

# Implementação de Sistema de Gravação de Redes de Bragg com perfis Arbitrários de Apodização por Varredura do Feixe de Escrita

Francelli Klemba, Fabiano Kuller, Christine Marconcin, Jean Carlos Cardozo da Silva, Márcia Müller, Alexandre de Almeida Prado Pohl, José Luís Fabris, Hypolito José Kalinowski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 Curitiba, PR  
e-mail: [hjkalin@cpgei.cefetpr.br](mailto:hjkalin@cpgei.cefetpr.br)

**Resumo** ¾ Este trabalho apresenta a aplicação de dois processos para gravação de redes de Bragg com iluminação direta através de máscara de fase e utilizando um interferômetro com máscara de fase. A apodização é feita movimentando o feixe laser de escrita sobre a máscara de fase, tanto no interferômetro quanto na gravação direta. O controle de movimento é implementado mediante perfis de velocidades diferenciadas do motor que desloca o feixe. Na técnica de escrita direta foram produzidas redes mais longas com até 5,0 mm de comprimento, e espectralmente mais estreitas com largura de banda de 0,16 nm.

**Palavras-chaves** ¾ Redes de Bragg, Perfis de Apodização

## I. INTRODUÇÃO

As redes de Bragg podem ser gravadas usando-se técnicas interferométricas, das quais a precursora é a técnica holográfica [1], onde a modulação espacial da intensidade é obtida pela interferência de dois feixes coerentes. Sua utilização exige uma fonte laser no ultravioleta (UV) com coerência temporal adequada para obtenção do padrão de interferência sobre a fibra. Além desta limitação, a maioria das montagens experimentais requer igualmente a utilização de fontes com coerência espacial [2-5].

A técnica mais difundida entre as técnicas que não utilizam um interferômetro, e atualmente a mais empregada dentre todas as técnicas de fabricação é a iluminação direta através da máscara de fase [6], devido à sua simplicidade, capacidade de reprodutibilidade e à reduzida coerência da emissão laser necessária para formar o padrão de interferência [7].

Redes produzidas com perfis uniformes de iluminação apresentam, além da banda central de reflexão, lobos laterais de menor amplitude, que podem comprometer a aplicação do dispositivo. A eliminação desses lóbulos laterais [8] é essencial para redução de diafonia em dispositivos óticos destinados a sistemas WDM.

Neste trabalho descreve-se o processo de fabricação de redes de Bragg por meio de um sistema experimental que opera tanto com a técnica de iluminação direta com máscara de fase quanto na de interferômetro com máscara de fase. Também é apresentado um sistema que realiza uma varredura do feixe de gravação incidente sobre a máscara de fase, desenvolvido para apodizar as redes de Bragg. O deslocamento do feixe é feito por meio do controle da

velocidade aplicada a um motor e a implementação do controle dos perfis de velocidade é apresentada. São apresentados resultados comparativos entre os dois sistemas de gravação implementados.

## II. SISTEMA DE GRAVAÇÃO

As montagens utilizadas para gravação das redes de Bragg com base nas técnicas de máscara de fase e interferômetro com máscara de fase [9] estão apresentadas na Fig. 1. Em ambos os sistemas de gravação a fonte de radiação consiste num laser no ultravioleta (Nd:YAG 266 nm).

Para o sistema do interferômetro com máscara de fase, representado pelos pontilhados na Fig. 1, o feixe de luz UV, difratado nas ordens  $\pm 1$  pela máscara de fase, é recombinado na fibra através de dois espelhos móveis (5). O feixe de ordem zero da máscara é bloqueado por um anteparo opaco. Na montagem os espelhos são movimentados por dois motores de corrente contínua (CC), possibilitando o ajuste para que os feixes se cruzem numa mesma região da fibra e assim produzam o padrão de interferência. A Fig. 1 mostra que o suporte da fibra encontra-se sobre anteparo com deslocamento horizontal, que é movido por um terceiro motor CC (7). O diâmetro do feixe pode ser alterado pela íris (2), posicionada logo após a saída do laser, de forma a definir o comprimento da rede gravada e permitir selecionar a região do feixe laser com melhor uniformidade espacial. Para focalizar os feixes na fibra, uma lente cilíndrica (6) com distância focal de 50,2 mm foi colocada entre os espelhos e a fibra.

Nessa montagem, o comprimento de onda refletido pela rede gravada,  $I_B$ , é determinado pela metade do ângulo de cruzamento entre os feixes,  $q_m$ , e pelo comprimento de onda do laser de gravação,  $I_e$ :

$$I_B = \frac{I_e n_{eff}}{\text{sen} \frac{q_m}{2}} \quad (1)$$

onde  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo da fibra.

Devido à elevada sensibilidade de  $I_B$  a pequenas variações de  $q_m$ , os espelhos utilizados podem ser rotacionados com uma resolução de  $10^{-3}$  graus, sendo o movimento controlado por um computador pessoal (PC).

Com esta resolução, é possível gravar redes de Bragg com incrementos de  $\approx 0,11$  nm no comprimento de onda. O posicionador linear onde se encontra a fibra tem uma resolução de  $0,1 \mu\text{m}$  e também é controlado pelo computador. Dessa forma, sempre que há uma alteração no ângulo dos espelhos, o programa de controle desenvolvido corrige a posição da fibra para o ponto de focalização.

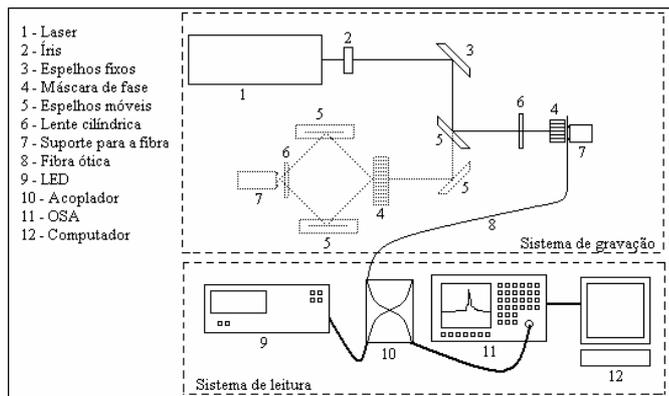


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG com máscara de fase. Os pontilhados referem-se ao sistema de gravação com o interferômetro com máscara de fase

Para gravação de redes com largura de linha estreita (em torno de  $0,2$  nm) e alta refletividade (superior a  $25$  dB), foi implementada uma modificação no sistema de gravação. Um quarto motor de precisão foi adicionado à montagem de forma a deslocar o espelho posicionado na entrada do interferômetro. Com a translação do espelho em velocidade constante, o feixe UV faz uma varredura na máscara de fase, fazendo com que o padrão de interferência, de dimensão finita em virtude da coerência espacial e dimensão do feixe, desloque-se sobre a fibra. Isso faz com que as franjas do padrão de interferência sejam intensificadas na direção do deslocamento do feixe, diminuindo de intensidade na direção oposta. O perfil de velocidade dessa função de recobrimento pode resultar numa apodização da rede produzida, resultante do perfil não uniforme da alteração do índice de refração da fibra. Esse método de gravação produz uma variação gradual da modulação no índice de refração da fibra de acordo com um perfil de deslocamento pré-estabelecido, deixando o espectro da rede mais uniforme.

Para possibilitar a gravação mediante iluminação direta com máscara de fase foi implementada uma modificação na montagem original do sistema de gravação interferométrico. O sistema modificado permite que, dependendo da necessidade, a gravação das redes possa ser realizada por qualquer uma dessas técnicas. Para tanto, um quarto espelho móvel foi inserido na montagem original, ao lado do espelho de entrada do interferômetro, sendo que o conjunto composto por estes dois espelhos é movido pelo motor de precisão. Este espelho redireciona a luz do laser fazendo-a incidir sobre uma montagem ótica adicional, representada pela linha contínua do feixe laser na Fig. 1, contendo uma lente cilíndrica, uma máscara de fase e a fibra ótica. As ordens difratadas pela máscara formam um padrão de interferência sobre a fibra ótica. Com a translação do espelho em velocidade constante, o feixe UV focalizado pela lente cilíndrica faz uma varredura

na máscara de fase e o envelope de visibilidade do padrão de interferência se desloca ao longo do comprimento da fibra. Com este sistema é possível produzir redes mais longas do que com o sistema anterior, sendo o comprimento destas redes limitado pelas dimensões da máscara de fase e pelo curso do motor.

A monitoração da gravação de redes de Bragg em fibra é feita em tempo real e, conseqüentemente, sua caracterização é imediata, podendo ser observada em um analisador de espectro ótico (OSA). A leitura dos espectros de reflexão das redes de Bragg (Fig.1) é obtida através de um sistema que usa um LED superluminescente como fonte de luz, cujo espectro concentra-se na faixa de  $1445$  nm a  $1645$  nm. Essa fonte é acoplada à porta de entrada de um circulador ótico de três portas e a rede de Bragg na porta subsequente. O espectro de reflexão estará disponível na terceira porta do circulador, a qual é conectada a um analisador de espectro ótico (Anritsu, MS9710B). Outras fontes de banda larga como a emissão espontânea amplificada (ASE) de um amplificador ótico de fibra dopada com érbio (EDFA) podem ser utilizadas dependendo da faixa espectral de interesse.

O sistema de caracterização apresentado permite que o processo de gravação seja acompanhado em intervalos de tempo que dependem fundamentalmente do tempo de aquisição e amostragem do sinal pelo equipamento. A saída do OSA é monitorada pelo computador, permitindo analisar a evolução do processo assim como o armazenamento posterior de todos os dados referentes à gravação como, por exemplo, comprimento de onda de Bragg, refletividade e largura de banda. É importante salientar que as extremidades das fibras ligadas a portas do circulador que não estejam sendo usadas, devem ser imersas em líquido casador de índice de refração (IM), de forma a minimizar as reflexões de Fresnel, e evitar que sinais espúrios possam ser inseridos na medida realizada.

### III PERFIS DE VELOCIDADE

A estratégia básica adotada para prover o controle de velocidade do motor, posicionado na entrada do interferômetro, baseia-se no envio de comandos seqüenciais de velocidade e distâncias a serem percorridas pelo feixe de escrita sobre a fibra. Antes da programação dos perfis de velocidade foram desenvolvidas sub-rotinas necessárias em todos os outros programas principais. Estes, por sua vez, são responsáveis pela inicialização do controlador principal, ligando os eixos de translação utilizados, e também pelo envio dos comandos. O programa e as rotinas desenvolvidas foram implementadas com o aplicativo *LabView*, que permite uma interface de controle amigável para envio de comandos ao motor.

A escolha dos perfis de velocidade é baseada em estudos já realizados [10] e tem como principal objetivo fazer com que o feixe de laser permaneça mais tempo na região central da rede que está sendo escrita do que nas suas extremidades. Com isso o controle foi programado de maneira que obedecesse a perfis como: velocidade constante, rampa, trapézio e gaussiano.

As interfaces dos programas devem receber do usuário os principais dados necessários para a correta aplicação do perfil

escolhido. Por exemplo, o perfil constante recebe como entrada apenas o valor de velocidade desejado e a distância a ser percorrida.

Todos os programas têm em comum duas entradas: uma que define qual dos eixos vai ser movimentado e outra que define o número de vezes em que ocorrerão mudanças de velocidade em cada seguimento do programa.

A Fig. 2 apresenta a interface do programa da função gaussiana. Esse perfil descreve mudanças de velocidade que obedecem a uma curva gaussiana, começando com uma velocidade maior (velocidade inicial) até atingir a velocidade de banda constante, podendo aí permanecer por uma determinada distância (*delta velocidade constante*) ou retornar à velocidade inicial, ainda obedecendo a uma curva gaussiana.



Fig. 2. Interface do LabView com o usuário – perfil gaussiano

Na Fig. 3 é mostrado o perfil de velocidade da função gaussiana implementado usando a interface com o *LabView*. A aquisição dos valores de velocidade para elaboração da curva foi feita através do comando *Do not Highlight Execution*, que proporciona a observação dos valores de velocidade calculados e enviados ao motor.

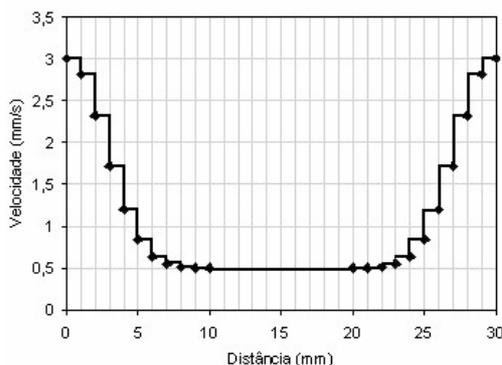


Fig. 3. Gráfico de resposta do motor à função gaussiana

#### IV. RESULTADOS

Para a verificação dos perfis de velocidade elaborados, redes de Bragg foram gravadas com o arranjo interferômetro com máscara de fase apresentado na Fig. 1.

Na Fig. 4 é apresentado o espectro de reflexão de uma rede de Bragg gravada sem apodização e na Fig. 5 uma rede gravada com o perfil de apodização gaussiano. Os espectros das redes apresentados nas figuras 4 e 5 apresentam comprimentos de onda central em 1540 e 1536,3 nm, respectivamente. Essa diferença é em virtude dos

comprimentos de onda escolhidos de forma aleatória para gravação das redes.

Nota-se na Fig. 5 o desaparecimento dos lóbulos laterais de primeira ordem existentes na Fig. 4, permanecendo apenas o pico central. A razão de supressão dos lóbulos laterais foi estimada em mais de 20 dB.

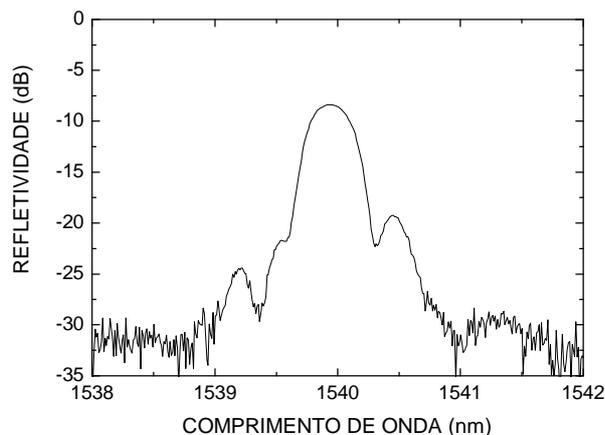


Fig. 4. Espectro de reflexão de uma rede de Bragg sem apodização

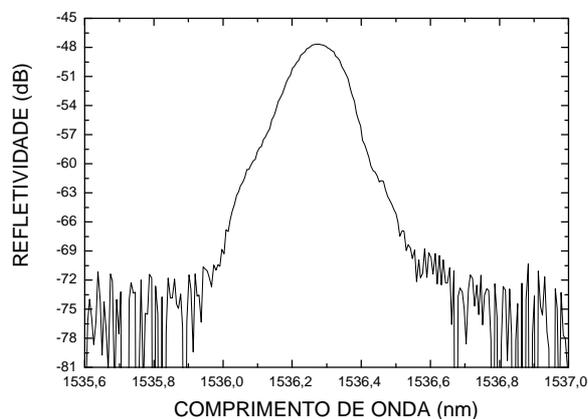


Fig. 5. Espectro de reflexão de uma rede com perfil de apodização gaussiano

Além da produção de redes com perfil apodizado, o sistema implementado também permite a escrita de redes mais longas. Desta forma, as redes apresentam uma largura de banda menor, bem como um menor erro na determinação da sua posição central.

Na Fig. 6 são apresentados os espectros de duas redes não apodizadas, gravadas com 3,5 mm (rede A) e 5,0 mm (rede B) de comprimento, escritas em fibra fotossensível não hidrogenada iluminada diretamente através da máscara de fase. A diferença para os comprimentos de onda centrais das redes ( $\approx 0,1$  nm) deve-se a diferentes tensões aplicadas à fibra durante seu posicionamento no suporte de fixação.

A Tabela I fornece os parâmetros obtidos logo após o processo de gravação, com a fibra ainda posicionada no suporte do sistema de gravação. A potência do laser foi mantida constante durante as gravações, a resolução do OSA em 0,1 nm e a temperatura do laboratório  $\approx 20$  °C.

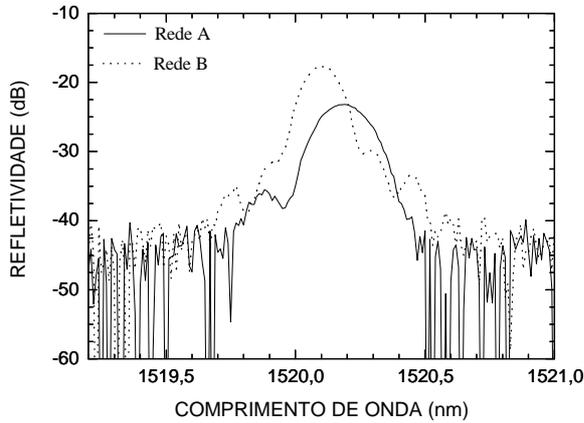


Fig. 6. Espectros de reflexão de duas redes escritas mediante iluminação direta através da máscara de fase: (A) 3,5 mm e (B) 5,0 mm.

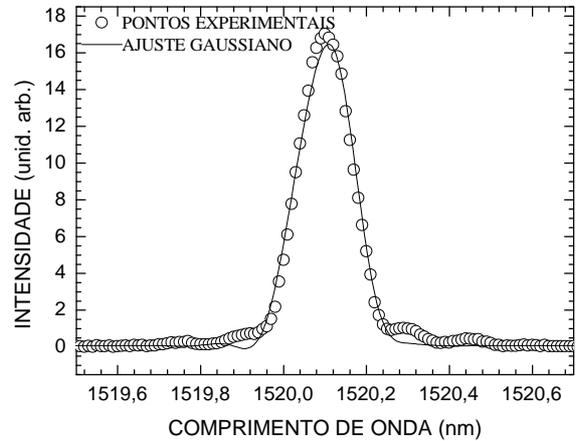


Fig. 9. Ajuste gaussiano da rede B, gravada com máscara de fase.

TABELA I: PARÂMETROS DAS FBG (FIBRA FOTOSSENSÍVEL) PRODUZIDAS COM A TÉCNICA DE MÁSCARA DE FASE.

Redes	$\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm)	Refletividade (dB)	Velocidade de Deslocamento do motor (m/s)	Comprimento da rede (mm)
A	1520,20	0,22	24,55	0,002	3,5
B	1520,10	0,16	26,00	0,001	5,0

Nas Fig. 8 e 9 são mostrados, respectivamente, os espectros de uma rede gravada com interferômetro e máscara de fase (rede C), e da rede B, gravada mediante iluminação direta através da máscara de fase, ajustadas com funções gaussianas. A rede C foi gravada em fibra SMF (*single mode fiber*) hidrogenada, apresentando largura de banda de 0,41 nm, e comprimento de 2,5 mm. O espectro da rede C apresenta uma incerteza na posição do comprimento de onda de Bragg de  $\pm 0,61$  pm, enquanto que na rede mais estreita (rede B), Fig. 9, a incerteza na posição do comprimento de onda é  $\pm 0,21$  pm.

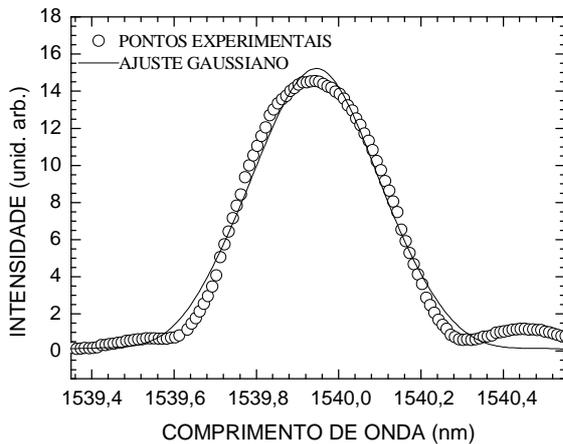


Fig. 8. Ajuste gaussiano da rede 2, gravada utilizando o interferômetro e a máscara de fase.

## V. CONCLUSÕES

Mostramos a implementação de um sistema de gravação de redes de Bragg versátil, que pode ser alternado entre as técnicas de interferômetro com máscara de fase e iluminação direta através da máscara de fase sem alterações substanciais do sistema como um todo.

O sistema desenvolvido conta com um mecanismo de apodização das redes de Bragg, que pode utilizar perfis arbitrários de iluminação, definidos pelo usuário. O controle destes perfis se dá por meio do deslocamento do feixe de gravação sobre a máscara de fase com velocidade variável. O uso do aplicativo *LabView* simplifica bastante o trabalho de implementação dos diferentes perfis de velocidade. A razão de supressão dos lóbulos laterais nas redes produzidas com o sistema foi estimada em mais de 20 dB para os perfis de velocidade elaborados. O sistema também se mostrou efetivo na produção de redes de Bragg com menores larguras de banda, atingindo o valor de 0,16 nm para uma rede com 5,0 mm de comprimento. Além disto, a determinação do comprimento de onda central da rede pode ser realizada com menor erro. O erro foi de  $\pm 0,21$  pm para a rede com 5 mm de comprimento e  $\pm 0,61$  pm para a rede com 2,5 mm.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio financeiro da ANP/MCT (PRH10-UTFPR), do FUNTTEL/FINEP (GIGA), Fundação Araucária, CAPES e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Optics Letters*, vol. 14, p. 823-825, 1989.
- [2] P. E. Dyer, R. J. Farley, R. Gield, "Analysis and application of a 0/1 order Talbot interferometer for 193 nm laser grating formation", *Optics Communications*, vol. 129, p. 98-108, 1996.
- [3] F. Floreani, A. Gillooly, D. Zhao, L. Zhang, I. Bennion, "Investigation of intrinsically apodised Chirped fibre Bragg gratings

- fabricated using scanning holographic set-up”, *Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop*, p. 80-85, 2002.
- [4] Y. Wang, J. Grant, A. Sharma, G. Myers, “Modified Talbot interferometer for fabrication of fiber-optic grating filter over a wide range of Bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, p. 1569-1573, 2001.
- [5] B. J. Ashton, J. Canning, N. Groothoff, “Two-point source interferometric grating writing”, *Applied Optics*, Vol. 43, p. 3140-3144, 2004.
- [6] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, “Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask”, *Applied Physics Letters*, vol. 62, p. 1035-1037, 1993.
- [7] A. Othonos, X. Lee, “Novel and Improved Methods of Writing Bragg Gratings with Phase Masks”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, p. 1183-1185, 1995
- [8] A. K. Zajtsev, S. H. Lin and K. Y. Hsu, “Sidelobe suppression of spectral response in holographic optical filter”, *Optics Communication*, 190, pg 103 –108, April 2001.
- [9] J. C. C. Silva, R. Falate, R. Nogueira, H. J. Kalinowski, J. L. Fabris, J. L. Pinto, “Production of fiber Bragg gratings in phase mask interferometers”, *Proceedings of 4<sup>th</sup> Conference on Telecommunications - ConfTele*, Aveiro, Portugal, p. 449-451, 2003.
- [10] J. L. Fabris, F. Kuller, C. Marconcin, H. J. Kalinowski, A. A. P. Pohl, “Implementação de Perfis de Apodização de Redes de Bragg em Fibra Óptica”, *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SbrT’05*, Campinas, Brasil, p. 296-298, 2005.