

Laser Sintonizável em Regime Mode-Locking Harmônico (HML) em Cavidade em Figura-de-Oito

Marlon M. Correia, Flávio A. N. Sampaio, Laila J. S. Souto, Vinicius N. H. Silva e Ricardo M. Ribeiro

Resumo — Este artigo de Iniciação Científica descreve a montagem e testes de um laser baseado em uma cavidade em figura-de-oito operando no regime de modo travado passivo (*passive mode-locking*). O dispositivo é formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semiconductor (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*) como meio de ganho. Obteve-se travamento dos modos longitudinais (Mode-Locking) com taxa de repetição dos pulsos na frequência fundamental e harmônicas, todas em MHz (*Harmonic Mode-Locking*).

Palavras-Chave— *laser em anel de fibra óptica; amplificador óptico semiconductor; harmonic mode-locking; figura-de-oito.*

Abstract — This paper of Scientific Initiation describes the assembly and testing of a mode-locked laser operating on passive mode in a figure-of-eight cavity. The laser is composed by a single-mode fiber optic ring containing an SOA as medium of gain. Mode-Locking was obtained with MHz repetition rate of the fundamental and harmonic frequencies (*Harmonic Mode-Locking*).

Keywords— *ring fiber laser, semiconductor optical amplifier, harmonic mode-locking; figure-of-eight.*

I. INTRODUÇÃO

O estudo de um laser a fibra óptica pode ser direcionado para geração de pulsos ultracurtos na qual a duração no tempo pode variar na faixa de femto e pico segundos. Recentemente, a taxa de repetição de pulsos em GHz de lasers mode-locking tem atraído muita atenção e pode ser utilizado para muitas aplicações, incluindo comunicações ópticas de altas taxas, metrologia e amostragem óptica (*optical sampling*) na digitalização fotônica de sinais de telecomunicações [1, 2].

O regime HML (*Harmonic Mode-Locking*), foi observado pela primeira vez em um laser a fibra dopada com érbio por Grudinin et al, em 1993 [3]. Neste regime é possível excitar harmônicos da frequência fundamental definida pela dimensão física da cavidade, e assim, obter taxas de repetição de pulsos mode-locking maiores que a frequência fundamental sem alterar o comprimento físico da cavidade ressonante. Estudos recentes mostram que muitos lasers a fibra dopada com érbio ou ytérbio (*Er-doped or Yb-doped*) ou com um SOA como meio de ganho, são capazes de operar em regime de HML para taxas de repetição de pulsos em multi-GHz mediante a excitação de harmônicos de alta ordem. Zhou et al, em 2006, mostrou essa capacidade para o 31º harmônico (1.3 GHz) com potência de bombeamento de 400 mW [4] e Chen et al, em 2013 comprovou esta capacidade para 1202º harmônico (12,02 GHz) para uma corrente de injeção de 660 mA [5], respectivamente.

Este artigo descreve o desenvolvimento experimental de um laser sintonizável (1520-1565 nm) a fibra óptica operando em regime HML passivo em MHz, onde utiliza-se um SOA como meio de ganho óptico. Na seção II está descrito a montagem

experimental do laser, na III os resultados obtidos e discussões pertinentes e finalmente em IV às conclusões do artigo.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A Fig. 1 mostra uma cavidade em figura-de-oito de um laser a fibra óptica em que utiliza-se um SOA não-linear como meio de ganho. Esta montagem experimental é formada por dois anéis (*loops*) de fibra óptica conectados entre si através de um acoplador 50/50. O anel nº 1 é formado pelo SOA e por um PC (*Polarization Controller*). Já o anel nº 2 é formado por um PC, por um acoplador que retira 10% da potência óptica da cavidade, por um filtro passa-banda (BPF - *Band Pass Filter*) e por um isolador que permite a luz circular apenas em um sentido. O anel nº 1 funciona como um NALM (*Nonlinear Amplifier Loop Mirror*) [5], onde realiza uma transmissão e reflexão periódica dos pulsos ópticos em função da potência instantânea de entrada e do deslocamento não linear de fase entre os modos longitudinais contra-propagantes suportados pela cavidade. Portanto, se um pulso óptico é formado no anel nº 1 e sua potência de pico satisfaz as condições de transmissão do NALM, o pulso irá se propagar na cavidade, por outro lado se não satisfazer, o pulso será refletido pelo NALM e caso se propague será bloqueado pelo isolador.

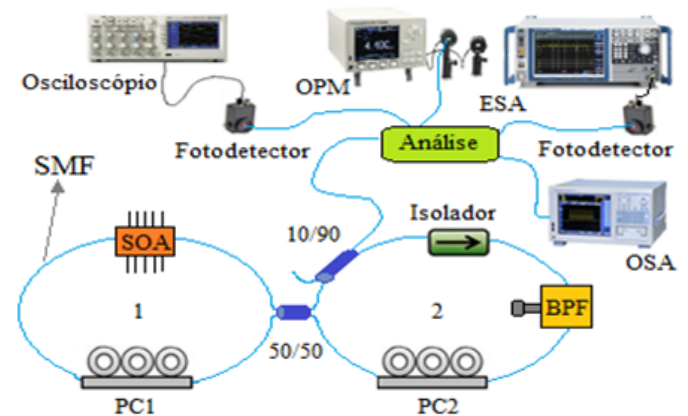


Fig. 1 Esquemático experimental do laser em anel a fibra óptica baseado em uma cavidade em figura-de-oito com um SOA como meio de ganho.

O NALM (anel nº 1) possui um PC que pode ser ajustado de forma a controlar a birrefringência na fibra e maximizar a interferência dos modos longitudinais contra-propagantes no acoplador 50/50, e assim, se obter transmissão máxima para maior intensidade óptica possível e transmissão mínima para menor intensidade. O anel nº 2 tem a função de ressonador óptico principal e realiza em conjunto com o BPF o estreitamento da ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) gerada pelo SOA e conseqüentemente do espectro emitido pelo laser a fibra. Desta forma, a saída do dispositivo pode ser analisada através de um OSA, ESA OPM ou Osciloscópio.

Marlon M. Correia¹, Flávio A. N. Sampaio², Laila J. S. Souto², Vinicius N.H. Silva² e Ricardo M. Ribeiro², ¹Centro de Estudos de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro-RJ e ²Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Laboratório de Comunicações Ópticas, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, Brasil, E-mails: marloncorreia@cetuc.puc-rio.br, laila_sousa@id.uff.br, rmr@telecom.uff.br. Agradecemos a FAPERJ, CNPQ e CAPES pelo financiamento deste projeto.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 mostra o espectro CW (*Continuous Wave*) sintonizável emitido pelo laser em figura-de-oito a partir do ajuste manual de um BPF (*Band Pass Filter*) com banda de 1,2 nm na faixa de 1520 até 1565 nm. A FWHM (*Full Width at Half Maximum*) medida foi de 0,47 nm em 1550 nm.

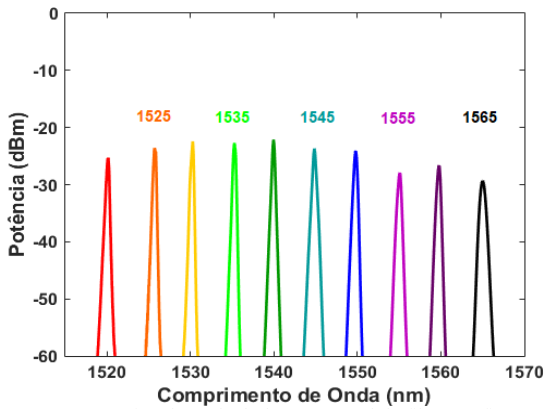


Fig. 2 Espectro óptico de saída do laser em anel de fibra em figura-de-oito sintonizado em diferentes comprimentos de onda na faixa de 1520 até 1565 nm.

A Fig. 3 mostra a intensidade do espectro de RF (*Radio Frequency*) e os pulsos mode-locking gerados de forma passiva na cavidade. Assim, utilizou-se a equação (1) a fim de obter o espaçamento temporal teórico entre os pulsos gerados.

$$\Delta t = \frac{n(L_{perimetro})}{c} \quad (1)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é a soma dos perímetros dos dois *loops* de fibra óptica. Como o comprimento físico dos dois *loops* de fibra é de aproximadamente 19 m, obtemos $\Delta t = 92$ ns como o espaçamento no tempo entre os pulsos. Sendo assim, foi feita a aquisição do sinal no tempo através da conexão de um fotodetector com banda de 1,2 GHz acoplado a um osciloscópio com 200 MHz ou a um ESA com banda de 4 GHz para verificar o espaçamento no tempo dos pulsos gerados e a frequência do modo fundamental, respectivamente.

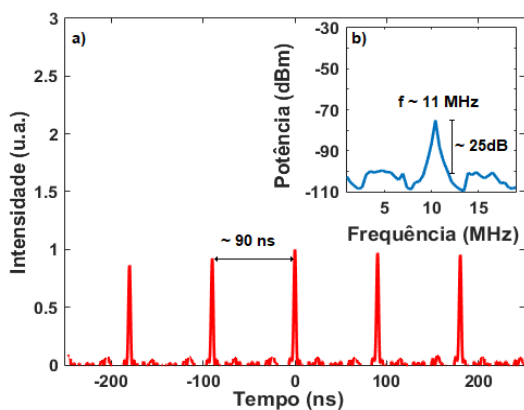


Fig. 3 Em a) Trem de pulsos mode-locked ultracurtos espaçados periodicamente no tempo de 90 ns com taxa de repetição fundamental de 11 MHz da cavidade figura-de-oito. Em b) Modo longitudinal fundamental com SNR (*Signal-Noise-Ratio*) de ~25 dB e RBW (*Resolution Bandwidth*) = 5 kHz.

A taxa de repetição de um laser operando no regime HML (*Harmonic Mode Locking*) pode ser alterada ajustando os controladores de polarização (PCs) e/ou alterando a corrente de *bias* no SOA [5]. O aumento da corrente de *bias* provoca um aumento da potência no interior da cavidade e consequentemente promove a excitação de modos harmônicos

de mais alta ordem. Ao modificar a configuração dos PCs ajustamos a polarização no interior da cavidade, que por sua vez, altera o ganho e o deslocamento não linear de fase do pulso óptico a medida que passa pelo SOA. Este ajuste de polarização também altera a comutação (*switching*) dependente da intensidade óptica no NALM, resultando assim na variação e aumento da taxa de repetição (*Harmonic Mode-Locking*) dos pulsos [5] como demonstrado pela Fig. 4.

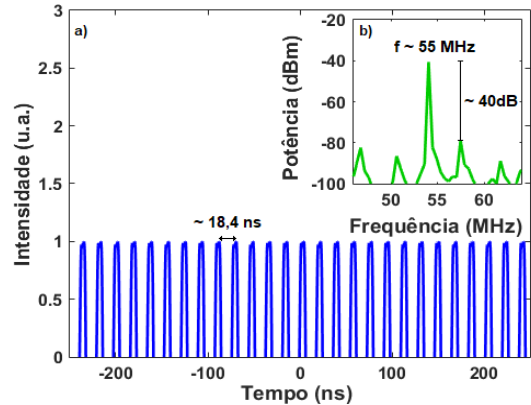


Fig. 4 Em a) Pulsos mode-locked ultracurtos espaçados de 18,4 ns e definidos pela taxa de repetição na frequência do 5º harmônico. Em b) Espectro de RF do 5º Harmônico com SNR de ~40 dB e RBW = 100 KHz.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou o desenvolvimento de um laser em anel à fibra óptica na configuração de figura-de-oito em regime mode-locking passivo. Obteve-se taxa de repetição de pulsos na frequência fundamental de 11 MHz definida pelo comprimento físico total da cavidade (19m), corrente de *threshold* (I_{th} - *threshold current*) de 30 mA que define o limiar entre a emissão espontânea e a emissão estimulada, corrente limiar de formação do pulso (I_{ML} - *mode locking current*) de 100 mA e sintonização espectral entre 1520 – 1565 nm. Ao ajustar os PCs, obteve-se um *Harmonic Mode-Locking* com taxa de repetição de pulsos na frequência do 5º harmônico (55 MHz) para o mesmo comprimento físico de cavidade. A largura temporal dos pulsos não foi medida dado a banda limitada do osciloscópio (200 MHz – 5 ns) utilizado e disponível em nosso laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as agências de pesquisa FAPERJ, CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro fornecido e aos colegas do laboratório de comunicações ópticas (LACOP) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS

- [1] O. Wada, "Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing", *New J. Phys.* 6, 183 (2004).
- [2] Ricardo M. Ribeiro, Frédéric Lucarz and Bruno Fracasso "An All-Optical Sampler for Digitising Radioover-Fibre Transceivers", European Conference on Optical Communications (NOC-OC&I), At Graz, Austria, July 2013.
- [3] A. B. Grudinin, D. J. Richardson, and D. N. Payne, "Passive harmonic mode-locking of fibre soliton ring lasers", *Electronics Letters*, 29, 1860, 1993.
- [4] S. Zhou, D. G. Ouzounov, and F. W. Wise, "Passive harmonic mode-locking of a soliton Yb fiber laser at repetition rates to 1.5 GHz", *Opt. Lett.* 31, 1041 (2006).
- [5] Hou-Ren Chen, Kuei-Huei Lin, Chih-Ya Tsai, Hsiao-Hua Wu, Chih-Hsuan Wu, Chieh-Han Chen, Yu-Chieh Chi, Gong-Ru Lin, and Wen-Feng Hsieh, "12 GHz passive harmonic mode-locking in a 1.06 μm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration," *Opt. Lett.* 38, 845-847 (2013).