

# Produção e Caracterização de Redes de Longo Período Gravadas com Arco Elétrico

Rosane Falate, Meire Cristina Fugihara, Márcia Müller, Hypolito José Kalinowski e José Luís Fabris  
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Av. Sete de Setembro 3165, CEP 80230-310 Curitiba-Paraná

**Resumo** — Neste artigo, apresentamos redes de período longo fabricadas pela aplicação, ponto a ponto, de um arco elétrico em uma fibra ótica monomodo padrão. Redes com períodos variando entre 570  $\mu\text{m}$  e 670  $\mu\text{m}$  foram produzidas, com atenuação de pico chegando até 6 dB. A caracterização das redes em função da variação de parâmetros externos indica a possibilidade de sua utilização em sensores de temperatura e de índice de refração.

**Palavras-chaves** — Redes de período longo, arco elétrico, sensores de índice de refração, sensores de temperatura.

## I. INTRODUÇÃO

Desde o descobrimento da fotosensibilidade em fibras óticas [1], este fenômeno tem sido empregado amplamente na produção de dispositivos utilizados na fabricação de sensores [2], compensadores de dispersão [3], multiplexadores e demultiplexadores em sistemas WDM [4].

Uma classe especial destes dispositivos são as redes de período longo (LPG), que vêm se tornando importantes nos últimos anos na área de comunicações óticas, devido principalmente às suas características de baixa perda de inserção e baixa reflexão. Nas comunicações a fibra, as LPGs podem ser usadas como filtros equalizadores de ganho [5] e filtros de rejeição de banda [6].

As LPGs são dispositivos que operam no modo de transmissão, nos quais uma modulação periódica do índice de refração da fibra leva ao acoplamento do modo de núcleo para os modos de casca co-propagantes. Usando a condição de casamento de fase, pode-se obter os comprimentos de onda de pico de atenuação no espectro de transmissão [6]

$$\lambda_m = (n_{co} - n_{cl}^m) \Lambda \quad (1)$$

onde  $\lambda_m$  é o comprimento de onda de ressonância entre o modo de núcleo e o modo  $m$  de casca,  $n_{co}$  e  $n_{cl}^m$  são, respectivamente, o índice de refração efetivo do modo de núcleo e do  $m$ -ésimo modo de casca, e  $\Lambda$  é o período da rede. O modo de casca decai rapidamente à medida em que se propaga ao longo do eixo da fibra, resultando numa banda de atenuação no espectro de transmissão da rede. Como mais de um comprimento de onda pode satisfazer a condição de ressonância para um mesmo período, devido aos diferentes índices de refração efetivos dos modos de casca, o espectro

de transmissão das LPGs é caracterizado por um número discreto de vales nos comprimentos de onda que satisfazem (1). Enquanto o período da rede determina os comprimentos de onda de operação, a atenuação é determinada pela superposição modal e pelo número de períodos de interação.

Uma vez que o acoplamento modal entre o núcleo e a casca é fortemente dependente das condições do meio externo, a resposta espectral da LPG pode ser utilizada para fabricar sensores óticos mais eficientes do que aqueles que utilizam redes de Bragg, tanto no monitoramento de temperatura quanto no de índice de refração [7]-[8].

Embora as primeiras LPGs tenham sido fabricadas baseadas no fenômeno da fotosensibilidade, utilizando como fonte de gravação lasers operando no ultravioleta (UV) [5]-[7], este método é de custo elevado devido não só à fonte de escrita como também ao grande número de máscaras de amplitude a serem usadas, no caso de se desejar obter redes com características diferentes. Além disso, a gravação de redes utilizando radiação UV é limitada a determinados tipos de fibras, destacando-se aquelas que contêm uma alta concentração de Germânio ou sofreram processos de hidrogenação para aumentar a fotosensibilidade.

Recentemente, outros métodos de produção que não utilizam UV tem sido publicados [9]-[11]. Uma técnica interessante é a que utiliza o arco elétrico para a fabricação das redes. Em contraste com aquelas que usam lasers UV ou de  $\text{CO}_2$ , a técnica de fabricação de redes que utiliza arco elétrico é bem mais simples e não necessita de equipamentos de custo elevado. As LPGs produzidas por arco elétrico podem ser escritas em fibras monomodo padrão, com diferentes períodos e modulações de índice de refração, proporcionando um controle bastante versátil das suas características. Existem inúmeras propostas que podem explicar a criação dos defeitos responsáveis pela formação da rede, embora nenhuma delas esteja completamente elucidada até o momento [11].

Neste artigo, mostramos os resultados da fabricação de redes de período longo com o uso de arco elétrico, e o comportamento do espectro destas redes com a variação da temperatura ambiente e do índice de refração do meio circunvizinho.

## II. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Para escrever as LPGs, foi usada uma técnica semelhante à descrita em [11]. O processo de fabricação consiste em posicionar uma fibra monomodo padrão (SMD da ABCXtal) sem a capa, entre os eletrodos de uma máquina de emendas (modelo S46999-M7-A71 da Siemens). Em uma das suas extremidades, a fibra foi fixada a um estágio translacionador

Rosane Falate, rfalate@cefetpr.br, Meire Cristina Fugihara, meire@cpgei.cefetpr.br, Márcia Müller, marcia@cefetpr.br, Tel +55-41-3104642, Hypolito José Kalinowski, hjkalin@cpgei.cefetpr.br, Tel +55-41-3104689, José Luís Fabris, fabris@cefetpr.br, Tel +55-41-3104642.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pelo CNPq.

controlado por computador com uma resolução linear de 5  $\mu\text{m}$  [12]. Uma pequena massa foi presa a outra ponta da fibra para mantê-la com tensão axial constante. Uma descarga elétrica foi então produzida na máquina de emendas, com uma corrente de 12 mA e duração de 0,5 segundos. Após a exposição da fibra ao arco elétrico, a fibra foi deslocada axialmente por um valor que corresponde ao período de rede, repetindo-se o processo de gravação ponto-a-ponto. Usando este procedimento, foram produzidas redes com períodos entre 570  $\mu\text{m}$  e 670  $\mu\text{m}$ , com comprimentos variando entre 30 e 50 períodos de interação.

Durante a gravação da rede, a evolução do seu espectro de transmissão foi acompanhada para verificar as mudanças no espectro e o comportamento dos picos de atenuação, de modo a evitar o re-acoplamento para o modo de núcleo. Além disso, o monitoramento permite a escolha um valor de atenuação desejado para a rede em formação, adequado a cada aplicação em particular. Os espectros foram obtidos utilizando-se como fonte de luz uma lâmpada de Tungstênio. A luz proveniente da fonte foi focalizada na fenda de entrada do monocromador (modelo 9050 da Sciencetech) e, logo após o monocromador, o feixe resultante foi modulado por um *chopper* e acoplado na fibra com uma lente objetiva de 40x. Após a passagem pela fibra, o feixe de luz foi novamente focalizado com uma lente objetiva de 40x num detector de InGaAs (Thorlabs), e o sinal processado por um amplificador diferencial *lock-in* (modelo SR830 da Stanford Research Systems). Todo o sistema de aquisição e deslocamento da fibra foi controlado por um microcomputador. Um esquema da montagem utilizada na gravação é apresentado na Fig. 1.

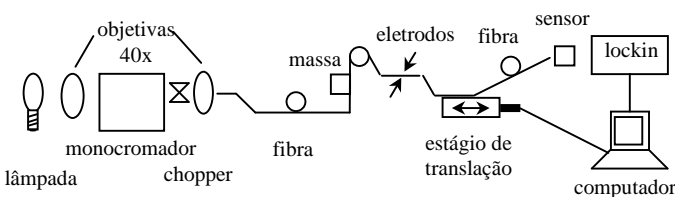


Fig. 1. Esquema da montagem utilizada para fabricação de redes de período longo.

A Fig. 2 mostra a evolução do espectro de uma LPG de período  $\Lambda = 668 \mu\text{m}$  para 20, 30 e 40 períodos de interação, com uma resolução de 4 nm. Pode-se notar o aumento na atenuação do pico principal com o aumento do comprimento de gravação da rede, bem como o surgimento de picos de menor intensidade, correspondentes ao acoplamento para outros modos de casca.

Para investigar a conduta térmica das LPGs, com períodos de 589  $\mu\text{m}$  e 649  $\mu\text{m}$ , para a faixa de 21  $^{\circ}\text{C}$  a 63  $^{\circ}\text{C}$ , em passos de aproximadamente 8  $^{\circ}\text{C}$ , foi utilizada uma resistência para seu aquecimento. Os espectros de transmissão foram feitos com uma resolução de 1 nm, após um tempo de estabilização da temperatura de aproximadamente 10 minutos. A Fig. 3 mostra a posição do pico principal para as temperaturas de 21  $^{\circ}\text{C}$  e 58  $^{\circ}\text{C}$ , para a rede com período de 649  $\mu\text{m}$  e 40 pontos. Pode-se verificar o deslocamento do comprimento de onda de ressonância para

menores energias com o acréscimo da temperatura. No processo de redução da temperatura ocorre o processo inverso sem histerese significativa.

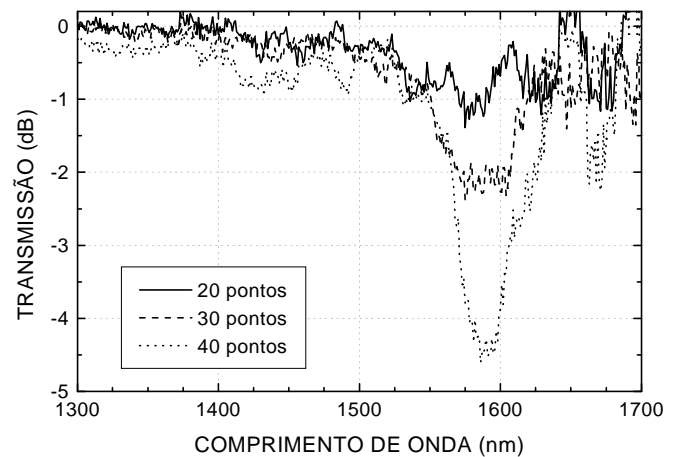


Fig. 2. Evolução da LPG com  $\Lambda = 668 \mu\text{m}$ , para 20, 30 e 40 períodos de interação, fabricada com arco elétrico com uma corrente de 12 mA e duração de 0,5 s.

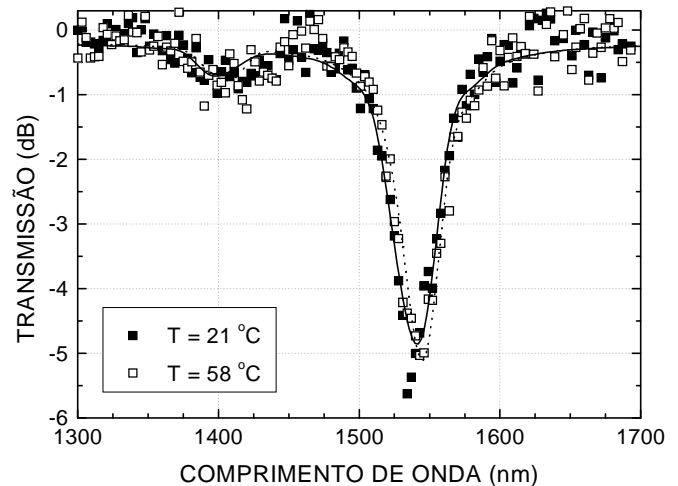


Fig. 3. Posição do pico principal de atenuação da LPG com  $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, para as temperaturas de 21  $^{\circ}\text{C}$  e 58  $^{\circ}\text{C}$ .

A Fig. 4 mostra a evolução do pico de maior atenuação ( $\lambda = 1540 \text{ nm}$ ) durante os processos de aumento e diminuição da temperatura, para esta rede. As sensibilidades obtidas foram de 0,103  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ , e de 0,099  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ , para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente, para a faixa de temperaturas indicada.

Verificou-se também a sensibilidade à temperatura da rede com  $\Lambda = 589 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, Fig. 5, para o pico de maior atenuação em aproximadamente 1430 nm. As sensibilidades obtidas, para a faixa de temperaturas indicada, foram de 0,095  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  e de 0,088  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ , para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente. Para as redes analisadas, os valores obtidos para as sensibilidades com a temperatura estão de acordo com aqueles apresentados na literatura [7],[11] e [13].

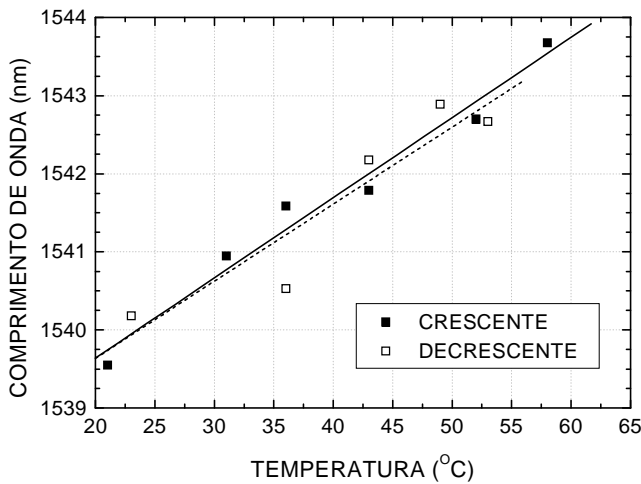


Fig. 4. Variação da posição do pico de maior atenuação em 1540 nm para a LPG com  $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para estes processos.

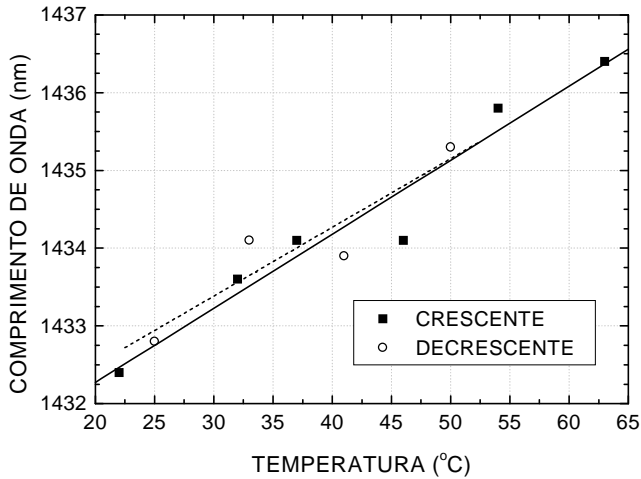


Fig. 5. Variação da posição do pico de maior atenuação em 1430 nm para a LPG com  $\Lambda = 589 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para estes processos.

A rede com período de  $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação foi também utilizada para a determinação de sua sensibilidade à variação do índice de refração do meio circunvizinho ( $n_3$ ). Para esta medida, a LPG foi mergulhada em quatro fluidos com índices de refração diferentes (ar, água, álcool e glicerina). Valores intermediários de índice de refração foram obtidos pela mistura de diferentes quantidades de água à glicerina e água ao álcool. Estes valores foram estimados a partir dos dados para  $\lambda = 589 \text{ nm}$  e temperatura de  $20^\circ\text{C}$  [14], e considerando-se as proporções utilizadas nas misturas. A Fig. 6 mostra a evolução do espectro para a fibra imersa no ar, água e glicerina, para temperatura ambiente variando entre  $20^\circ\text{C}$  e  $21^\circ\text{C}$  e uma resolução de 1 nm. Após cada levantamento do espectro para o qual o meio circunvizinho era um líquido, foi realizada uma limpeza da fibra. Para confirmar a não existência de resíduos sobre a

mesma, um novo espectro era adquirido e comparado com aquele obtido inicialmente para o ar. Todos os espectros para  $n_3 = 1,000$  apresentaram grande semelhança, o que mostra que o filtro também possui uma histerese pouco significativa para a variação de índice de refração.

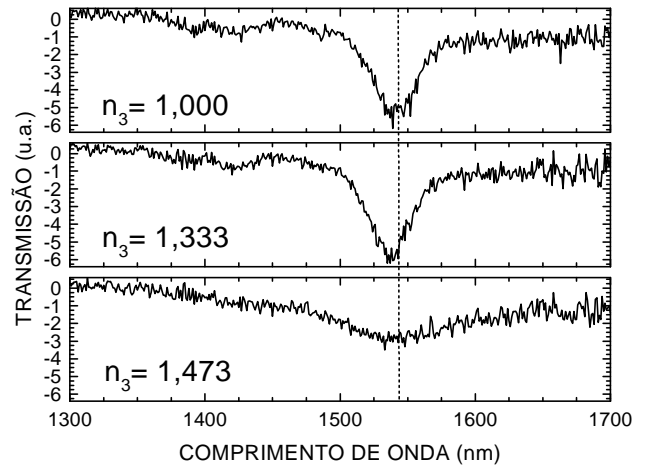


Fig. 6. Deslocamento do pico de atenuação da LPG com  $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, para ar, água e glicerina como meios circunvizinhos.

A Fig. 7 mostra a curva da variação do pico de maior atenuação para diferentes índices de refração do meio externo (a linha ligando os pontos é apenas uma referência para visualização). O comportamento é similar ao observado em LPGs produzidas por fotoexposição [15]. Nota-se o deslocamento do comprimento de onda de ressonância para o azul quando o índice circunvizinho à fibra aproxima-se do índice de refração da casca. Verifica-se ainda o aumento da sensibilidade da rede à mudança de índice de refração quando a variação de índice do meio externo aproxima-se daquele da casca. Para os dados obtidos, a rede apresentou uma variação de 8 nm no comprimento de onda de pico, o que corresponde a uma resolução média de  $0,0116 \text{ (nm)}^{-1}$  para índices entre 1,333 e 1,426.

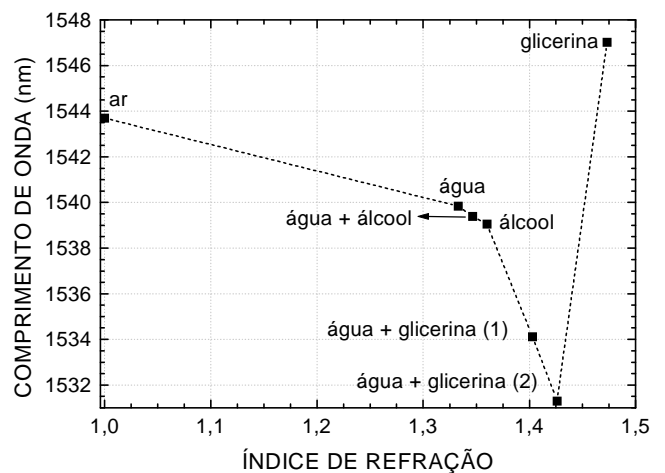


Fig. 7. Variação da posição do pico de maior atenuação da LPG com  $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 períodos de interação, para índices de refração variando entre 1,000 e 1,426.

### III. CONCLUSÕES

Mostramos resultados obtidos pela primeira vez no Brasil da aplicação de arco elétrico na gravação de LPGs em fibras óticas padrão, e descrevemos o sistema experimental utilizado para a gravação. O método possui a vantagem de não requerer o uso de equipamentos caros, como lasers UV e de CO<sub>2</sub>, e fibras fotosensíveis.

A monitoração do espectro da LPG realizada durante o processo de escrita, bem como o controle adequado dos parâmetros de gravação, permitem que sejam obtidas redes com características desejadas para aplicações específicas.

Redes com atenuação de até 6 dB e largura de banda a meia altura de 32 nm foram escritas. Os dispositivos produzidos mostraram-se mais sensíveis à variação de parâmetros externos do que aqueles que utilizam redes de Bragg. Foram obtidos coeficientes entre 0,088 nm/°C e 0,103 nm/°C para temperaturas na faixa de 21 °C a 63 °C, e uma resolução média de 0,0116 (nm)<sup>-1</sup> para índices entre 1,333 e 1,426. A pequena histerese apresentada nos processos de medição mostra que os dispositivos possuem características adequadas para o uso em sensores a fibra.

### REFERÊNCIAS

- [1] K. O. Hill, Y. Fuji, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber Guides: Application to Reflection Filter Fabrication", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647-649, May 1978.
- [2] S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam, "Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurements Using in-Fibre Bragg Gratings Sensors", *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 12, pp. 1133-1134, June 1996.
- [3] G. Yandong, L. Tangjun, C. Qing, L. Qin, W. Zhi *et al.*, "Novel B/Ge Codoped Photosensitive Fiber and Dispersion Compensation in a 8 x 10 Gbit/s DWDM System", *Optics & Laser Tech.*, vol. 32, pp. 23-31, February 2000.
- [4] Y. J. Rao, D. J. Webb, "High-resolution Wavelength-division-multiplex in Fiber Bragg Grating Sensor System", *Elect. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp.924-926, 1996.
- [5] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano *et al.*, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers", *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, March 1996.
- [6] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan *et al.*, "Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 1, 58-65, January 1996.
- [7] V. Bhatia, and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors", *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 9, 692-694, May 1996.
- [8] R. Falciai, A. G. Mignani, A. Vannini, "Long period gratings as solution concentration sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 74, 74-77, 2001.
- [9] D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, and S. C. Mettler, "Very-high-temperature stable CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings", *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 9, 740-742, April 1999.
- [10] P. Palai, M. N. Satyanarayan, M. Das, K. Thyagarajan, B. P. Pal, "Characterization and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge", *Opt. Communications*, vol. 193, 181-185, June 2001.
- [11] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov, and V. Sulimov, "High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced Using an Electric Arc", *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 10, 1574-1579, October 2001.
- [12] J. L. Fabris, R. E. de Góes, R. Falate, and M. Müller, "Sistema Integrado para Caracterização Ótica de Materiais", *Rev. Fis. Aplic. e Instr.*, vol. 14, no. 2, 38-44, June 1999.
- [13] I. K. Hwang, S. H. Yun, E. Gentsch, and B. Y. Kim, "Profile-controlled long-period fiber gratings based on period microbends", in *Optical Fiber Communication Conference, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OFC/IOOC '99*, Technical Digest, vol. 4, 177-179, 1999.
- [14] P. Tipler, "Luz", em *Física para cientistas e engenheiros*, vol. IV, Eds. Guanabara Koogan S.A.: Rio de Janeiro, 1991, pp. 41.
- [15] H. J. Patrick, A. D. Kersey, and F. Bucholtz, "Analyses of the Response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction", *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 9, 1606-1612, September 1998.