

Avaliação das Características de Amplificação de Fibras de Telurito Dopadas com Érbio e Itérbio

Thisien G. Montes, Enver F. Chillce, Luiz C. Barbosa e Aldário C. Bordonalli

Resumo—Amostras de fibra de vidro telurito dopado com érbio e itérbio foram avaliadas empiricamente em relação às suas propriedades de amplificação óptica. Tendo como base as configurações do amplificador óptico a fibra dopada com érbio, amostras de diferentes comprimentos foram submetidas a potências de bombeio de valores distintos. Como resultado, pode-se verificar que valores de ganho óptico da ordem de 30 dB foram alcançados com bombeio bi-direcional da ordem de 100 mW, para amostras de apenas 2 cm. Além disso, a interação entre a matriz vítrea com o érbio e o itérbio fornece transições que levam a larguras de banda de 3 dB para o espectro de ASE que podem chegar a 70 nm, dependendo da configuração de bombeio, mostrando o potencial de aplicação dessas fibras como amplificadores ópticos.

Palavras-Chave—amplificação óptica, comunicações ópticas, vidro telurito.

Abstract—Several erbium and ytterbium doped tellurite fibre samples were experimentally investigated in relation to their optical amplification characteristics. By referencing to basic erbium doped fibre amplifier topologies, samples of different lengths were submitted to distinct levels of pump power. As a result, on-off gain values as high as 30 dB were observed for bi-direction pumping at 100 mW from samples of only 2 cm. Also, due to the interaction among the tellurite glass, erbium and ytterbium, the ASE bandwidth can reach up to 70 nm, proving the potential application of such fibres to optical amplification.

Keywords—optical amplifier, optical communications, tellurite glass.

I. INTRODUÇÃO

As previsões para o futuro próximo em telecomunicações indicam um crescimento do tráfego nas redes consideravelmente maior que o atual. Desde 2000, após o colapso econômico enfrentado pelas telecomunicações, o tráfego mundial tem crescido a uma média de mais de 100% ao ano, devido, essencialmente, à transferência de dados pela Internet. Apenas o sistema de comunicações por fibras ópticas será capaz de acomodar tal tráfego [1]. Uma das possíveis soluções para o aumento da largura de banda é a ampliação da faixa de operação dos sistemas de multiplexação por divisão

Thisien G. Montes e Aldário C. Bordonalli, Departamento de Microonda e Óptica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. E-mails: thisien@dmo.fee.unicamp.br, aldario@dmo.fee.unicamp.br. Enver F. Chillce, Luiz C. Barbosa, Departamento de Eletrônica Quântica, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. E-mails: chillce@ifi.unicamp.br, barbosa@ifi.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (308553/2010-1), pela CAPES, pela FAPESP/Padtec (07/56024-4), pelo Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica (CePOF) e pelo FOTONICOM.

em comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplexing*), o que implica no desenvolvimento de novas propostas para amplificadores ópticos [2]. Dentro desse cenário, a fibra de vidro telurito aparece com um futuro promissor, principalmente após estudos recentes que relataram amplificação em uma faixa de até 70 nm sobre as bandas C e L [3]. Com isso, tornam-se necessárias análises experimentais que permitam a caracterização do possível comportamento de amplificação de diferentes materiais.

A escolha do material hospedeiro de vidro é importante no processo de amplificação, pois, por meio das características de energia da rede cristalina, regulam-se as taxas de transições não radiativas que influenciam os tempos de vida dos níveis de energia dos íons de elementos de terras raras, provocando diferenças na amplificação efetiva. O vidro telurito mostra-se de boa qualidade óptica, com ótima transmitância na faixa espectral entre 530 e 5000 nm, contra somente 200 a 3000 nm do vidro de sílica. Além disso, possui alta solubilidade em relação aos elementos das terras raras, fazendo dele um forte candidato para a fabricação de dispositivos, como lasers e amplificadores ópticos a fibra [4-8].

O elemento dopante é de fundamental importância para o funcionamento de amplificadores ópticos a fibra. Como já demonstrado [9], quando o érbio (Er) e o itérbio (Yb) são empregados no mesmo procedimento de dopagem da sílica, a absorção resultante torna-se muito maior que aquela quando apenas o érbio é empregado. Além disso, tem-se uma transferência extra de energia dos íons de itérbio para o érbio. Porém, as características físicas do Yb junto ao Er provocam mudanças no índice de refração do núcleo da fibra, influenciando no valor de abertura numérica e, logo, no acoplamento da luz ao núcleo [10]. É esperado um princípio similar no comportamento se a matriz vítrea hospedeira usada for o vidro de telurito.

Recentemente, estudos das propriedades físicas dos elementos formadores do vidro telurito procuram encontrar a melhor combinação possível da quantidade do(s) elemento(s) dopante(s) [11-12]. Pode-se afirmar que o vidro de telurito, como amplificador óptico, ainda não possui uma composição específica, sendo pouco explorado em aplicações práticas de comunicações por fibras ópticas, devido, principalmente, à sua pouca rigidez. Mesmo assim, é importante avaliar a potencialidade das características de amplificação do vidro telurito fabricado com dosagem de compostos inéditos, visando uma potencial aplicação de suas propriedades nos sistemas ópticos. Dessa forma, este trabalho apresenta uma investigação experimental do vidro de telurito dopado com itérbio e érbio (EYDTF – *erbium and ytterbium doped tellurite fiber*) sob o

ponto de vista de suas propriedades de amplificação óptica. Para tanto, amostras de 2 e 6 cm de comprimento foram submetidas a potências de bombeio de 50 e 100 mW, acopladas seguindo os padrões das topologias básicas dos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA – *erbium doped fiber amplifier*). Com essa investigação, foram levantados os espectros de emissão espontânea amplificada (ASE – *amplified spontaneous emission*) e de ganho óptico *on-off* das amostras (razão da variação de potência óptica do sinal com e sem bombeio aplicado). Para este último, cobriu-se a faixa de 1520 a 1590 nm, de acordo com a sintonia possível do laser de sinal disponível. Dos resultados obtidos, observaram-se larguras de banda de ASE de até 70 nm para bombeio bidirecional de 100 mW, com o ganho *on-off* chegando a ser de até 30 dB para um dado comprimento de onda de sinal, indicando que a fibra apresenta propriedades de amplificação da luz.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para a análise das características de amplificação óptica das amostras de fibra telurito dopado com érbio e itérbio, utilizar-se-ão as topologias básicas de EDFAs como referência, ou seja, aquelas com circuitos ópticos onde o bombeio está no sentido co-propagante, contra-propagante e bi-direcional em relação à propagação do sinal a ser amplificado. A topologia bi-direcional, em particular, pode proporcionar um melhor aproveitamento do potencial da amostra de EYDTF, devido à concentração da inversão de população ocorrer nas duas extremidades da fibra [13-15].

O aparato experimental utilizado é ilustrado na Fig. 1. Um laser em cavidade externa sintonizável entre 1520 e 1590 nm fornece o sinal a ser amplificado. A saída deste laser é acoplada a um atenuador óptico variável, que promove a variação da potência óptica de entrada do sinal em relação à EYDTF, e ao isolador 1, antes de chegar à entrada A de um acoplador direcional seletor de comprimento de onda (WDM 1). Este acoplador direcional sobrepõe o sinal a ser amplificado (portas A a C) ao sinal do laser de bombeio 1 (portas B a C), em 980 nm, antes do acoplamento à EYDTF. O sinal na saída da amostra passa, então, pelo WDM 2 (portas C a A), que separa o bombeio (porta B), no caso de análise da topologia co-propagante, ou permite o acoplamento do sinal do bombeio 2 (980 nm) à EYDTF, nos casos de bombeio contra-propagante e bi-direcional, e por um isolador, antes de ser acoplado a um analisador de espectro óptico (AEO). Cabe-se apenas ressaltar que, no caso da topologia com bombeio contra-propagante, a porta B do WDM 1 serve apenas para a saída do sinal de bombeio.

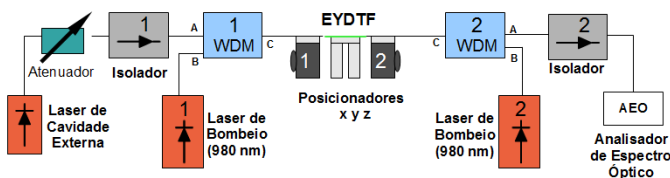


Fig. 1. Arranjo experimental para caracterização de amostras de EYDTF.

A fragilidade das fibras de vidro telurito, aliado ao tamanho de suas amostras, impossibilitou o uso de conectores, como se faz usualmente com fibras de sílica. Dessa maneira, o acoplamento de luz precisou ser feito por meio de uma montagem experimental no ar, com posicionadores para movimentação de fibras nos eixos XYZ. A Fig. 1 mostra a localização dos posicionadores XYZ 1 e 2, dotados de parafusos micrométricos para sintonia fina, que

movimentaram dois segmentos de fibra de sílica, com extremidades devidamente clivadas. As faces opostas desses dois segmentos, bem como todas as outras ligações entre componentes, encontravam-se conectorizadas. Entre os dois posicionadores XYZ, a amostra clivada de fibra EYDTF foi colocada sobre uma plataforma fixa. Sobre os posicionadores e plataforma, suportes apropriados ofereciam encaixe firme e estável às fibras para um melhor alinhamento. A Fig. 2 ilustra a disposição dos rabichos de fibra e de uma das amostras de EYDTF. Deve-se destacar que, com a diferença entre os comprimentos de onda de sinal e bombeio, a utilização de lentes acoplamento tornou-se ineficiente. Assim sendo, as amostras foram aproximadas, como em destaque na Fig. 2, e o acoplamento maximizado por meio de ajustes dos posicionadores XYZ.

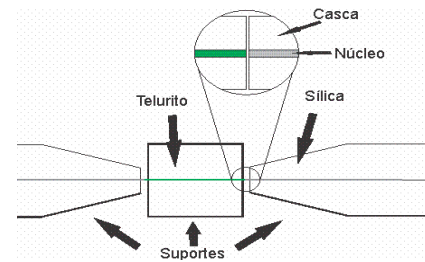


Fig. 2. Ilustração do procedimento de alinhamento e aproximação entre as fibras de vidro telurito e os rabichos de sílica.

III. DESCRIÇÃO DA AMOSTRA

As amostras de fibra utilizadas na caracterização são compostas especificamente de $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$. A fibra óptica possui um perfil padrão de índice de refração, com estrutura núcleo-casca do tipo convencional e matriz hospedeira de telurito. O núcleo possui dopagem de 20.000 ppm de itérbio e 10.000 ppm de érbio; o diâmetro da fibra é de 125 μm e o diâmetro do núcleo de 6 μm . A abertura numérica é de 0,2 e os índices lineares de refração de 2,1463, 2,0851 e 2,0782, em, respectivamente, 632,8, 1305 e 1563,6 nm. Estes números de composições da fibra de telurito foram obtidos a partir de experimentos realizados pela equipe fabricante, sendo que estas proporções de érbio e itérbio apresentaram os melhores resultados em relação aos comportamentos de absorção, emissão, conversão ascendente de energia (*upconversion*) e abertura numérica [16].

A Fig. 3 mostra imagens da distribuição de intensidade na seção transversal de uma das amostras de EYDTF obtida por meio de um sensor (CCD – *charge-coupled device*, SDC-312), quando o procedimento de alinhamento do sistema ilustrado na Fig. 2 é (a) mal ou (b) bem conduzido. Em ambos os casos, a técnica de acoplamento descrita na Seção II foi empregada para acoplamento de luz a uma das extremidades da amostra de EYDTF. Uma lente de aumento de 40X realiza a colimação do feixe de saída dessa amostra, antes da entrada do CCD. A Fig. 3 (a) mostra o espalhamento expressivo da luz pela casca da fibra quando o acoplamento é ruim. Já a Fig. 3 (b) apresenta uma distribuição de luz concentrada na região do núcleo, fruto de um procedimento de alinhamento cuidadoso. Isto demonstra que a técnica é suficiente para garantir resultados satisfatórios de acoplamento de luz nas amostras, mesmo se comparados ao que se obteve com tentativas de utilização de fusão térmica ou adesivagem óptica entre os vidros de sílica e de telurito.

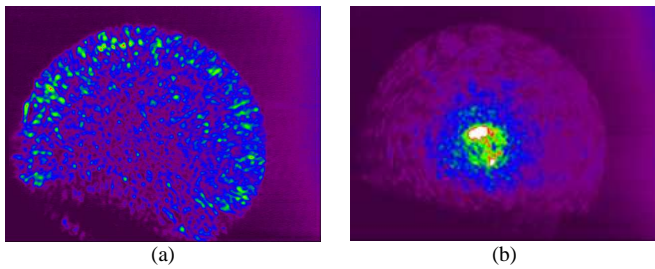


Fig. 3. Imagens da distribuição de luz na saída de uma amostra de EYDTF de 5 cm, com propagação predominantemente (a) pela casca e (b) pelo núcleo.

IV. RESULTADOS

O arranjo experimental ilustrado na Fig. 1 foi o utilizado para avaliar as características de amplificação de amostras de EYDTF quando submetidas a diferentes valores de bombeio e a diferentes topologias. Os valores adotados para a potência de bombeio foram de 50 e 100 mW no comprimento de onda de 980 nm. O valor máximo de potência de sinal na saída do rabicho de fibra de sílica foi de -5 dBm. O laser em cavidade externa foi sintonizado entre 1525 e 1585 nm, em passos de 3 nm. Todo o processo de captação dos dados foi executado pelo AEO e o controle dos dispositivos, incluindo a transferência dos pontos experimentais do AEO para o computador, foi executado via o software LabView.

Nas Fig. 4 e Fig. 5, apresentam-se os espectros de ASE da amostra de 2 cm, para potência de bombeio de 50 mW e 100 mW, respectivamente, e comprimento da amostra de 2 cm, tendo as topologias co-propagante, contra-propagante e bi-direcional como parâmetro. Além disso, estas figuras mostram, em detalhe, a faixa espectral entre 1520 e 1590 nm (faixa de sintonia do laser de sinal) para as mesmas topologias, (a) co-propagante, (b) contra-propagante e (c) bi-direcional, que servirão de referência para análise das características de amplificação apresentadas adiante. O espectro de ASE da topologia co-propagante para bombeio em 50 mW, ainda que com menores valores de pico, demonstra uma forma mais plana na região da Fig. 4 (a). Para a topologia contra-propagante, para o mesmo valor de bombeio, o espectro de ASE exibe um formato diferente, com maiores amplitudes na região de 1530 nm, assemelhando-se ao comportamento na mesma região para o EDFA. Por fim, o bombeio bi-direcional produz as maiores amplitudes em comparação as demais topologias, com largura de banda de 3 dB potencialmente disponível para amplificação entre 1510 e 1570 nm. Quando o bombeio passa a 100 mW (Fig. 5), a distribuição ASE da topologia co-propagante se torna mais uniforme se comparada a do bombeio em 50 mW da Fig. 4. Já as outras duas topologias, respondem por um ligeiro aumento na amplitude (alguns dB) da região entre 1520 e 1570 nm.

As Fig. 6 e 7 apresentam os resultados para os espectros de ASE quando uma amostra, agora de 6 cm, é submetida às mesmas condições de bombeio que as utilizadas nas Fig. 4 e 5. Os gráficos em detalhe também cobrem a mesma região que a anterior e servem para o mesmo propósito posterior. Para esse comprimento de amostra, o comportamento mostrado pela topologia co-propagante difere de maneira significativa do anterior. A amostra de 6 cm, por ser mais longa, contém mais íons de érbio e itérbio disponíveis para absorção do sinal de bombeio e da própria ASE. Assim, a ASE gerada na região de entrada da amostra passa a ser absorvida no restante do material, principalmente para faixa de atuação do érbio, deformando o espectro em relação ao observado nas Fig. 4 e 5 para a mesma topologia.

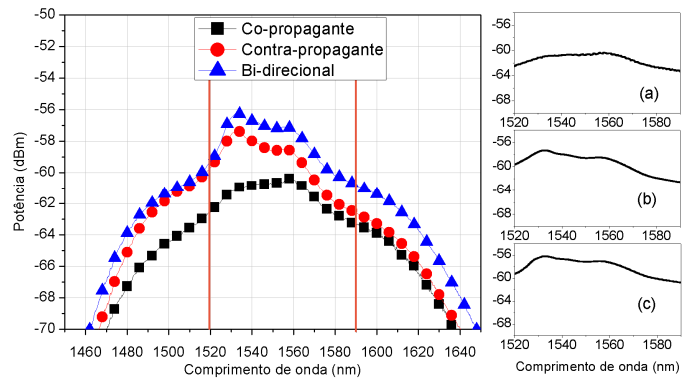


Fig. 4. Espectros de ASE da amostra de 2 cm com bombeio de 50 mW, para as diferentes configurações. Em detalhe, a região entre 1520 e 1590 nm para as topologias (a) co-propagante, (b) contra-propagante e (c) bi-direcional.

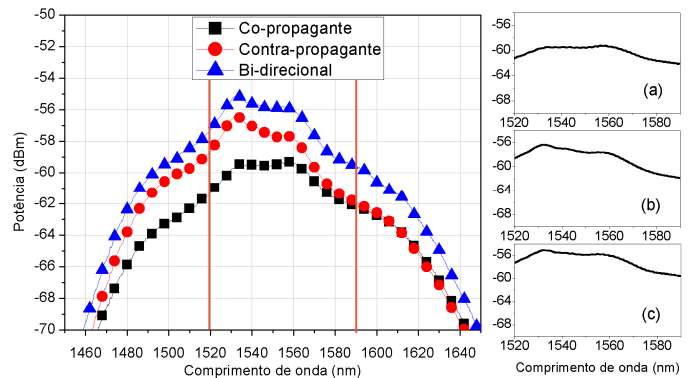


Fig. 5. Espectros de ASE da amostra de 2 cm com bombeio de 100 mW, para as diferentes configurações. Em detalhe, a região entre 1520 e 1590 nm para as topologias (a) co-propagante, (b) contra-propagante e (c) bi-direcional.

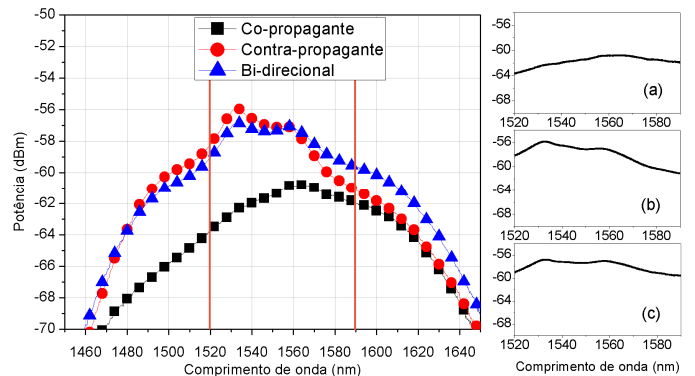


Fig. 6. Espectros de ASE da amostra de 6 cm com bombeio de 50 mW, para as diferentes configurações. Em detalhe, a região entre 1520 e 1590 nm para as topologias (a) co-propagante, (b) contra-propagante e (c) bi-direcional.

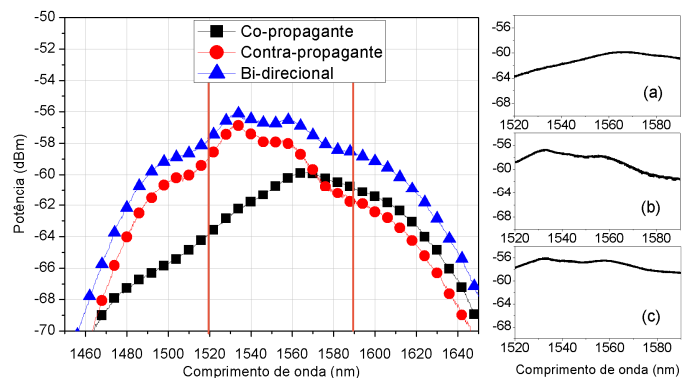


Fig. 7. Espectros de ASE da amostra de 6 cm com bombeio de 100 mW, para as diferentes configurações. Em detalhe, a região entre 1520 e 1590 nm para as topologias (a) co-propagante, (b) contra-propagante e (c) bi-direcional.

As configurações de bombeio contra-propagante e bi-direcional, por apresentarem maior concentração de bombeio na saída da amostra, ou seja, na região mais próxima ao AEO, têm amplitudes muito próximas àquelas apresentadas nas Fig. 4 e 5. Confrontando-se as três topologias, as de bombeio contra-propagante e bi-direcional mostram-se com amplitudes da ordem de 6 a 8 dB superiores que as da co-propagante. Na Fig. 7, com o bombeio em 100 mW, apresenta pouca variação em relação aos resultados da Fig. 6. A topologia bi-direcional destaca-se, como o esperado, e a largura de banda espectral chega a 70 nm.

As Fig. 8 a 10 apresentam os resultados do espectro de ganho óptico *on-off* para as topologias co-propagante, contra-propagante e bi-direcional, respectivamente, tendo-se os comprimentos das amostras de EYTDF de 2 e 6 cm e as potências de bombeio de 50 e 100 mW como parâmetros. Os valores indicados nas figuras correspondem à razão entre as potências de saída do sinal com e sem a aplicação de bombeio, definida como ganho *on-off*. As medidas foram tomadas individualmente a cada comprimento de onda do laser de sinal, em passos de 3 nm.

Para a configuração co-propagante, a amostra de 2 cm apresenta ganho por toda a faixa de 1520 a 1590 nm, porém, variação significativa de valores, como pode ser observado na Fig. 8. O comportamento do perfil do ganho não segue exatamente o esperado, quando comparado aos das curvas de ASE nos detalhes das Fig. 4 e 5. Por outro lado, os valores de ganho são superiores aos conseguidos com fibras de vidro telurito dopados apenas com érbio na região de 1550 nm [4]. Quando o bombeio passa de 50 para 100 mW, fica aparente a saturação até 1560 nm, ou seja, sem alteração do ganho com o aumento da potência de bombeio. A partir de 1560 nm, o ganho apresenta variações expressivas, chegando a uma diferença da ordem de 5 dB com o bombeio de 100 mW.

Se a amostra de 6 cm é utilizada, pode-se dizer que ganho efetivo só fica evidente a partir de 1560 nm, atingindo valores de até 18 dB. Para o bombeio de 50 mW, observa-se inclusive, uma faixa onde a atenuação do sinal prevalece. Dos resultados obtidos, conclui-se que topologia co-propagante requer uma amostra mais curta para fornecer ganho por uma faixa considerável da sintonia do laser de sinal.

Para a configuração contra-propagante, cujos resultados estão mostrados na Fig. 9, pode-se observar a tendência de saturação observada na Fig. 8. Porém, ao contrário do que se observa para a configuração co-propagante, tem-se um comportamento de ganho mais plano, mas de menor valor de pico, apenas quando é aplicado o bombeio de 100 mW para a amostra de 6 cm. Voltando-se à amostra de 2 cm, desconsiderando-se a instabilidade de acoplamento, resultado de expansões térmicas que podem mover a fibra de telurito com a alta concentração do bombeio, o bombeio em 100 mW resulta em um ganho relativamente plano entre 1535 e 1585 nm, alcançando 50 nm de banda apresentando diferenças de ganho menores que 3 dB em torno de 25 dB. Este comportamento mostra o potencial promissor para esta fibra para atuar em regiões não alcançadas pelo EDFA.

O comportamento do ganho para a configuração de bombeio bi-direcional, mostrado na Fig. 10, aproxima-se daqueles observado anteriormente para a ASE, com dois picos de ganho próximos das regiões de 1540 e 1570 nm. A amostra de 2 cm apresenta ganhos expressivos, como os das outras configurações (Fig. 8 e 9), porém, com uma variação

ligeiramente menor para ambos valores de bombeio. Isso tende a aumentar a faixa utilizável para amplificação. Semelhante à configuração co-propagante, o bombeio em 100 mW também é responsável por maiores ganhos por quase toda a faixa inspecionada.

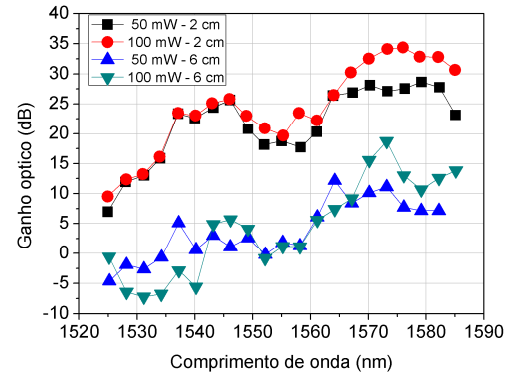


Fig. 8. Espectro do ganho *on-off* para o bombeio co-propagante, tendo a potência de bombeio e o comprimento da amostra de EYTDF como parâmetro.

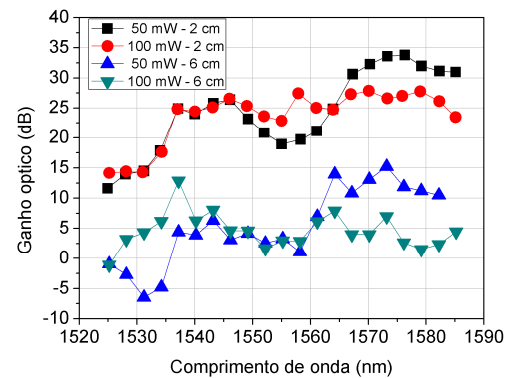


Fig. 9. Espectro do ganho *on-off* para o bombeio contra-propagante, tendo a potência de bombeio e o comprimento da amostra de EYTDF como parâmetro.

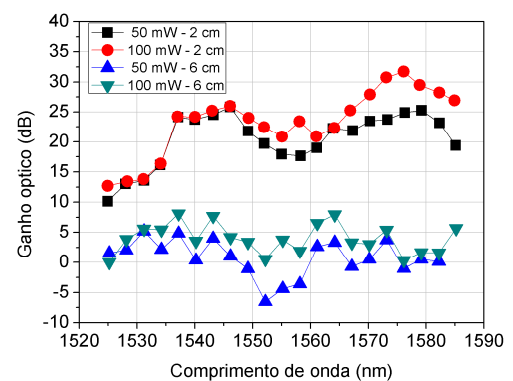


Fig. 10. Espectro do ganho *on-off* para o bombeio bi-direcional, tendo a potência de bombeio e os comprimentos da amostra de EYTDF como parâmetro.

Os ganhos da amostra de 6 cm não apresentaram valores relevantes. Como já mencionado, acredita-se que a razão para isso esteja na quantidade de potência utilizada. A exposição da EYTDF aos altos valores de potência de bombeio pode ocasionar algum tipo de força mecânica ou efeito térmico (ponto de fusão do vidro telurito é bem menor que o do vidro de sílica) nas extremidades da fibra, levando à perda do acoplamento dos ou para os rabichos de fibra de sílica. Mesmo assim, acredita-se que a fibra possa apresentar uma faixa de

atuação de até 70 nm, seguindo a tendência do espectro de ASE, com a melhoria das técnicas de acoplamento óptico.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentaram-se os resultados obtidos na análise experimental das características de amplificação de fibras ópticas feitas com vidro de telurito dopado com érbio e itérbio. As amostras desse tipo de fibra foram fabricadas pelo Grupo de Fibras Ópticas do IFGW/UNICAMP. A avaliação foi conduzida para diferentes configurações de bombeio, valores de potência de bombeio em 980 nm e comprimentos de amostra (2 e 6 cm).

Mesmo havendo problemas significativos de acoplamento de luz, a aproximação entre as faces dos rabichos de sílica e da amostra de EYTFD foi a única solução possível com algum grau de eficiência de alinhamento para a análise proposta. As dificuldades de clivagem da fibra de telurito e os altos valores de índice de refração provocaram perdas por espalhamento e por reflexões de boa parte da luz incidente, o que ocasionou na instabilidade das medições com a variação do comprimento de onda. Além disso, efeitos mecânicos ou térmicos (ponto de fusão do vidro telurito é bem menor que o do vidro de sílica) nas extremidades da fibra também levaram à perda do acoplamento dos ou para os rabichos de fibra de sílica.

Pôde-se verificar a possibilidade de se compensar, ainda que parcialmente, a atenuação do sinal que se propaga pelas amostras após a aplicação de bombeio. De fato, a amostra de 2 cm sob bombeio bi-direcional de 100 mW proporcionou um aumento do sinal de saída de até 30 dB para uma banda de 50 nm. Em geral, a amostra de 2 cm apresentou resultados de ganho óptico *on-off* superior ao da amostra de 6 cm em até 25 dB. Os resultados foram superiores aos obtidos com fibras de vidro telurito dopado apenas com érbio, para amostras de comprimento razoavelmente menor [4].

Com relação aos espectros de ASE, em geral, o bombeio de 100 mW produziu valores de potência superiores aos conseguidos com o bombeio em 50 mW. O maior valor de potência de bombeio produziu os maiores valores de ganho ao longo de todo o espectro analisado apenas para a configuração bi-direcional. Acredita-se que, para as configurações co-propagante e contra-propagante, a saturação no início da fibra devido à alta concentração de dopantes tenha ocasionado a absorção de energia da própria ASE gerada ao longo da amostra.

Várias alternativas para solução de alinhamento foram testadas, porém não apresentaram resultados expressivos além da que foi descrita nesse trabalho. No futuro, deve-se buscar o aprimoramento dessas técnicas por meio do estudo das propriedades físicas do material como requisito para uma melhor solução de acoplamento. Caso este problema seja solucionado, a EYDTF torna-se uma opção viável para aplicações que envolvam amplificação óptica, e sua aplicação comercial passa a ser vista com melhores perspectivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Prof. Hugo L. Fragnito e ao Prof. Diego Marconi, pelo suporte durante os procedimentos experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] E. B. Desurvire, "Optical communications in 2025," Anais da European Conference on Optical Communication, vol 1, pp 5-6, 2005.
- [2] I. P. Kaminov e T. Li, "Optical Fiber Telecommunications IV – A – Components", Academic Press, 1ª ed., San Diego, EUA, 2002.
- [3] H. Ono, A. Mori, K. Shikano e M. Shimizu, "A low-noise and broadband erbium-doped tellurite fiber amplifier with a seamless amplification band in the C- and L-bands", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, n.º 8, pp. 1073-1075, 2002.
- [4] R. Silva, E. F. Chillce, C. L. César, L. C. Barbosa, and A. C. Bordonalli, "Potential for 1550-nm Broadband Amplification by Using Different Er³⁺-Doped Tellurite Fiber Structures," Anais da Optical Fiber Communication Conference and Exposition, artigo JWA15, 2009.
- [5] P. C. Becker, N. A. Olsson e J. R. Simpson, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technology", 1ª ed., Academic Press, San Diego, EUA, 1999.
- [6] J.S. Wang, E.M. Vogel e E. Snitzer, "Tellurite glass: a new candidate for fiber devices", *Opt. Materials* 3, pp. 187-203, 1994.
- [7] S. P. A Osório, E. F. Chillce, E. F. Rodriguez, C. L. César e L. C. Barbosa, "Tellurite glass photonic crystal fibre amplifier", *Glass Technol.*, vol. 46, pp. 160-162, 2005.
- [8] E. F. Chillce, C. M. B. Cordeiro, R. S. Ramos, B. C. Z. Honorio, E. Rodriguez, C. H. Brito Cruz, C. L. Cesar e L.C. Barbosa, "Micro-structured Er³⁺-Tm³⁺ co-doped tellurite fiber for broadband optical amplifier around 1550 nm", Anais da SPIE Optics and Photonics, pp. 6314-32, 2006.
- [9] W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend, L. Reekie, D. J. Taylor e D. N. Payne, "Er³⁺-Yb³⁺ and Er³⁺ doped fiber lasers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, n.º 10, pp. 1461-1465, 1989.
- [10] M. Karásek, "Optimum design of Er³⁺-Yb³⁺ codoped fiber for laser-signal high-pump-power applications", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, n.º 10, pp. 1699-1705, 1997.
- [11] Q. Nie, X. Wang, T. Xu, X. Shen e L. Liu, "Spectroscopic properties from Er³⁺/Yb³⁺ co-doped tellurite glass and fiber", Anais da IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 1129-1134, 2006.
- [12] D. Shixun, X. Tiefeng, N. Qihua, X. Shen e X. Wang, "Fabrication and gain performance Of Er³⁺/Yb³⁺ Codoped Tellurite Glass Fiber", *J. Rare Earths*, vol. 26, n.º 6, pp. 915-918, 2008.
- [13] Q. Mao, J. Wang, X. Sun e M. Zhang, "A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium doped fiber", *Opt. Comm.*, vol. 159, pp. 149-157, 1999.
- [14] S. Milo, R. F. Souza, M. B. C. Silva, E. Conforti e A. C. Bordonalli, "An EDFA theoretical analysis considering different configurations and pumping wavelengths," Anais da International Microwave and Optoelectronics Conference, vol. 1, pp. 105-110, 2003.
- [15] B. Heens, X. Wang, L. Meuleman, F. Ravet e M. Blondel, "Improvement of the EDFA design for both preamplifier and booster applications", Anais da 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, vol. 2, pp.1404-1408, 1998.
- [16] R. N. Garcia, E. F. Chillce, A. R. Miranda, J. M. Giehl, L. C. Barbosa, E. Rodriguez e M. Arronte, "Optical and physical properties of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped tellurite fibers", *Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications V*, vol. 8120, pp. 812005-1-812005-6, 2011.