

Novos avanços utilizando random lasers em fibra óptica

Orlando Frazão¹, Manuel B. Marques^{1,2}

1. INESC Porto, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto
2. Dep. Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto

ofrazao@inescporto.pt; mbmarque@fc.up.pt

Resumo

Vários tipos de lasers em fibra, com realimentação distribuída aleatória, têm sido demonstrados na última década. Nestes lasers o espelho tradicional é substituído por um espelho distribuído gerado aleatoriamente pelo espalhamento de Rayleigh, amplificado pelo efeito de Raman. Estes espelhos apresentam uma solução alternativa aos espelhos convencionais abrindo novas oportunidades na concepção de sistemas laser e aplicações, por exemplo no contexto da sensorização óptica remota. De referir também que a utilização deste efeito para lasers de multi-comprimento de onda é de elevada atractividade na área das comunicações ópticas.

Introdução

Um esquema convencional de um laser requer dois elementos chave: um material de ganho que promove amplificação e uma cavidade óptica para obter realimentação. A acção laser ocorre quando o ganho total na cavidade supera as perdas totais da cavidade. As características operacionais dos lasers convencionais são determinadas pelo ganho do meio e pelo esquema da cavidade, que define a estrutura dos modos. No entanto, nos lasers de emissão aleatória sem cavidade convencional ou com cavidade aberta, o múltiplo espalhamento dos fótons no meio desordenado, sem estrangimentos de comprimento de onda, resulta numa acção laser desordenada, isto é, num feixe com variação aleatória dos modos espaciais.

As primeiras observações deste efeito foram obtidas usando lasers de bombagem nas fibras ópticas baseadas em terras raras [1] ou em outro em tipos de fibras [2-5]. Estes tipos de lasers apresentam algumas vantagens, incluindo uma tecnologia simples (não é necessário fabricar micro-cavidades de elevado custo baseadas em filmes finos ou de escrita directa) e baixo custo. No entanto, em diversas aplicações o seu desempenho pode ser alterado

facilmente, de modo a serem capazes de desafiar tecnologicamente os lasers convencionais.

Foram realizados vários estudos usando este efeito em combinação com outros efeitos não lineares ou redes de Bragg [6-10]. Recentemente, foi demonstrada a sua aplicação em lasers de cavidades ultra-longas [11] com 200 km de comprimento, assim como a geração multi-comprimento de onda com 798 canais usando o efeito de Brillouin [12]. Foi também estudada a sua aplicação em sensores para a medição simultânea da deformação e da temperatura usando sensores de Bragg em fibra óptica [13].

Neste artigo apresentamos algum do trabalho desenvolvido no INESC Porto sobre este tipo de lasers. Foi desenvolvido um sistema laser simples e versátil, usando dispositivos ópticos de fácil acesso, que pode ser utilizado quer na medição remota de sensores, quer em aplicações em comunicações, tais como lasers de multi-comprimento de onda, ou na conversão de comprimento de onda baseada na mistura de quatro ondas.

Espalhamento de Rayleigh – Na interacção da luz com os átomos, uma pequena fracção desta é espalhada em todas as direcções, mantendo a frequência original. A potência espalhada depende do comprimento de onda λ , sendo proporcional a $1/\lambda^4$ – de facto, é o espalhamento de Rayleigh da luz do Sol na atmosfera que dá a cor azul ao céu! Se houver alguma regularidade na disposição dos átomos o efeito é reduzido, desaparecendo totalmente num cristal perfeito. Nas fibras ópticas, este efeito é fundamental na determinação do nível inferior das perdas de transmissão.

Espalhamento de Raman – Além do espalhamento de Rayleigh, quando a luz interage com a matéria também é possível que o átomo, ou molécula, acabe num estado de energia diferente do original. Neste caso, há um desvio da frequência da luz espalhada proporcional à diferença de energia entre os dois estados. Este efeito pode ser estimulado se existir outra onda cuja frequência seja igual à da onda resultante (amplificação Raman). Numa fibra óptica,

este efeito é potenciado pelo confinamento da radiação no núcleo da fibra e pela longa distância de interacção, sendo utilizado para amplificar o sinal transmitido.

Espalhamento de Brillouin – Ao interagir com a matéria, um fóton pode dar origem a um fonão e a outro fóton com energia inferior ao incidente. O fenómeno inverso também existe, embora com uma probabilidade menor. Uma explicação muito simplificada do espalhamento de Brillouin pode ser dada da seguinte forma: o campo eléctrico da luz incidente, por electrostricção, cria uma pequena variação periódica da densidade do material (onda acústica) que se propaga no material; por sua vez, esta onda acústica difracta a luz incidente, que sofre um desvio de frequência devido ao efeito Doppler causado pela difracção numa rede em movimento. Sob certas condições, o espalhamento pode passar de espontâneo a estimulado, aumentando significativamente a potência espalhada. O espalhamento de Brillouin é particularmente eficiente nas fibras ópticas monomodo pelo facto de as duas ondas (electromagnética e acústica) estarem confinadas à região do núcleo. O aparecimento do espalhamento estimulado faz aumentar bruscamente as perdas de transmissão podendo, para potências elevadas, “reflectir” quase toda a potência de volta à entrada da fibra.

Mistura de quatro ondas (FWM, four-wave mixing) – Quando três ondas interagem num meio não-linear podem dar origem a uma quarta onda, cuja frequência é dada por $f_4 = f_1 + f_2 - f_3$. Para este processo ser eficiente é necessário que as quatro ondas se mantenham em fase durante a sua propagação. No caso de só existirem duas ondas incidentes ($f_1 = f_2$) o efeito é designado por mistura de quatro ondas degenerada (DFWM, *degenerate four-wave mixing*). Nas fibras ópticas monomodo este efeito torna-se importante na zona de mínima dispersão. Pelo maior confinamento do modo, as fibras de dispersão deslocada (DSF, *dispersion shifted fiber*) são as que exibem este efeito em maior grau. Em comunicações ópticas, a mistura de quatro ondas é particularmente preocupante na multiplexagem em comprimento de onda densa pelo ruído de *crosstalk* criado. No entanto, para conversão em comprimento de onda este fenómeno é uma solução interessante.

Princípios de funcionamento dos lasers

A Figura 1 apresenta três tipos diferentes de cavidades usadas para lasers. Na Figura 1.a está representada uma cavidade ressonante de um laser convencional, consistindo em dois espelhos e um meio de ganho, o qual pode usualmente ser um gás, um líquido ou um sólido [4]. Estes tipos de lasers apresentam uma elevada coerência espacial, com modos longitudinais bem definidos e determinados pelo comprimento físico da cavidade. Na Figura 1. b apresentamos outro tipo de laser denominado por *random* laser em que a realimentação ocorre através da reflexão de fótons num dispositivo com uma fase óptica codificada aleatoriamente, em vez do tradicional espelho. Os fótons são amplificados com uma dispersão aleatória do ponto de reflexão, nunca fazendo uma volta completa à cavidade com a mesma duração, o que torna impossível formar uma coerência

espacial. Estes lasers não têm uma selecção de modos ressonantes, nem coerência espacial, e não apresentam uma fase definida. Normalmente, estes lasers geram picos estreitos estocásticos sobrepostos ao espectro de emissão do laser.

Na Figura 1.c apresentamos a nova solução de cavidades de lasers em fibra sem uso de espelhos na extremidade da fibra, isto é, toda a reflexão é feita internamente usando o espalhamento de Rayleigh. O fenómeno da emissão laser aleatória deste tipo de lasers ocorre devido a uma sequência complexa de fenómenos, mas que está basicamente relacionada com a geração do espalhamento de Rayleigh da emissão estimulada do laser. Devido à intensidade do espalhamento gerado na fibra e amplificado pelo laser de Raman, o próprio espalhamento de Rayleigh consegue gerar um espalhamento duplo, que também é amplificado, originando-se assim múltiplas interferências (*MPI, multipath interference*) associadas ao batimento das várias réplicas do sinal com diferentes atrasos. Os dois espalhamentos de Rayleigh entram num processo de realimentação ao longo da fibra, formando-se assim um espelho distribuído. O espelho tem um efeito semelhante a duas reflexões discretas, com uma reflectância efectiva proporcional ao espalhamento total da potência incidente.

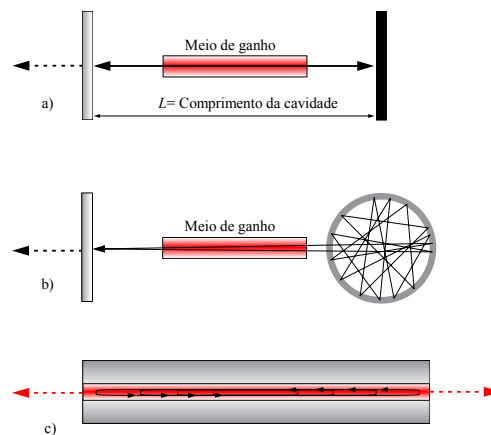


Figura 1

Fig. 1. Exemplos de cavidades laser: a) Laser baseado numa cavidade Fabry-Perot; b) laser com realimentação não ressonante; c) laser em fibra com realimentação distribuída aleatória.

Aplicações

A Figura 2 apresenta a implementação de uma configuração simplificada para três aplicações. O sistema é constituído por um laser de bombagem que emite a 1450 nm com potência máxima de 5 W, dois acopladores do tipo *wavelength-division multiplexing WDM* (1450/1550 nm) e 1 km de fibra com dispersão compensada (DCF, *dispersion compensating fiber*). Um analisador de espectros óptico, (OSA, *optical spectrum analyser*) foi utilizado para detectar e observar a variação dos sinais. A ligação ao OSA é feita por um conector FC/APC (*fiber connector/angled physical contact*) para eliminar qualquer

reflexão de Fresnel. Para aplicações em sensores ópticos (Figura 2.a), foram usados sensores de Bragg em fibra óptica localizados a 10 km de distância do bloco de emissão e fotodetecção, utilizando-se para isso um rolo de fibra óptica monomodo (tipo SMF-28). Para aplicações em lasers multi-comprimento de onda foram usadas duas configurações distintas. Na Figura 2.b é utilizado um espelho em anel com uma secção de fibra de elevada birrefringência formando um interferómetro de Sagnac não balanceado [5]. Este espelho apresenta algumas vantagens, nomeadamente o facto do espaçamento em comprimento de onda do filtro ser imposto pelo comprimento da fibra de elevada birrefringência e pelo próprio valor da birefringência. Na Figura 2.c é utilizado um laser DFB (*distributed feedback laser*) para gerar o efeito Brillouin em cascata, permitindo assim obter um número elevado de riscas de emissão laser, separadas pela diferença de comprimento de onda do laser DFB e da emissão estimulada do laser de Brillouin.

O fenómeno da emissão laser aleatória (*Rayleigh lasing*) observado na Figura 3.a foi obtido numa configuração contra-propagante relativa à bombagem (*Rayleigh backscattering*), isto é, o OSA está localizado na posição dos sensores. Na Figura 3 pode-se observar que o fenómeno da emissão laser aleatória (*Rayleigh lasing*) é dominante na região do ganho de Raman (1550 a 1570 nm) gerado na fibra de dispersão compensada. A cavidade laser é então obtida pela combinação da selectividade espectral da rede de Bragg e do espelho distribuído. A Figura 3.b mostra o espectro do sinal óptico à saída do sistema. A potência de bombagem do laser de Raman foi de 1 W. Apenas as reflexões das redes de Bragg cujo comprimento de onda está localizado dentro do espectro de ganho de Raman contribuem para a acção laser. As linhas laser são obtidas devido à cavidade linear criada entre a reflexão selectiva da rede de Bragg e do correspondente espelho distribuído

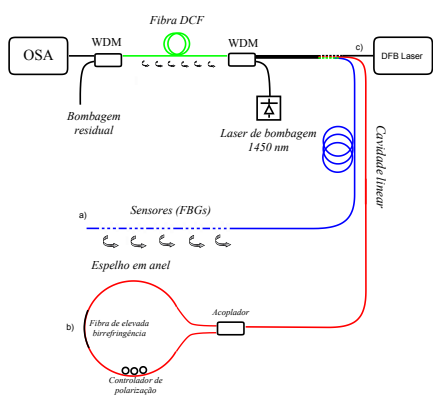


FIGURA 2

Fig. 2. Configuração simplificada baseado no efeito Raman em cooperação com o espalhamento de Rayleigh para: (a) aplicações em sensores [13]; (b) Para lasers de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; (c) Laser de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; (d) Laser em formato pente com 440 canais.

obtido pela cooperação do espalhamento de Rayleigh com a amplificação de Raman.

A Figura 3.c apresenta a resposta espectral da configuração apresentada na Figura 2.b. Nesta configuração temos 15 linhas de acção laser estável; no entanto a banda de amplitude não está equalizada, pois depende do comprimento de onda do laser de bombagem e da curva de ganho da fibra. Para resolver o problema, basta usar dois comprimentos de onda distintos dos lasers de bombagem do ganho Raman para uma equalização e optimização da largura de banda dos lasers de multi-comprimento de onda.

Na Figura 3.d é apresentada a saída do laser de multi-comprimento de onda em formato pente (*comb laser*) obtido pela geração de Brillouin em cascata (Figura 2.c). O espectro tem 440 canais separados por ~11 GHz. O efeito Brillouin em cascata é possível devido ao espelho distribuído amplificado pelo Raman permitindo gerar o efeito Brillouin nos dois sentidos do espelho distribuído. Estes lasers têm possíveis aplicações em *dense wavelength-division multiplexing* (DWDM) e em metrologia.

Recentemente, foi possível demonstrar outro efeito não linear denominado mistura de quatro ondas para aplicação em sensores [16]. Nesta configuração, é possível obter um sensor com a capacidade de medir uma dada deformação mecânica com insensibilidade à temperatura. Um dos sensores está isolado da deformação, funcionando como sinal de bombagem, enquanto o outro laser funciona como sensor. Quando é aplicada deformação ao sensor, o sinal convertido varia em comprimento de onda e em amplitude. A variação em amplitude é esperada devido ao sinal sair da largura de banda da eficiência da mistura de quatro ondas. Uma vez que os dois lasers são sensíveis simultaneamente à temperatura, mantendo-se assim dentro da largura de banda da eficiência da mistura de quatro ondas, o sensor é insensível à temperatura. Por último, foi ainda demonstrado um sensor de intensidade para medição de deslocamento usando uma configuração em anel [17].

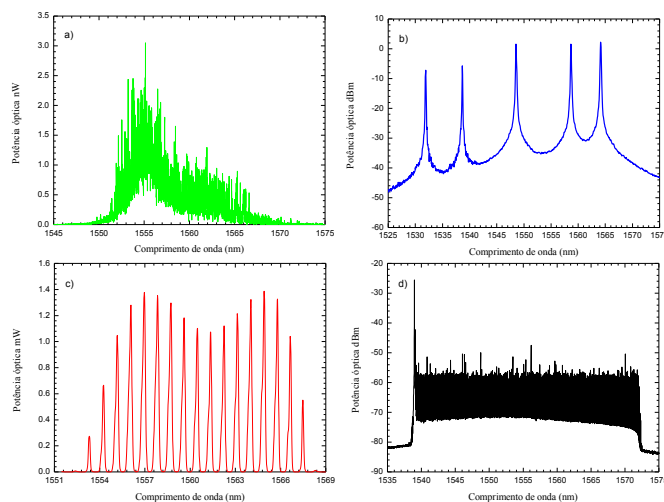


Figura 3

Fig. 3. a) Emissão laser aleatória associada à presença do espelho virtual na fibra óptica; b) Emissão laser usando sensores de Bragg em fibra óptica [13]; c) Laser de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; d) Laser em formato pente com 440 canais.

Considerações finais

Os *random lasers* foram considerados um dos temas principais de 2010 pela Optical Society of America (OSA). O INESC Porto e a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto têm vindo a trabalhar neste tópico, sobretudo na aplicação em sensores em fibra óptica para detecção remota. Diversos artigos têm vindo a ser publicados mostrando que estes lasers apresentam estabilidade nas linhas de acção laser, o que faz antever a sua aplicabilidade numa grande variedade de situações.

- 1 I. N. Duling, III, R. P. Moeller, William K. Burns, C. A. Villarruel, L. Goldberg, Elias Snitzer, H. Po, "Output characteristics of diode pumped fiber ASE sources", IEEE Journal of Quantum Electronics 27, 995 (1991).
- 2 C.-J. Chen, H. Lee, and Y.-J. Cheng, "Instability In Raman amplifiers caused by distributed Rayleigh reflection", in Optical Fiber Communication Conference, 86, TuC2 (2003).
- 3 J. M. Sousa, M. Melo, L. A. Ferreira, J. R. Salcedo, M. O. Berendt, "Product design issues relating to rare earth doped fiber ring lasers and superfluorescence sources", Proc. SPIE 6102, 610223 (2006).
- 4 F. Vanholsbeeck, S. Coen, P. Emplit, C. Martinelli, T. Sylvestre, "Cascaded Raman generation in optical influence of chromatic fibers: dispersion and Rayleigh backscattering", Optics Letters 29, 998 (2004).
- 5 A. Teixeira, S. Stevan Jr, T. Silveira; R. Nogueira; G. M. Tosi Beleffi, D. Forin, F. Curti "Optical gain characteristics of Rayleigh backscattered lasing in several fibre types", 10th European Conference on Networks and Optical Communications, 2005.
- 6 S. Stevan Jr, G. T. Beleffi, P. Andre, R. Nogueira, A. Teixeira, A. Pohl, "Spontaneous Rayleigh backscattering Raman lasing with fiber Bragg grating," Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007, 1 (2007).
- 7 A. A. Fotiadi, R. V. Kiyani, "Cooperative stimulated Brillouin and Rayleigh backscattering process in optical fiber", Optics Letters 23, 1805 (1998).
- 8 M. Mehendale, A. Kobaykov, M. Vasilyev, S. Tsuda, A. F. Evans, "Effect of Raman amplifica-

tion on stimulated Brillouin scattering in dispersion compensating fibres", Electronics Letters 38, 268 (2002).

- 9 T. Okuno, M. Nishimura, "Effects of stimulated Raman amplification in optical fibre on stimulated Brillouin scattering threshold power", Electronics Letters 38, 14 (2002).
- 10 A. A. Fotiadi, G. Ravet, P. Mégret, M. Blondel, "Multi-cascaded SBS in an optical fiber supported by Rayleigh backscattering," Proc. SPIE 5480, 71 (2003).
- 11 S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, D. V. Churkin, S. I. Kablukov, J. D. Ania-Castanon, V. Karalekas, E. V. Podivilov, "Random distributed feedback fibre laser", Nature Photonics 4, 231 (2010).
- 12 B. Min, P. Kim, N. Park, "Flat amplitude equal spacing 798-channel Rayleigh-assisted Brillouin in/Raman multiwavelength comb generation in dispersion compensating fiber", IEEE Photonics Technology Letters 13, 1352 (2001).
- 13 O. Frazão, C. Correia, J. M. Baptista, J. L. Santos, "Raman fibre Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering in strain-temperature measurement", Measurement Science and Technology 20, 45203 (2009).
- 14 Andrei A. Fotiadi, "An incoherent fibre laser", Nature Photonics 4, 204 (2010).
- 15 A. M. R. Pinto, O. Frazão, J. L. Santos, M. Lopez-Amo, "Multiwavelength fiber laser based on a photonic crystal fiber loop mirror with cooperative Rayleigh scattering", Applied Physics B: Lasers and Optics 99, 391 (2010).
- 16 H. F. Martins, M. B. Marques, O. Frazão, "Temperature-insensitive strain sensor based on four-wave mixing using Raman fiber Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering", Applied Physics B: Lasers and Optics (submetido para publicação, 2011).
- 16 J. M. Baptista, C. Correia, M. B. Marques, O. Frazão, "A Raman laser intensity sensor induced by the cooperative Rayleigh scattering in a ring configuration", Lasers Physics (aceite para publicação, 2011).



Orlando Frazão é licenciado em Engenharia Física pela Universidade de Aveiro e doutorado em Física pela Universidade do Porto. Actualmente é Investigador Sénior no INESC Porto. Os principais interesses de investigação são sensores e lasers em fibra óptica. Tem mais de 250 artigos publicados em revistas internacionais e conferência internacionais.



Manuel Joaquim B. Marques é licenciado em Física pela Universidade do Porto e doutorado em Física pela mesma universidade. Actualmente é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Investigador Sénior no INESC Porto. Os principais interesses de investigação são a óptica não-linear, lasers e sensores em fibra óptica.