

Simulação e produção de estruturas bicônicas em fibras ópticas pelo processo de fusão e puxamento

(Simulation and production of biconical structures in optical fiber by the process of fusion and pulling)

C. P. Guerra; S. Celaschi

Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer CTI
Rod. D. Pedro I, Km 143,6 – CEP: 13069-901 , Campinas SP
Email: christianoguerra@hotmail.com

Resumo

Dispositivos contendo fibra óptica afinada em estrutura bicônica são produzidos através do aquecimento e puxamento dessas fibras. Com o objetivo de verificar as variáveis de influência no processo de fabricação dos dispositivos, optou-se por um processo realizado em duas etapas, cada uma delas com parâmetros experimentais específicos. O modelamento da evolução do perfil do 'taper' durante o puxamento da fibra óptica valeu-se de um conjunto de ferramentas da área de Mecânica dos Fluidos, levando em conta o perfil térmico de viscosidade da fibra aquecida, as velocidades dos motores de passo, o tempo total do processo, e a temperatura de transição vítrea T_g do SiO_2 . Os resultados da simulação aumentam, mediante parametrizações do processo, a previsibilidade do formato do perfil em estruturas bicônicas para as mais variadas aplicações desses dispositivos.

Palavras chave: Fibras ópticas, Sílica vítrea, Estruturas com perfil bicônico

Abstract

Devices built with tapered optical fiber in biconical structure are produced by heating and pulling these fibers. In order to verify the variables of influence in the manufacturing process of the devices, a process was carried out in two manufacturing stages, with specific experimental parameter for each steps. The modeling of the evolution of the taper profile during the pulling of the optical fiber is based on a set of tools of the Fluid Mechanics area, taking into account the thermal viscosity profile of the heated fiber, the speeds of the step motors, the total process time and the glass transition temperature T_g of the SiO_2 . The simulation results will increase, through process parametrizations, the predictibility of the profile shape in biconical structures, for the most varied applications of these devices.

Keywords: Optical fiber, Silica glass, biconical shape structure

INTRODUÇÃO

Muitos tipos de dispositivos ópticos podem ser obtidos mediante puxamento e aquecimento de fibras ópticas. A simplicidade do processo de fabricação e a alta compactividade obtida para estes dispositivos contribuem para a sua aplicação em diversas áreas. Devido a sua alta seletividade em comprimentos de onda e alta razão de extinção, tais filtros podem ser utilizados em sistemas de comunicações ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [1]. Esses filtros também podem ser utilizados como sensores químicos e físicos dado que parte do campo é evanescente [2]. Podem ser usados como sensores acústicos e de campos magnéticos devido à alta sensibilidade com as curvaturas da fibra [3].

O perfil de diâmetros da fibra óptica, após a etapa de aquecimento e puxamento, tem que ser adiabático. Os dispositivos fabricados a partir de estruturas bicônicas em fibras ópticas especiais, também denominados “*tapers*”, podem ser definidos como adiabáticos, se o ângulo de inclinação for pequeno o suficiente, para assegurar que as perdas sejam pequenas no modo fundamental propagante no dispositivo. Os perfis não adiabáticos produzem guias de onda com perdas [4]. Com o uso de fibras ópticas com depressão no perfil de índices de refração (Tipo W) e com o controle da geometria obtida, é possível se favorecer a formação de somente dois supermodos que se propagam no interior da região afunilada [4,8,9]. O perfil do *taper* formado tem de ser gradual, suficientemente suave, para se assegurar que o guia de onda óptico formado tenha poucas perdas.

Foram feitos alguns modelos para a alongação das fibras supondo-se condições idealizadas, tendo sido também desenvolvidos sistemas de fabricação de estruturas bicônicas, realizadas a partir de fibras ópticas, capazes de reproduzir os modelos propostos [5,6]. Neste trabalho foi avaliada também a influência dos parâmetros de aquecimento e puxamento na formação das estruturas da fibra óptica afunilada. O processo proposto vale-se de duas etapas, com diferentes parâmetros, onde foram variadas as velocidades de puxamento da fibra pelos motores de passo e a temperatura do forno. Estes parâmetros foram usados para a simulação numérica do processo de puxamento e aquecimento.

O modelamento teórico utilizado envolve o formalismo de mecânica dos fluidos baseado na resolução de equações diferenciais parciais acopladas, relativos à conservação de massa e de momento. Esse modelo foi usado para se estimar os perfis bicônicos obtidos em função dos parâmetros de processo. O modelo foi então comparado com o resultado experimental obtido das medidas dimensionais das estruturas formadas. Na simulação, alguns parâmetros foram modificados, com o objetivo de aproximar o resultado experimental do teórico para cada uma

das amostras. Dentre todos os parâmetros de processo, aqueles relacionados à distribuição de temperatura do forno são os que têm maior incerteza nas medições.

MODELAMENTO

O perfil bicônico produzido em um comprimento de fibra óptica, depende da fonte térmica e da sua distribuição de temperatura. Este perfil depende, também, da taxa de alongação da fibra durante o processo de aquecimento e puxamento. A calibração experimental das propriedades do forno permite a predição numérica precisa do perfil do taper formado. Isto facilita o projeto dos procedimentos para puxamento de fibras ópticas, a serem utilizadas nas mais diversas áreas de aplicação, onde são requeridos o controle acurado do perfil das estruturas afuniladas.

Seja uma fibra óptica com área de seção transversal $A(z,t)$ dependente do tempo e da posição. Seja também $v(z,t)$ a velocidade axial na posição z em relação ao centro do forno e no tempo t . Essa velocidade axial é a soma das velocidades dos motores, para as regiões em ambos os lados (metades) da seção do forno mostrados na figura 1 (a). Assim, o comprimento deformado em ambos os lados do forno é dado por $L_{\pm} = v_{\pm} \cdot t = \hat{Z}_{\pm} - Z_{\pm}$ representado na área central da Figura 1(b).

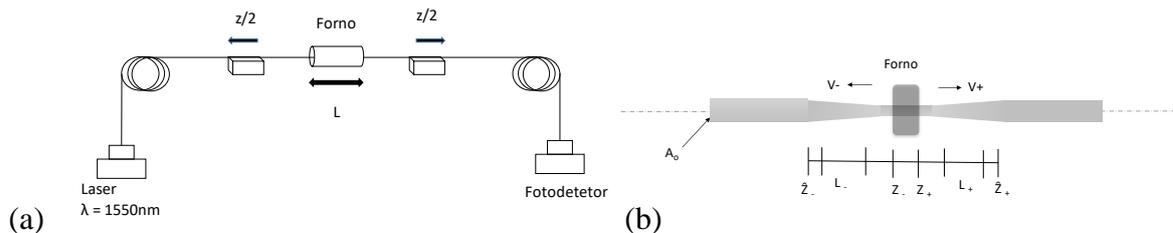


Figura 1. (a)- Diagrama esquemático do sistema de puxamento e aquecimento e (b)- condições de contorno durante o procedimento de puxamento

A evolução do perfil da estrutura afunilada durante o puxamento com diferentes alongamentos foi numericamente modelado mediante solução de duas equações diferenciais parciais acopladas, que relacionam a área da seção transversal normalizada $A_n(z,t)$ e $v(z,t)$ da fibra deformada. Isto porque estas equações estabelecem relações entre as taxas de variação ou fluxos destas quantidades.

A equação de continuidade (A) descreve a conservação de massa e a equação (B) descreve a conservação de momento axial. A equação (B) é uma aproximação da solução da equação de Navier-Stockes para um fluido Newtoniano incompressível no limite do fluxo de Stockes, desprezando forças como a da gravidade, quando comparada com as forças viscosas.

$$\frac{\partial}{\partial t} A_n(z, t) + \frac{\partial}{\partial z} (A_n(z, t)v(z, t)) = 0 \quad (\text{A})$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta(z) A_n(z, t) \frac{\partial}{\partial z} v(z, t) \right) = 0 \quad (\text{B})$$

Onde $\eta(z)$ é a viscosidade axial do material da fibra.

Para se obter o perfil radial $r(z)$ da região afunilada para um determinado comprimento de puxamento L , é preciso resolver o sistema de equações, acima. Estas equações acopladas foram numericamente resolvidas considerando-se a dependência de temperatura da viscosidade $\eta(z)$, a temperatura de transição vítrea do SiO_2 e o ajuste da função (“*bell-shape*”) do perfil de temperatura axial do forno de grafite. Como a fibra óptica é muito fina ($\phi_o = 125\mu\text{m}$), e também, pela baixa condutividade térmica desta em comparação com a superfície em torno do forno, a temperatura ao longo da fibra e a sua viscosidade são funções da sua posição em relação ao forno [7].

A viscosidade da fibra nua de SiO_2 (ou sua fluidez – inverso da viscosidade) possui uma forte dependência com a temperatura, podendo ser modelada para cada faixa de temperatura [10]. O perfil de temperatura do forno será modelado para um perfil geométrico em forma de sino (“*bell-shape*”).

$$T(z, t) = T_o + \frac{T_h(t) - T_o}{1 + \left(\frac{|z|}{z_o}\right)^{2b}} \quad (\text{C})$$

Onde T_o é a temperatura na extremidade externa do forno, z_o é o comprimento do elemento de grafite, $T_h(t)$ é a temperatura mais alta na região central do forno. A dependência temporal da temperatura do forno na equação (C), é devida à alteração de temperatura entre as etapas de processo.

O perfil teórico do taper pode ser determinado pelo perfil de temperatura do elemento de aquecimento $T(z)$, pela velocidade de puxamento v_o , tempo total do processo t_T e a alongação do afunilamento da fibra óptica L . Para a temperatura de transição vítrea da sílica, foi utilizado o valor de $T_g = 1150 \text{ °C}$ [11,12]. No programa de simulação numérica foram implementadas as duas etapas do processo de puxamento e aquecimento, com a variação de parâmetros de processo para cada uma das etapas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Sistema de aquecimento e puxamento

O sistema de aquecimento e puxamento, usado neste trabalho é composto, basicamente, de um forno de grafite para aquecimento da fibra óptica e de dois motores de passo para tracionar a fibra durante o puxamento, conforme mostrado na Figura 2. Aproveitando essa característica do equipamento, planejou-se uma forma de se verificar a influência dos parâmetros de processo no perfil resultante da estrutura afunilada, utilizando-se as duas etapas de aquecimento e puxamento, parametrizáveis de forma independente quanto à temperatura e velocidades de puxamento, como pode ser observado na Tabela I. Este procedimento teve como objetivo melhorar a Função de Transferência dos filtros obtidos até então, com dispositivos mais adiabáticos [4].

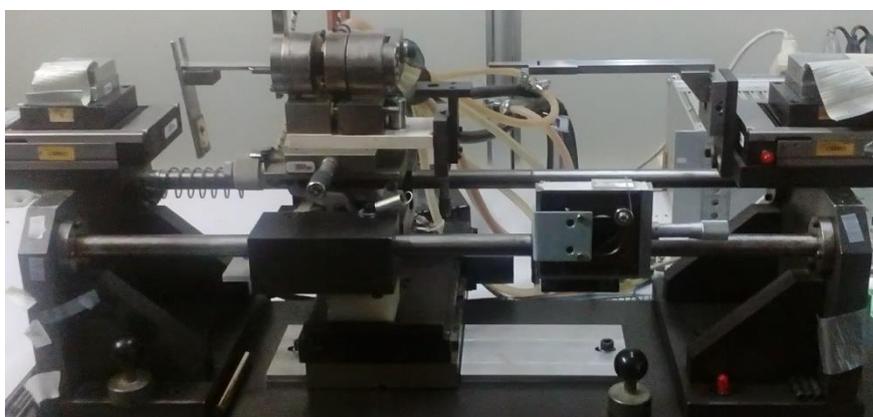


Figura 2. Máquina de fabricação de acopladores pelo processo de aquecimento e puxamento da empresa OptoLink Ltda.

Durante o processo de puxamento e aquecimento, registra-se o espectro de luz branca no equipamento OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) utilizado para o acompanhamento do processo. Este acompanhamento pode ser feito também com um fotodetector para medir a variação de intensidade da luz durante o processo. Existe uma relação entre o número de oscilações e a faixa livre espectral (FSR) do dispositivo [8,9]. O FSR é definido como sendo a periodicidade do espectro de transmissão do filtro.

O forno de grafite utilizado neste sistema é composto de um elemento de grafite de 28 mm de comprimento e de uma carcaça externa de aço inoxidável de 80 mm, como pode ser visto na Figura 3(a). A carcaça do forno é resfriada por um fluxo de água. Dentro do forno há um fluxo contínuo de argônio durante o processo de aquecimento para evitar a oxidação do grafite com a alta temperatura. O perfil de temperatura do forno de grafite foi medido

axialmente e no centro do elemento de grafite no forno com um termopar, como pode ser visto na Figura 3(b).

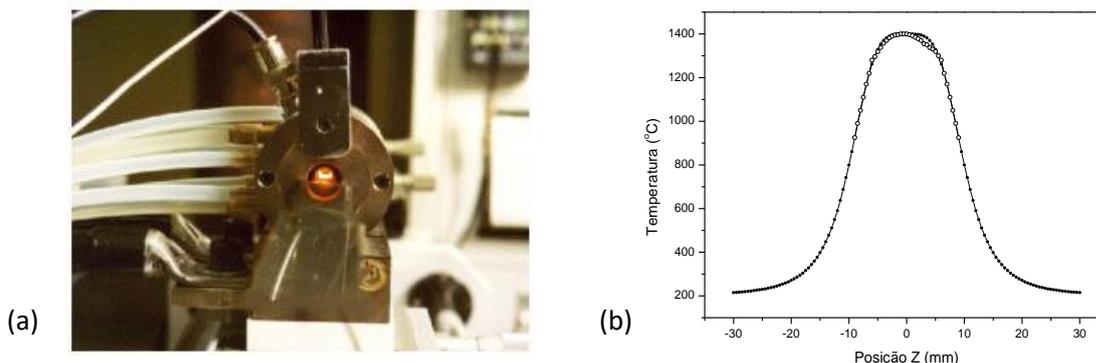


Figura 3. (a)- Fotografia do forno de grafite, (b)- Perfil de temperatura medida axialmente no forno de grafite (círculos abertos) sobreposto ao perfil modelado (círculos fechados) pela equação (E).

Planejamento experimental

Para as duas etapas do processo de fabricação, foram definidas a temperatura, a velocidade de cada um dos motores de passo e o tempo, para cada uma das etapas; com a temperatura do forno variando entre 1500 e 1750 °C, e as velocidades de puxamento variando entre 20,4 $\mu\text{m/s}$ e 30,6 $\mu\text{m/s}$. Este experimento teve como objetivo verificar a influência das variáveis de processo nos perfis de diâmetro obtidos. O diâmetro mínimo no centro da estrutura ϕ_w , a extensão do alongamento L, e a inclinação da região afunilada $d\phi/dz$, são os parâmetros a serem analisados nos perfis dos *tapers*.

Com o objetivo de aumentar a extensão da zona quente do forno de grafite, colocou-se um motor de passo na montagem, como mostrado na Figura 2. Este sistema permitiu a excursão do forno com uma extensão de 10 mm e com velocidade de 10 mm/s. Este procedimento foi utilizado na amostra 1B, para a qual os parâmetros de processo estão mostrados na Tabela I. No primeiro estágio foi utilizada base de translação movimentando o forno e no segundo estágio foi utilizado o forno estacionário. A vibração causada pelo motor ocasionou a vibração da fibra tensionada, causando o rompimento da fibra durante o processo de puxamento em algumas amostras.

Dentre os parâmetros experimentais mostrados na Tabela I, a temperatura é o que apresenta maior incerteza pois a sua medida é feita de forma indireta. A temperatura do forno de grafite especificada no processo é estimada pela medida da corrente de alimentação do elemento de grafite. Apesar de ter sido feita a calibração do forno, a acuidade da medida de temperatura é comprometida com a degradação do elemento de grafite após poucas horas de uso.

Tabela I. Parâmetros de processo do lote de filtros com duas etapas de puxamento-aquecimento.

Amostra	T_{E1} (°C)	V_{E1} (µm/s)	t_1 (s)	T_{E2} (°C)	V_{E2} (µm/s)	t_2 (s)
1 A	1500	20,4	245	1700	27,2	184
2 A	1600	27,2	147	1500	20,4	490
3 A	1600	27,2	147	1500	23,8	462
4 A	1750	27,2	147	1500	20,4	539
5 A	1750	30,6	98	1500	20,4	686
6 A	1500	30,6	163	1600	20,4	377
1B	1650	30,6	131	1500	27,2	320

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram medidos os perfis de diâmetro de cada uma das estruturas produzidas de acordo com os parâmetros de processo mostrados na tabela I. Estas medidas, mostradas na Figura 4(a), foram feitas com o uso de microscópio óptico, a cada milímetro da extensão da estrutura bicônica. É possível observar a variação do diâmetro mínimo na região central da estrutura em relação ao comprimento dos *tapers*. Pode-se observar também, que a variação de parâmetros de processo não alterou significativamente o grau de afunilamento dos perfis geométricos obtidos.

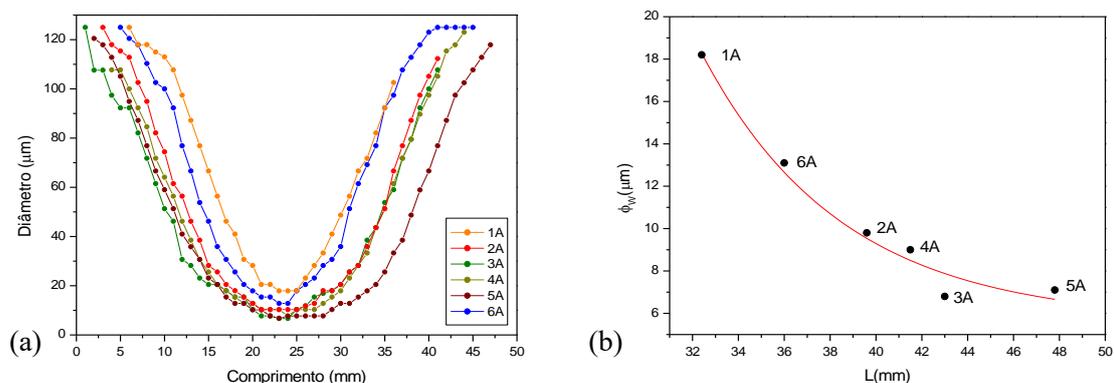


Figura 4. (a)- Medida de perfil de diâmetro em relação ao comprimento dos filtros com duas etapas de puxamento e aquecimento e com forno estacionário, de acordo com os parâmetros de processo mostrados na tabela I, (b)- Curva do diâmetro mínimo ϕ_w em relação ao comprimento L dos *Tapers*.

O valor da inclinação do *taper* ou valor da derivada dp/dz , foi modificada durante o processo de fabricação, com o uso do motor de passo acoplado ao forno no primeiro estágio. Na Figura 5(a) compara-se o perfil de uma das estruturas com forno estacionário (amostra 5A) contra outra, obtida com o forno se movimentando no primeiro estágio (amostra 1B). Observa-se que a utilização do forno dinâmico no primeiro estágio, permitiu a mudança de inclinação do perfil, para os dois lados da estrutura bicônica.

Utilizando os dados de perfis de diâmetro medidos das estruturas bicônicas, mostrados na figura 5(a), fez-se um estudo com o objetivo de modelar as curvas obtidas. Foi utilizado um programa numérico para solucionar as equações diferenciais parciais acopladas, considerando as duas etapas utilizadas no processo de puxamento e aquecimento. Para esta simulação foram inseridos no programa os parâmetros de processo. O resultado dessa simulação numérica, de forma a melhor compatibilizá-la com os resultados experimentais, é mostrado na figura 5(b).

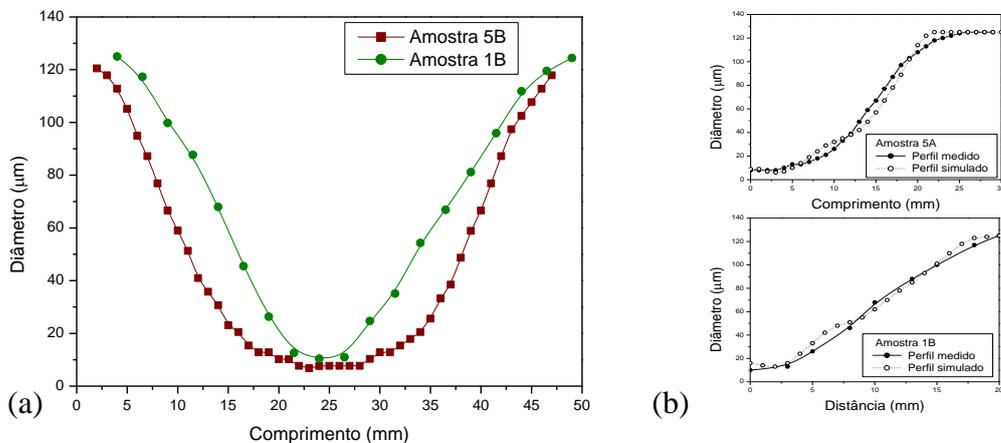


Figura 5. (a)- Perfil de diâmetro das amostras 5A e 1B, mostrando a diferença de inclinação dos perfis. (b)- Perfil medido e simulado da amostra 5A e 1B.

A tabela II mostra os resultados da simulação. Os parâmetros que foram alterados na simulação foram o perfil de temperatura do forno (parâmetros b e z_0) e as temperaturas efetivas do forno, denominadas temperaturas T_{ef1} e T_{ef2} para as duas etapas do processo respectivamente. Estes dados modificam a curva de temperatura do forno, equação (C). O parâmetro α representa a variação de velocidade dos motores entre as duas etapas ($\alpha = v_1/v_2$). O parâmetro β representa a variação de comprimento do forno, considerando que a colocação do motor de passo acoplado ao sistema de aquecimento muda o comprimento efetivo do forno.

Tabela II- Dados obtidos da simulação para as amostras mostradas na figura 6.

Amostra	α	β	Z_0 (mm)	b	T_{er1} (°C)	T_{er2} (°C)
5A	1,5	1,0	6,0	2,3	1700	1250
1B	1,13	1,35	5,25	1,9	1250	1250

Na figura 6 mostram-se as curvas $\rho^{-1} \cdot d\rho/dz$, onde ρ o raio da estrutura, em relação ao diâmetro das amostras 5A e 1B. Nestas curvas fica evidenciando a influência da colocação do motor de passo acoplado ao forno no primeiro estágio. O valor da derivada $d\rho/dz$ é um parâmetro importante para proporcionar o casamento de fase na região da estrutura afunilada. Este casamento de fase ocorre entre os diâmetros de 70 e 80 μm . O valor ideal de $\rho^{-1} \cdot d\rho/dz$, deverá ficar abaixo de $0,1 \text{ mm}^{-1}$, para assegurar o casamento de fase com poucas perdas para a fibra óptica utilizada [4,8,9].

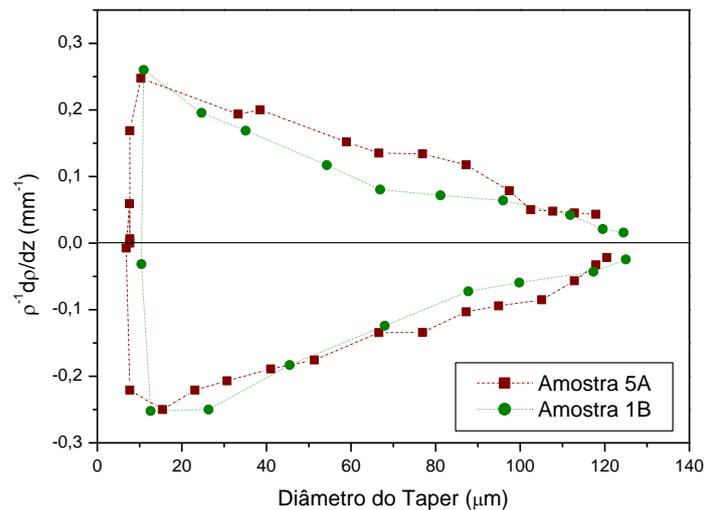


Figura 6. Curva da derivada do perfil dividido pelo raio *versus* o diâmetro do taper das amostras 5A e 1B.

CONCLUSÕES

O uso de dois estágios de puxamento e aquecimento possibilita a obtenção de dispositivos com diferentes perfis de diâmetros. Observou-se existir uma relação entre o diâmetro na região central e o comprimento do dispositivo. Todos os *tapers* fabricados com o forno estacionário apresentam a mesma inclinação da curva, independentemente dos parâmetros de processo

utilizados. A introdução do forno dinâmico no primeiro estágio do processo, permitiu se alterar a inclinação da curva de perfil de diâmetro. Esta inclinação é importante para satisfazer as condições de casamento de fase e permitir o acoplamento entre os modos, na região de diâmetro da fibra óptica entre 70 e 80 μm . Mostrou-se ser possível prever os perfis de diâmetro de acordo com os parâmetros de processo utilizados, mediante avaliação dos resultados do planejamento experimental e com o uso da simulação numérica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. F. M. Smolka da empresa Optolink Ltda. pelo apoio técnico. O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pela concessão de bolsa PCI. Processo: 300473/2018-4.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Abad et al., ‘Comparative Analysis of Wavelength-Multiplexed Photonic-Sensor Networks Using Fused Biconical WDMS’, IEEE Sensors Journal, 3, 4 (2003) 475.
- [2] Kieu K. Q., Mansuripuu M.: ‘Biconical Fiber Taper Sensors’ IEEE Photonics Technology Letters, 18, 21 (2006) 2239.
- [3] L. C. Bobb, P. M. Shankar, H. D. Krumboltz: Bending Effects in Biconically Tapered Single-Mode Fibers, Journal of Lightwave Technology, 8, 7 (1990)1084.
- [4] J. D. Love et al., Tapered single-mode fibres and devices Part 1 : Adiabaticity criteria, IEE Proceedings-J, 138, 5 (1991) .
- [5] R. P. Kenny, T. A. Birks, K. P. Oakley, Electronics Letters, 27, 18 (1991) 1654.
- [6] T. A. Birkis, Y. L. Li, Journal of Lightwave technology, 19, 4 (1992) 432.
- [7] H. L. Sorensen, E. S. Polzik and J. Appel, “Heater self-calibration technique for shape prediction of fiber tapers” Journal of Lightwave technology, 32, 10 (2014) 1886.
- [8] S. Celaschi, G.N. Malheiros-Silveira, “High-resolution and low-loss all-fiber spectral filters based on biconic tapers”, Journal of Lightwave Technology , v. 35, (2017) 5381.
- [9] S. Celaschi, G. N. Malheiros-Silveira, Proc. SPIE 10526, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVI, 2018.
- [10] R. H. Doremus, Journal of Applied Physics 92, (2002) 7619.
- [11] J. A. Bucaro and H. D. Dardy, Journal of Applied Physics, 45 (1974) 5324.
- [12] D. M. Krol, K. B. Lyons, S.A. Brawer and C. R. Kurkjian, Physical Review B, 6, 15 (1986) 4196.