Relatório de Laboratórios de Engenharia Física II: LASER de fibra dopada com érbio.

Ludgero Teixeira Peixoto

18 de Março de 2017

Resumo

Neste relatório apresenta-se a descrição do estudo de um LASER de fibra dopada com érbio e um amplificador de fibra dopado com érbio (EDFA), realizado no âmbito da unidade curricular Laboratórios de Engenharia Física II.

Para o funcionamento deste laser, usa-se um díodo laser de bombeamento, a 980nm, que permite a inversão de população e tem um bom ganho nos 1550 nm.

Este trabalho foca-se na caracterização de um EDFA, determinando como varia o ganho do sinal em função da potência de bombeamento no amplificador e com a potência do sinal de entrada. Também se vai caracterizar a corrente de limiar em função do desfasamento induzido entre os dois FBG's que compõem a cavidade ótica. Foi determinado uma corrente de limiar de 54 mA e 68 mA para cada um dos casos, respetivamente sem e com tensão aplicada.

1 Introdução Teórica

1.1 Objetivo

Neste trabalho experimental propõem-se a caracterização de um EDFA (*erbium doped fiber amplifier)* comercial, assim como a caracterização e aquisição de conceitos sobre o funcionamento de um laser em fibra dopada com érbio.

1.2 Teoria

Para o estudo de lasers é necessária a compreensão de princípios base, sendo estes a inversão de população, emissão espontânea, emissão estimulada e a absorção. Emissão espontânea diz respeito ao decaimento de átomos, por exemplo, de um estado excitado para um estado de energia mais baixa e pode ser compreendido com a ajuda da mecânica quântica. Os outros dois processos, a absorção e a emissão estimulada, podem ser vistos como complementares um do outro e para a sua compreensão basta uma abordagem semi-clássica. O fundamental para a ação laser é conseguir-se uma inversão de população, que dê prioridade portanto ao acontecimento de emissão estimulada, em vez de absorção sendo que no equilíbrio térmico estes são equiprováveis.

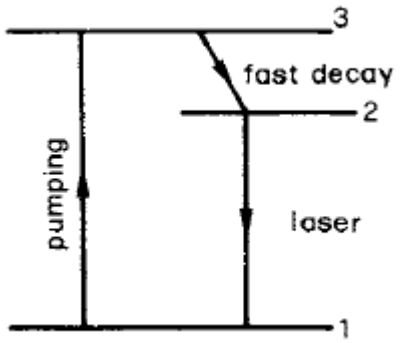

Figura 1: Esquemas de bombeamento-3 níveis

Na figura 1, está representado um esquema do que

é conhecido por *3 level pumping scheme,* em que só se necessita de 3 níveis (o mínimo) para se conseguir a inversão de população que ela a ação laser. Os átomos no estado fundamental são bombeados por exemplo através de um díodo laser, para o terceiro nível, que possui um tempo de vida muito curto e faz com que estes átomos decaiam para o nivel 2. Quando existirem mais átomos no segundo nível do que no estado fundamental, temos inversão de população e dá-se ação laser.

Este, contudo, não é um cenário otimizado, sendo que o esquema de 4 níveis, figura 2, consegue produzir a inversão de população muito mas eficientemente, pois todos os átomos que forem bombeados para o nível 3 e consequentemente decaiam para o nível 2, já estão a contribuir para a inversão de população que leva a ação lasers.

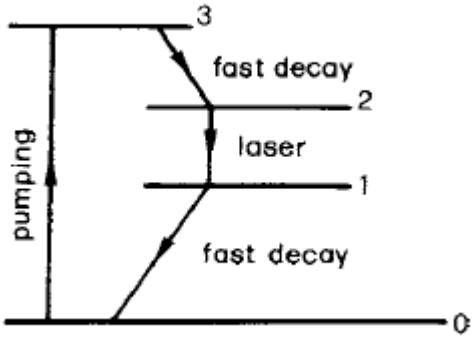

Figura 2: Esquemas de bombeamento-4 níveis

Um EDFA faz uso do esquema da figura 1, Er^{3+}fornece o ganho ótico quando a inversão de população é atingida, pelo que para se compreender o que está a acontecer, é útil pensar em quais são os mecanismos que contribuem para a população/despopulação de N_1.

Os processos que contribuem para o aumento de população do nível 1 são: (***refazer esta parte***)

- Emissão espontânea do estado 2 com uma constante de tempo τ_{21};
- Emissão espontânea do estado 2, a taxa W_s , que depende do fluxo de foões do sinal a ser amplificado;
- Emissão estimulada do estado 3, a uma taxa W_p, que dpnde do fluxo de fotões do bombeamento.

Os processos que contribuem para a diminuição de população do nível 1 são:

- Bombeamento que acontece à taxa W_p;
- Absorção dos fotões do sinal, a uma taxa W_s.

Destas condições resulta a equação que descreve a população do estado 1

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{21}} + W_s(N_2 - N_1) - W_p(N_1 - N_3) \quad (1)$$

Por argumentos semelhantes chega-se a

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - W_s(N_2 - N_1) \quad (2)$$

e

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + W_p(N_1 - N_3) \quad (3)$$

Pode-se definir o fator de inversão de população como $n_{sp} \equiv \frac{N_2}{N_2 - N_1}$. Para um sistema de 4 níveis, consegue-se, como discutido anteriormente, uma total inversão de população ($n_{sp} = 1$)através de fraco bombeamento. Este não é o caso para os EDFA.

Em termos práticos, o comprimento de onda do bombeamento corresponde a um que esteja disponível com um díodo laser de alta potência. Existem diodos laser a operar nos 800 nm, 980 nm e 1480 nm, sendo que o primeiro tem uma baixa eficiência de bombeamento. Os lasers de 980 nm são baseados em GaAs (*strained-layer quantum well lasers)* e os de 1480 nm sõa baseados em InGaAsP, sendo que o primeiro, em condições de forte bombeamento ($W_p\tau_{21} \ggg 1$) e baixo sinal ($W_s$negligenciável), pode chegar a total inversão, o que não acontece com os últimos. Este parâmetro é deveras importante na sua performance em termos de ruído, visto que, se pode demonstrar que a potência do ruído é proporcional a n_{sp} , que no caso de total inversão é igual à unidade.

Passa-se agora para as possíveis configurações. Como se pode ver na figura 3, existem 3 configurações possíveis. O primeiro caso é associado a uma melhor *perfrmance* em termos de ruído, no segundo caso existe maior ganho e maior potência de saturação. O último caso junta os benefícios dos dois anteriores mas à custa de alguma complexidade.

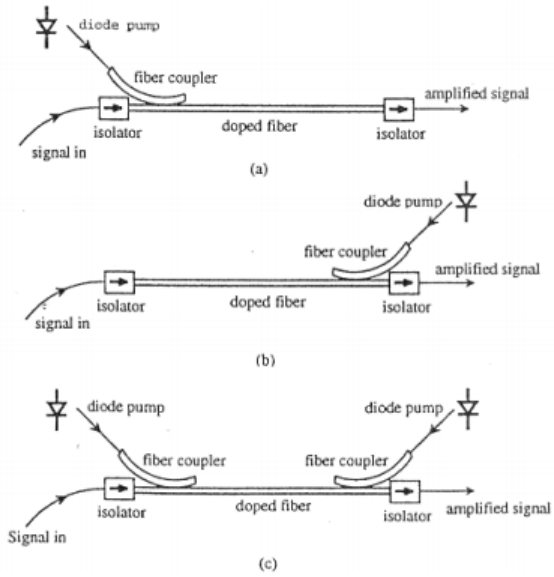

Figura 3: Configurações possíveis: (a) *forward pumping* (b) *backward pumping* (c) *forward pumping* e *backward pumping*

O Laser de Fibra foi baseado numa cavidade Fabry-Perot , construída a partir de dois FBG (*fiber Bragg grating*) , que são modulações periódicas do índica de refração ao longo da fibra. O resultado desta perturbação do índice pode ser expresso por

$$n(z) = n_o + \Delta n cos(\frac{2\pi z}{\Lambda}) \tag{4}$$

com n_0a ser a média do índice de refração do guia de onda não perturbado, Δn a variação induzida no mesmo guia de onda e Λo período espacial da modulação do índice.

Para esta variação, o comprimento de onda de Bragg é dado por

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{5}$$

com n_{eff} a ser o índice de refração efetivo do modo de propagação. Pode-se, portanto, alterar λ_B, mudando Λatravés de compressão ou distensão da fibra.

Para caracterizar o comportamento da cavidade ótica define-se γ, a perda logarítmica por passegem do feixe na cavidade como

$$\gamma = \gamma_i + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \tag{6}$$

sendo que γ_i é a parcela correspondente a perdas intrínsecas e $\gamma_{1,2}$ são as perdas associadas aos espelhos e definidas como $\gamma_{1,2} = -ln(R_{1,2})$, respetivamente. Assumindo que os *gratings* têm um perfil gaussiano e que são os duas idênticos em refletividade, pode se escrever

$$R_{1,2}(\lambda) = R_o e^{(-\frac{(\lambda-\lambda_i)^2}{\omega_\lambda^2})} \tag{7}$$

onde R_0é a refletividade máxima, ω_λé metade da largura quando a expressão decresce de um fator de $\frac{1}{e}$.Assim sendo obtém-se que $\gamma_1 = -ln(R_0)+\frac{(\lambda-\lambda_1)^2}{\omega_\lambda^2}$ e $\gamma_2 = -ln(R_0) + \frac{(\lambda-\lambda_2)^2}{\omega_\lambda^2}$. Pode-se demonstrar que, como a ação laser acontece ao comprimento de onda para o qual as perdas são minimizadas, neste caso, isto corresponde a $\lambda_L = \frac{(\lambda_1+\lambda_2)}{2}$.

Para caracterizar um amplificador quanto ao ruído, foi provado que um amplificador linear ~tem de adicionar ruído a qualquer sinal que processe, e esse ruído tem de ser pelo menos equivalente a dobrar o *zero point noise* associado ao sinal de entrada-sofre 3dB no *signal-to-noise ratio* (SNR)- ou seja, $(\frac{S}{N})_{out} = \frac{1}{2}(\frac{S}{N})_{in}$. Apenas a potência de ruído não nos dá informação quanto à performance do sistema, sendo o fator importante o SNR, por esta razão é normalmente utilizado a figura de ruído para caracterizar o ruído na performance de um sitema de amplificação, definida como

$$F_n = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \tag{8}$$

2 Resultados

2.1 Procedimento experimental

2.1.1 Parte I

Para a caracterização do EDFA comercial foi utilizado um díodo laser ligado ao amplificador, que por sua vez ligava a um *Optical spectrum analyzer* (OSA). O comprimento de onda do sinal era de cerca de 1550 nm. Estudou-se, nesta parte, o ganho do sinal em função da potência de bombeamento, mantendo constante o sinal de entrada, para dois sinais, um de baixa e outro de alta amplitude. Estudou-se também o ganho do sinal em função da potência do sinal de entrada, a potências de bombeamento constantes, usando-se também aqui dois sinais diferentes.

Seguidamente procedeu-se à montagem para a caracterização do laser de fibra dopada com érbio, que consistiu em ligar um díodo laser para efectuar a bombagem a uma fibra com dois FBG's que produzem a cavidade ressonante para a ação laser, utilizando um WDM (*wavelength division multiplexer)* para separar os comprimentos de onda de bombeamento (~980 nm) e o de funcionamento (~1550nm). Esta última montagem é equivalente á referida na introdução teórica como *forward pumping* **??**.

2.2 Análise de dados

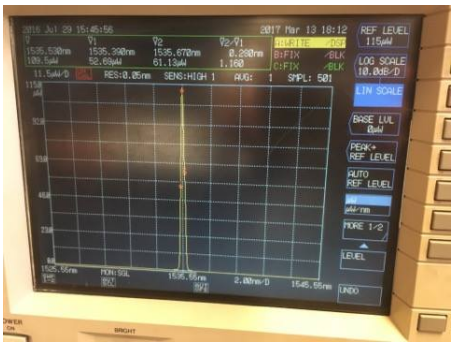

Figura 4: OSA, sem tensão aplicada ao FBG

Figura 5: OSA com tensão aplicada num dos FBG

As figuras 4 e 5 dizem respeito a análise da fibra com o OSA, sendo que a primeira corresponde a configuração inalterada e a segunda corresponde ao espetro quando é aplicado uma tensão (*strain*) a um dos FBG's. Nesta figura observa-se um pico negativo, devido à refletividade do segundo FBG.

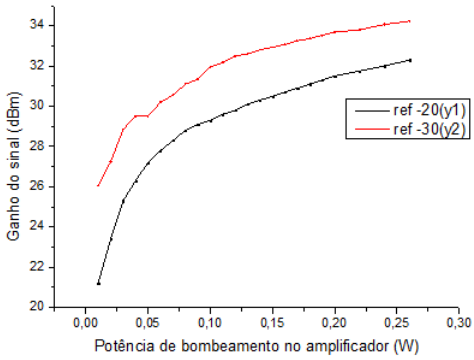

Figura 6: Ganho do sinal em função da potência de bombeamento no amplificador para duas potências de entrada fixas

A figura 6 diz respeito à caracterização do EDFA, sendo que neste parâmetro se manteve constante a potência da entrada fixa, usando dois sinais que resultaram nas duas curvas representadas, em função da potência de bombeamento. Por meio deste gráfico consegue-se retirar uma ideia a partir de que valores o ganho começa a aumentar mais lentamente, a tender para a saturação.

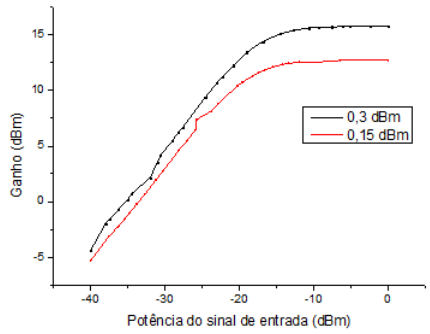

Figura 7: Ganho do sinal em função da potência do sinal de entrada para duas potências fixas no amplificador

Para a figura 7, foram utilizados duas potências fixas no amplificador, para os quais se variou a potência do sinal de entrada e se registou o ganho do sinal. Como se ver o regime de saturação desta vez está bem visível, onde se passa de uma relação linearmente crescente para um regime de estagnação de ganho.

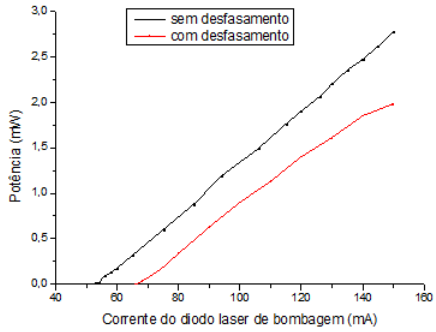

Figura 8: Potência de pico em função da corrente do díodo de bombeamento para dois alinhamentos dos FBG diferentes

Finalmente, da figura 8 pode-se ver de que maneira a potência de pico varia com a corrente do díodo laser usado para bombagem. Mediu-se os resultados para a configuração em que os FBG's estão sem tensão aplicado, e para uma tensão aplicada num dos FBG's, notou-se que a corrente de *threshold* (limiar) aumenta com o desfasamento dos FBG's, sendo que os valores registados são, aproximadamente 54 mA e 68 mA, para 0 tensão aplicada e alguma tensão, respetivamente.

3 Conclusão

Neste trabalho foi possível estudar as características de um EDFA comercial, determinando como varia o ganho do sinal em função da potência de bombeamento no amplificador e com a potência do sinal de entrada., e um laser de fibra dopada com érbio, caracterizando-se a corrente de limiar em função do desfasamento induzido entre os dois FBG's que compõem a cavidade ótica.

Foi determinado uma corrente de limiar de 54 mA e 68 mA para cada um dos casos, respetivamente sem e com tensão aplicada.

4 Referências

1. Svelto, Principles of Lasers
2. Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers Li Qian* Advanced Labs for Special Topics in Photonics (ECE 1640H) University of Toronto
3. Advanced experiments with an Erbium doped fiber laser Paulo V. S. Marques, Manuel B. Marques*, Carla C. Rosa