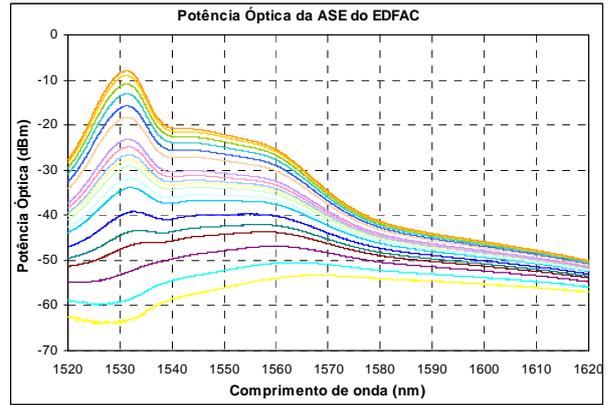


Fig. 5 – Espectro da ASE do amplificador de banda C

Os resultados de simulação e experimentais da multi-bombagem são apresentados na Fig. 6. Consta-se que são bastante semelhantes para a banda L, no entanto, para a banda C, a situação altera-se e o modelo do simulador não pode ser usado, sendo isso também relativamente pacífico pois o objectivo com esta fibra é construir um andar de banda L.

A partir da Fig. 7, que é resultante da Fig. 6 e da Fig.5, mostra-se que é possível fazer equalização de ganho com múltipla bombagem. Isto está de acordo com o já analisado anteriormente, pois, o aumento de potência na banda C depleta ainda mais o amplificador tornando o perfil de ganho mais equalizado, Fig. 3.

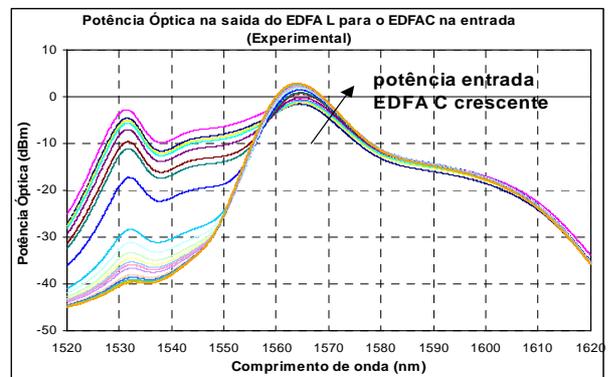
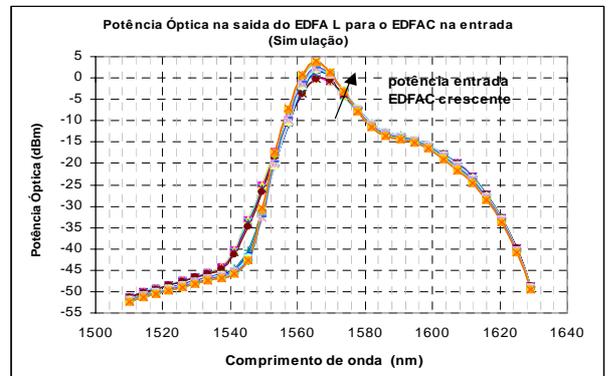


Fig. 6 – Comparação dos valores da ASE .de simulação (em cima) e experimental (baixo) à saída para múltipla bombagem na entrada

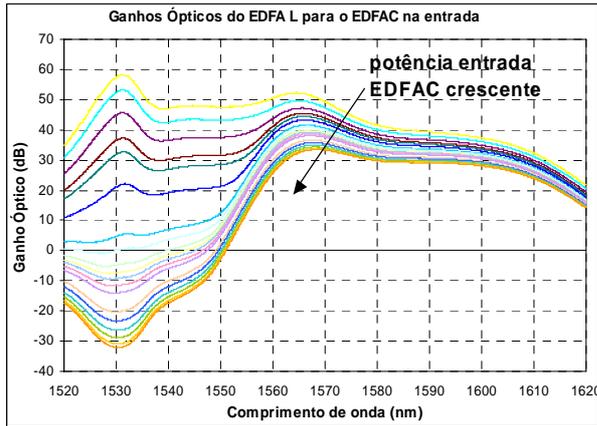


Fig. 7 – Ganhos Ópticos experimentais para o EDFA L com o EDFAC IN

De seguida estudou-se o caso de bombagem com o laser auxiliar sintonizável (TLS). A ideia base é variar o TLS de banda C em potência e comprimento de onda, e verificar os espectros de ganho, medindo o ‘gain tilt’, que aqui é definido como sendo o maior valor absoluto da variação do ganho na gama espectral considerada.

Variou-se a TLS no comprimento de onda na banda C (1530nm a 1570nm), e na potência. Para o caso experimental usamos o EDFA C como fonte de sinal, tendo o cuidado de controlar a ASE deste, caso contrário poderia saturar o nosso EDFA L (inversão da população elevada).

Apresentam-se na Fig. 8 os gráficos comparativos entre os resultados obtidos por simulação e os medidos relativamente ao ‘gain tilt’ na banda L (1570-1600nm)

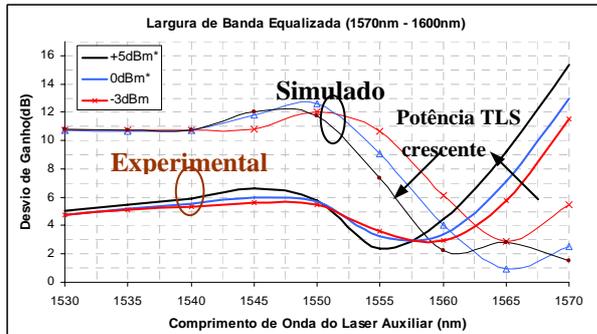


Fig. 8 – Resultados comparativos de gain tilt na banda L simulado e experimental

A comparação dos resultados experimentais com os simulados, na Fig. 8, revelam uma tendência idêntica da solução. Para uma determinada potência no TLS existem comprimentos de onda em que existe melhoria do ganho, por absorção da potência do TLS, e conseqüente aumento do “gain tilt”, 1545-1550nm. Quando a TLS está entre os 1555 e 1560 (e 1565nm na simulação a +10dBm) temos desvios mais pequenos.

Os melhores resultados conseguidos foram então de **0.9.dB** para o TLS em (1560nm,+10dBm) por simulação, e de **2.4dB** para o TLS em (1555nm, +5dBm) tendo como

ganho médio 22 dB. Para todos eles a largura de banda utilizada foi de 30nm.

V. LASER NA BANDA L

Os objectivos desta secção eram obter de um laser e conseguir um método de controlo para o seu comprimento de onda. Nesta experiência o método usado consistiu na introdução de perdas na cavidade.

Na figura abaixo apresenta-se o esquema utilizado para a configuração em anel da EDF.

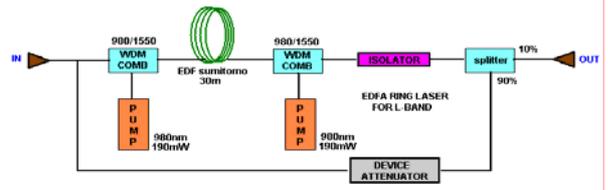


Fig. 9 –Esquema utilizado no decorrer da experiência. O amplificador de érbio é testado numa configuração em anel donde é obtido o efeito de laser. Um dispositivo atenuador permite variar as perdas na cavidade e mudar a frequência do laser

Como dispositivo atenuador variável usou-se um ‘tapper’, que consiste num pedaço de fibra cuja atenuação pode ser variada por alteração das suas propriedades físicas. O ‘tapper’ foi inserido numa carruagem mecânica que permitia alterar a atenuação mediante rotação num eixo central. Foi usado como referência 30’ na carruagem, ou seja, os valores de atenuação medidos são a esta rotação referentes.

Foram também efectuadas experiências ao nível da alteração aleatória da curvatura da fibra, apenas com o intuito de observar o efeito no espectro do laser.

Registaram-se alguns gráficos que foram obtidos com o OSA, para o caso da utilização do ‘tapper’, tal como se mostra na Fig. 10. O comprimento de onda do laser é função da rotação no eixo da carruagem mecânica.

A introdução de perdas controladas e bem caracterizadas pode ser o próximo passo para conseguirmos ter uma variação controlada do comprimento de onda do laser. O objectivo ideal para este caso, era conseguir capitalizar uma variação entre 1570 e 1605nm, cerca de 35nm, no entanto muito longe ainda dos últimos recordes conseguidos [12]. Saliente-se o facto de que alguns resultados de laser com fibra dopada não usam o método de introdução de perdas mas sim o uso de filtragem selectiva na realimentação do amplificador.

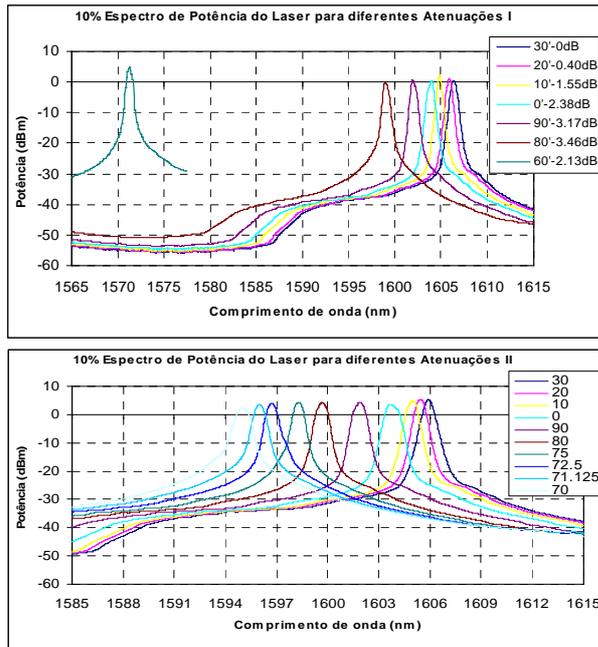


Fig. 10 – Características espectrais do laser com a variação das perdas na cavidade. Na parte de baixo da figura apresentam-se resultados semelhantes aos de cima, para uma resolução diferente no OSA.

VI. CONCLUSÕES

Verificou-se que os amplificadores ópticos são dispositivos importantes no aumento da capacidade dos sistemas.

O WDM é uma técnica que permite aumentar a capacidade dos sistemas, no entanto requer amplificadores com ganho equalizado.

Foi testada uma técnica de equalização de ganho tendo sido conseguida uma equalização com ripple menor que 1dB para uma banda de 30nm na banda L.

Comprovou-se, experimentalmente ainda, uma das aplicações do amplificador em geral, que é, o uso como sendo um oscilador, neste caso laser com base numa configuração em anel que faz uso da ASE como ponto de partida para o lasing aos 1605nm. Este dispositivo tem uma tunabilidade controlada por inserção de perdas na cavidade, de cerca de 10nm. Com uma melhor metodologia de inserção de perdas, poderá, de futuro, conseguir-se melhores resultados.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à FCT pelo projecto WIDCOM- POSI/35574/99/CPS/2000 e bolsas.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Mears, L. Reekie, I. Jauncey, and D. Payne, "Low-noise erbium doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m", *Electron. Lett.*, vol.23, no.19, 1987, pp.1026.
- [2] J. F. Massicot, R. Wyatt, B. J. Ainslie, "High Gain, Broadband, 1.6 μ m Er³⁺-Doped Silica Fiber Amplifier", *Electron. Letters*, 1990, 26, pp. 1645-1646.
- [3] S. Hwang, K. Cho, "Gain Tilt Control of L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier by Using a 1550-nm Band Light Injection", *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 13, no. 10, 2001, pp. 1070-1072.
- [4] U. Ryu, K. Oh, W. Shin, U. Paek, "Inherent Enhancement of Gain Flatness and Achievement of Broad Gain Bandwidth in Erbium-Doped Silica Fiber Amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 2, 2002, pp. 149-161.
- [5] S. W. Harun, S. K. Low, P. Poopalan, H. Ahmad, "Gain Clamping in L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Using a Fiber Bragg Grating", *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 14, no. 3, 2002, pp. 293-295.
- [6] A. Teixeira, et al., "Effects on C-band Pumping on the Performance of L-band Erbium Doped Fibre Amplifiers", *proceedings of Telec 2002, Cuba, July 2002*.
- [7] A. E. Willner, "Introduction to the Feature Issue on Fundamental Challenges in Ultrahigh-Capacity Optical Fiber Communications Systems", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 34, no. 11, November 1998
- [8] J. N. Sandoe, P. H. Sarkies, and S. Parke, "Variation of the Er³⁺-cross-section for stimulated emission", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.5, 1972, pp.1788-1799
- [9] C. R. Giles, C. A. Burrus, D. J. DiGiovanni, N. K. Dutta, G. Raybon, "Characterization of Erbium Doped Fiber and Application to Modeling 980-nm and 1480nm Pumped Amplifiers", *IEEE Photon. Technol.*, vol.3, no.4, 1991, pp.363-365
- [10] C. R. Giles and E. Desurvire, "Modelling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *J. Lighthwave Technol.*, vol.9, no.2, 1991, pp.271-283
- [11] E. Delevaque, T. Georges, M. Monerie, P. Lamouler, J. F. Bayon, "Modeling of Pair Induced Quenching in Erbium Doped Silicate Fibers", *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 5, no. 1, 1993, pp. 73-75
- [12] A. Bellemare et al., "A Broadly Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser: Experimentation and Modeling", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.7, no.1, Jan/Feb 2001