

Influência da Microestrutura em Propriedades Acusto-ópticas de Fibra de Cristal Fotônico

Ricardo E. Silva, Roberson A. Oliveira, Marcos A. R. Franco, Alexandre A. P. Pohl

Resumo— Esse trabalho apresenta considerações sobre a influência da dimensão dos furos de uma fibra de cristal fotônico em suas características acusto-ópticas. Para propósito de simulação através do método dos elementos finitos, foram modeladas onze amostras de fibra com base em um modelo de fibra óptica comercial, variando o diâmetro dos furos de 0,3 a 1,3 μm . É verificado que um acréscimo na dimensão dos furos da fibra, produz um aumento na velocidade acústica de fase e uma redução no comprimento de onda acústico de operação, reduzindo as perdas de confinamento do modo fundamental.

Palavras-Chave—fibra de cristal fotônico, dimensão dos furos, acusto-óptica.

Abstract— This work presents considerations about the influence of the hole sizes of a photonic crystal fiber in its acousto-optics characteristics. For simulation purposes using the finite element method, eleven fiber samples were modeled based on a commercial fiber optic varying the holes diameter from 0,3 to 1,3 μm . It is found that an increase in the fiber hole sizes, produces an increase in the acoustic phase velocity and a reduction in the operation acoustic wavelength, reducing the confinement losses of the fundamental mode.

Keywords—photonic crystal fiber, hole size, acousto-optic

I. INTRODUÇÃO

Fibras de Cristal Fotônico (Photonic Crystal Fiber, PCF) são fibras ópticas que apresentam em sua seção transversal uma microestrutura periódica de furos preenchidos com ar. Em fibras PCF, de núcleo sólido, o confinamento da luz é explicado pelo mecanismo de reflexão interna total modificada. Suas propriedades geométricas podem ser variadas, revelando assim novas características de guiamento [1].

A aplicação de uma onda acústica em PCFs permite alterar suas propriedades ópticas. Tal mecanismo tem sido usado na modulação de redes de Bragg [2, 3], em lasers em fibra [4] e moduladores [5]. Um exemplo da aplicação do efeito acusto-óptico pode ser visualizado na Figura 1, no qual uma onda acústica com determinada frequência, produzida por um transdutor piezoelétrico, é acoplada na PCF através de uma corneta acústica. Se um modo de vibração flexural é excitado na fibra, um campo de deformação caracterizado por curvaturas periódicas é criado, afetando tanto os parâmetros geométricos da PCF como o índice de refração da sílica. Considerando que a luz na entrada da PCF esteja no modo 1 (HE_{11}), a onda acústica será responsável pelo acoplamento de uma parte dessa energia para o modo óptico 2 (HE_{21}), após determinado comprimento de interação.

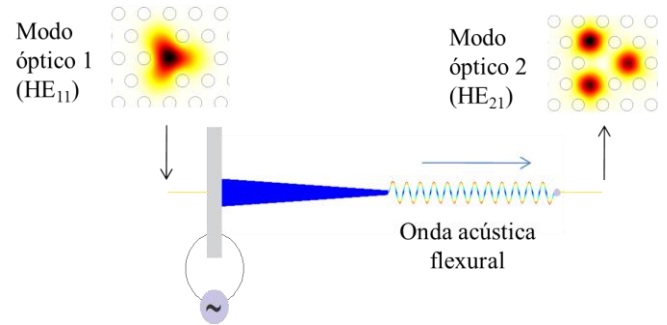


Fig. 1. Exemplo de um modulador acusto-óptico. A excitação acústica flexural provoca o acoplamento de energia entre dois modos ópticos espaciais.

A distância necessária para o modo óptico 1 acumular um deslocamento de fase de 2π , em relação ao modo óptico 2, é designada como comprimento de batimento intermodal $L_b(\lambda)$. O acoplamento completo, ou conversão entre os modos, no comprimento de onda óptico λ pode ser alcançado se a condição de casamento de fase for satisfeita [6]

$$L_b(\lambda) = \frac{\lambda}{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)} = \lambda_a(f) \quad (1)$$

onde $\lambda_a(f)$ é o comprimento de onda acústica, dependente da frequência f , e $n_1(\lambda)$ e $n_2(\lambda)$ são os índices efetivos dos modos ópticos 1 e 2, respectivamente. Conhecendo-se os valores dos índices efetivos de dois modos de uma PCF, é possível determinar o comprimento de onda acústico necessário para que o acoplamento intermodal ocorra.

A influência da dimensão dos furos da PCF na velocidade de fase da onda acústica flexural pode ser estimada por [7]

$$\frac{v}{v_t} = \alpha \left(\frac{\pi v_{ext}}{v_t} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{fa}{v_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde v é a velocidade de fase, v_t é a velocidade transversal, v_{ext} é a velocidade extensional, a é o raio da fibra e f é a frequência acústica. O parâmetro α depende da geometria da fibra e pode ser estimado através da relação entre a área homogênea e área efetiva da PCF, correspondendo a $\alpha = 1$ para uma fibra óptica convencional. Da mesma forma, a dimensão dos furos também afeta fortemente as perdas de confinamento dos modos guiados no núcleo [8, 9]. Este trabalho descreve a influência da dimensão dos furos da PCF nas suas propriedades acusto-ópticas.

Ricardo E. da Silva, Roberson A. de Oliveira e Alexandre A. P. Pohl, Laboratório Avançado de Telecomunicações – LATE, CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Marcos A. R. Franco, Instituto de Estudos Avançados – IEAv e Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, Brasil.

II. METODOLOGIA

Para o cálculo dos índices efetivos e simulação dos modos eletromagnéticos da PCF foi utilizado o aplicativo COMSOL Multiphysics®, baseado no método dos elementos finitos (MEF). O MEF permite a discretização do problema em subdomínios (elementos), simplificando o modelo matemático que descreve os campos, através da resolução de equações matriciais. Sua eficiência e precisão na modelagem de fibras de cristal fotônico têm sido testadas e demonstradas em várias aplicações [10, 11].

Para as simulações foi utilizada uma PCF, cuja microestrutura possui um núcleo triangular de 2,1 µm de diâmetro envolto por 12 anéis de furos com ar, em uma matriz de sílica pura de 128 µm de diâmetro. Os parâmetros geométricos foram estimados com base na imagem de microscopia eletrônica, fornecida no catálogo do fabricante [12], considerando os furos como circulares. A PCF em questão foi modelada utilizando o sub-módulo de ondas híbridas perpendiculares do módulo de RF do aplicativo, que permite a simulação dos modos eletromagnéticos da fibra considerando apenas sua seção transversal no plano xy. A Figura 2a mostra a imagem de microscopia eletrônica da PCF, enquanto que a Figura 2b mostra o modelo utilizado nas simulações.

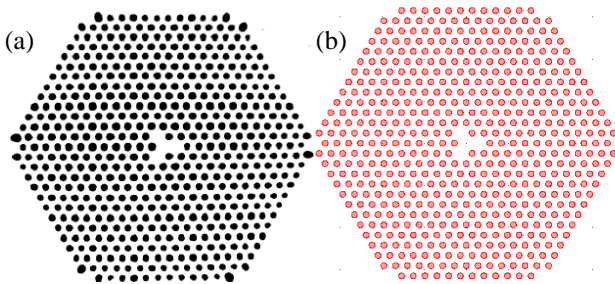


Fig. 2. (a) Imagem de microscopia eletrônica e (b) modelo estimado no COMSOL da fibra NL1550.

Para verificar a influência da dimensão dos furos de ar nas características acusto-ópticas da fibra, foram utilizados 11 modelos modificados da PCF comercial, no qual se variou o diâmetro dos furos de 0,3 a 1,3 µm em passos de 0,1 µm. A distância entre os furos, $\Lambda = 1,4 \mu\text{m}$, foi considerada constante durante as simulações.

A configuração dos subdomínios de todas as amostras foi obtida atribuindo parâmetros materiais para a matriz de sílica e furos de ar. O índice de refração do ar é considerado igual a unidade e o da sílica igual a 1,44428, calculado através da equação de Sellmeier, cujos coeficientes foram extraídos de [13], considerando $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Para a configuração da malha de elementos finitos, foram utilizados elementos triangulares distribuídos em uma malha aproximadamente uniforme como mostra o detalhe na Figura 3a, com um tamanho máximo de elemento de $1 \times 10^{-7} \mu\text{m}$ para todas as amostras.

Com intuito de evitar a reflexão dos campos eletromagnéticos na fronteira da janela computacional, utilizou-se uma camada absorvedora fictícia ilustrada como a borda da Figura 3b. A camada perfeitamente casada (*perfectly*

matched layer – PML) permite truncar o domínio computacional e calcular a constante de propagação com sua parte imaginária, a qual possibilita estimar perdas de confinamento dos modos na fibra [9]. As condições de contorno e parâmetros da PML foram configuradas conforme [11].

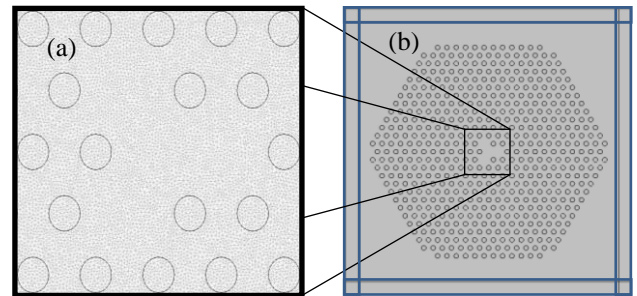


Fig. 3. (a) Detalhe da malha de elementos finitos no núcleo da PCF com diâmetro de furo de 0,7 µm e (b) PML.

A simulação foi realizada para um comprimento de onda óptico de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ utilizando um computador com processador Intel® Core i7 2,67 GHz e 6 GB de memória RAM. Verificou-se, através das simulações, que a PCF em estudo possui uma grande quantidade de modos de casca e seis modos confinados no núcleo, sendo quatro destes pertencentes ao grupo de modos duplamente degenerados. A Figura 4 mostra a intensidade de campo na seção transversal de alguns modos suportados para o modelo com diâmetro de furo de 0,7 µm. Nas Figuras 4a e 4b são ilustrados os modos fundamental e de ordem superior, que correspondem aos modos HE_{11} e HE_{21} [14], respectivamente. Dois modos de casca são ilustrados nas Figuras 4c e 4d. Para o cálculo dos parâmetros acusto-ópticos, foram considerados apenas os 6 primeiros dígitos significativos dos índices efetivos dos modos fundamental (n_1) e de ordem superior (n_2), calculados com uma tolerância de 10^{-12} .

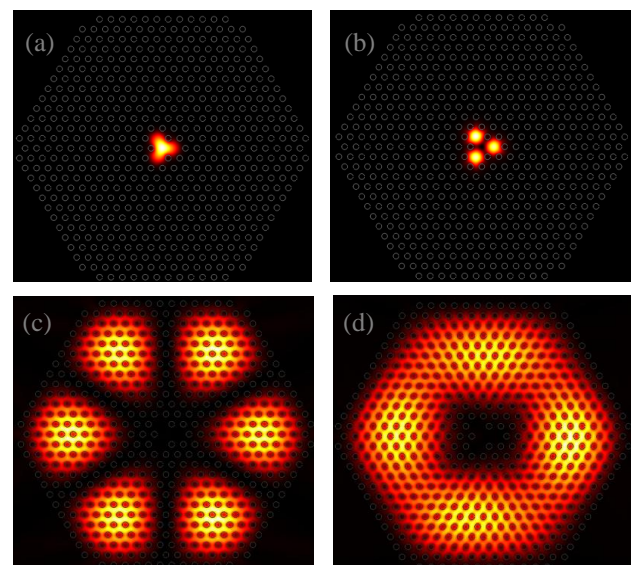


Fig. 4. Simulação dos modos (a) fundamental (HE_{11}) e (b) superior (HE_{21}) guiados no núcleo da fibra. (c) e (d) representam modos de casca.

I. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação da dimensão dos furos da PCF apresenta um efeito imediato nas perdas de confinamento dos modos ópticos no núcleo da fibra. A Figura 5 mostra a distribuição transversal da média temporal do fluxo de potência do modo fundamental, na direção de propagação (eixo z) para as amostras analisadas [11]. Observa-se que um aumento no diâmetro dos furos resulta em maior confinamento do modo no núcleo.

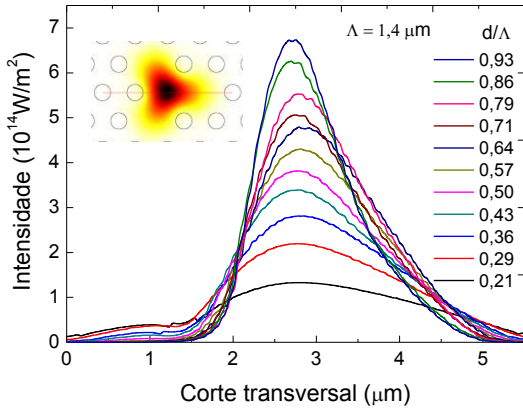


Fig. 5. Corte transversal da distribuição de intensidade no núcleo da PCF (figura esquerda superior) para as amostras analisadas.

A influência da dimensão dos furos da PCF na distribuição transversal do fluxo de potência do modo fundamental, é observada na Figura 6. A perda por confinamento para o modo na Figura 6a é 11,4 dB/m e na Figura 6b é $4,5 \times 10^{-13}$ dB/m, que correspondem a $d/\Lambda = 0,21$ e $0,93$, respectivamente. Em uma PCF de núcleo sólido, a luz é confinada no núcleo devido ao padrão de furos de ar que formam a casca, sendo o material do núcleo geralmente o mesmo da matriz. Uma redução da relação d/Λ , como ilustrado na Figura 6a, faz com que a luz escape do núcleo entre os furos de ar, resultando em fuga de potência para a casca, aumentando a perda de confinamento. Por outro lado, a redução das perdas de confinamento pode ser obtida com um aumento da relação d/Λ , como ilustrado na Figura 6b.

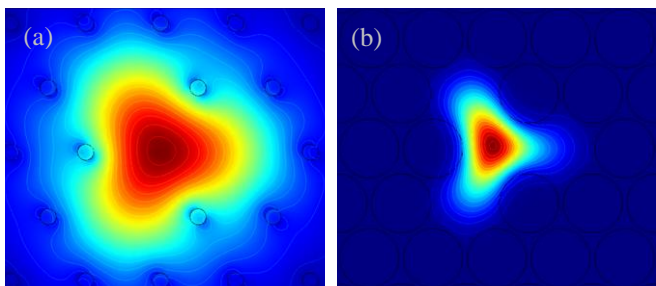


Fig. 6. Perdas de confinamento do modo fundamental no núcleo da PCF com (a) $d/\Lambda = 0,21$ e (b) $d/\Lambda = 0,93$.

O efeito da variação da dimensão dos furos na velocidade de fase da onda acústica flexural na PCF, em comparação com uma fibra monomodo convencional (*single mode fiber* - SMF),

pode ser estimado por meio da equação (2) e visualizado na Figura 7. Tal variação provoca a alteração do parâmetro α da PCF, acarretando mudança na velocidade de fase da onda acústica. Na simulação foram considerados $f = 90$ kHz, $v_i = 3753$ m/s e $v_{ext} = 5740$ m/s. Observa-se que um aumento do diâmetro dos furos produz um acréscimo não linear na velocidade de onda acústica na PCF, ocasionado principalmente pela redução na densidade do material. Em comparação com a fibra convencional, esse acréscimo é visível mesmo para um diâmetro de furo pequeno ($d/\Lambda = 0,21$) atingindo um valor máximo de aproximadamente 5% para a situação, onde $d/\Lambda = 0,93$.

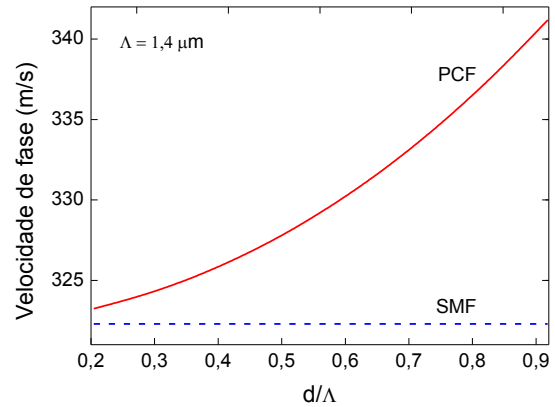


Fig. 7. Comparação entre a velocidade de fase de uma onda acústica flexural na PCF e em uma fibra SMF de mesmo diâmetro de casca.

A mudança na dimensão dos furos afeta os índices efetivos dos modos eletromagnéticos que se propagam na PCF. A Figura 8 mostra o decaimento do valor dos índices efetivos dos modos fundamental (HE_{11}) e de ordem superior (HE_{21}) em função do aumento do diâmetro dos furos. O comprimento de batimento L_b , que está relacionado com a diferença entre os índices dos modos através de (1), apresenta um comportamento não linear para a faixa abaixo de $d/\Lambda = 0,5$ e aproximadamente linear acima desse valor.

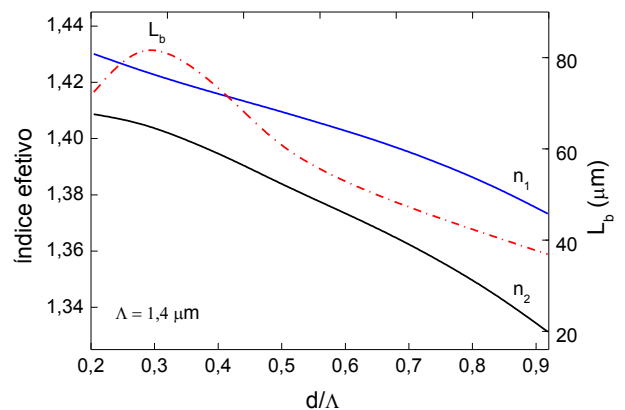


Fig. 8. Variação dos índices efetivos dos modos fundamental (n_1) e de ordem superior (n_2) e comprimento de batimento L_b em função do diâmetro dos furos da microestrutura da fibra.

Conforme (1) a variação nos índices afeta tanto o comprimento de batimento como o comprimento de onda acústico necessário para que a transferência de energia completa entre os modos ocorra. Os valores de comprimento de onda acústico máximo de 83,7 μm e mínimo de 36,9 μm são obtidos para $d/\Lambda = 0,21$ e 0,93, respectivamente. Pode-se também verificar, na Figura 8, a relação entre o decaimento dos índices efetivos dos modos com as propriedades materiais que constituem a fibra. Uma redução da dimensão dos furos resulta em uma maior concentração de sílica na região da casca, fazendo com que os índices efetivos dos modos da PCF tendam para o índice de refração do material em 1,44428.

II. CONCLUSÃO

Esse artigo reporta a influência da dimensão dos furos de uma fibra de cristal fotônico em suas propriedades acusto-ópticas. Para tanto, foram modeladas onze amostras de PCF com base em um modelo de fibra comercial, variando-se o diâmetro dos furos de 0,3 a 1,3 μm . O acréscimo no diâmetro dos furos reduz a densidade efetiva da PCF, provocando um aumento na velocidade de propagação da onda acústica no meio, o que pode resultar no aumento da velocidade de sintonização, dando origem a dispositivos mais rápidos. Contudo, a faixa de frequência de operação também deve ser considerada para que o efeito da microestrutura da PCF na velocidade acústica seja evidente [7]. Dos resultados computacionais obtidos através do método dos elementos finitos, maiores dimensões de furos reduzem as perdas de confinamento do modo fundamental no núcleo da fibra, ao mesmo tempo em que requerem menores comprimentos de batimento para que o acoplamento entre os modos ópticos ocorra. O aumento na precisão do cálculo dos índices efetivos e simulações pode ser obtido através da otimização e refinamento da malha de elementos finitos no núcleo da fibra, o que pode afetar os recursos computacionais e tempo de processamento.

AGRADECIMENTOS

Ricardo E. Silva e Roberson A. Oliveira agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior – CAPES pelas bolsas de estudo e pelo suporte financeiro no projeto: Projeto e Aplicação de Fibras Ópticas Microestruturadas como Material Estratégico para Sensores Avançados e Telecomunicações.

REFERENCES

- [1] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Optics Letters*, v. 21 (19), pp. 1547 - 1549, 1996.
- [2] A. P. Pohl, K. Cook, J. Canning, "Acoustic-induced modulation of photonic crystal fiber Bragg gratings," *Proc. 10th Anniversary Int. Conf. Transparent Opt. Netw.* pp. 51-54, 2008.
- [3] R.A. Oliveira, "Modulação acusto-óptica de Redes de Bragg em Fibra de Cristal Fotônico," *Exame de qualificação*, UTFPR, 2009.
- [4] W. Z. Zhuang, W. C. Huang, Y. P. Huang, K. W. Su, Y. F. Chen, "Passively Q-switched photonic crystal fiber laser and intracavity optical parametric oscillator," *Opt. Express*, v. 18, pp. 8969-8975, 2010.
- [5] R. A. Oliveira, P. T. Neves Jr., J. T. Pereira, A. A. P. Pohl, "Analysis of Mechanical Properties of a Photonic Crystal Fiber Bragg Grating Acousto-Optic Modulator," *Proc. of the WSOE 2008*, paper number 53.1, 2008.
- [6] Diez, T. A. Birks, W. H. Reeves, B. J. Mangan, P. St. J. Russell, "Excitation of cladding modes in photonic crystal fibers by flexural acoustic waves," *Opt. Lett.*, v. 25, pp.1499-1501, 2000.
- [7] M. W. Haakestad, H. E. Engan, "Acoustooptic Properties of a Weakly Multimode Solid Core Photonic Crystal Fiber," *J. Lightwave Technol.*, v. 24, pp. 838, 2006.
- [8] T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, L. C. Botten, M. J. Steel, "Confinement losses in microstructured optical fibers," *Opt. Lett.*, v. 26, pp. 1660-1662, 2001.
- [9] K. Saitoh; M. Koshiba; "Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers," *IEEE Phot. Tech. Lett.*, v. 15, pp.236-238, 2003.
- [10] G. Chesini, V.A. Serrão, M.A.R. Franco, C.M. B. Cordeiro, "Analysis and optimization of an all-fiber device based on photonic crystal fiber with integrated electrodes," *Opt. Express.*, v.18, pp. 2842-2848, 2010.
- [11] E. C. F Barretto, "Análise e projeto de fibras de cristal fotônico pelo método dos elementos finitos," *Dissertação de mestrado*, ITA, 2006.
- [12] NKT Photonics. Disponível em: <http://www.koheras.com/files/files/NL-1550-POS-1-100409.pdf>, acessado em 01/03/2011.
- [13] K. Okamoto, "Fundamentals of optical waveguides," *A. Press*; 2 ed., 2006.
- [14] T. P. White, B. T. Kuhlmeier, R. C. McPhedran, D. Maystre, G. Renversez, C. Martijn de Sterke, L. C. Botten, "Multipole method for microstructured optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, v. 19, pp. 2322-2330, 2002.