



EDWIN GERMAN PINILLA PACHON

Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal

Campinas

2013



Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física “Gleb Wataghin”

EDWIN GERMAN PINILLA PACHON

Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Antonio Ruggieri Franco

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-graduação em Física
do Instituto de Física “Gleb Wataghin” da Universidade Estadual de Campinas
para a obtenção do título de Mestre em Física.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À REDAÇÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DEFENDIDA PELO ALUNO EDWIN GERMAN PINILLA PACHON E ORIENTADA PELO
PROF. DR. CRISTIANO MONTEIRO DE BARROS CORDEIRO.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2013

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
VALKÍRIA SUCCI VICENTE – CRB8/5398 - BIBLIOTECA DO IFGW
UNICAMP**

P655d Pinilla Pachon, Edwin German, 1981-
Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal / Edwin German Pinilla Pachon. -- Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro.
Co-orientador: Marcos Antonio Ruggieri Franco.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física “Gleb Wataghin”.

1. Interferência multimodal. 2. Método de propagação de feixe. 3. Estrutura monomodo-multimodo-monomodo. 4. Fibras ópticas. 5. Estruturas com fibra ótica. 6. Sensor de curvatura. 7. Sensor de índice de refração. 8. Sensor de temperatura. I. Cordeiro, Cristiano Monteiro de Barros, 1973- II. Franco, Marcos Antonio Ruggieri. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física “Gleb Wataghin”. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Devices with optical fibres based on multimode interference

Palavras-chave em inglês:

Multimode interference

Beam propagation method

Singlemode-multimode-singlemode structure

Optical fibers

Optic fiber structures

Curvature sensor

Index refraction sensor

Temperature sensor

Área de Concentração: Física

Titulação: Mestre em Física

Banca Examinadora:

Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro [Orientador]

Hugo Enrique Hernandez Figueroa

Luis Eduardo Evangelista de Araujo

Data da Defesa: 05-03-2013

Programa de Pós-Graduação em: Física



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
EDWIN GERMAN PINILLA PACHON – R.A. 108878 APRESENTADA E APROVADA
AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS, EM 05 / 03 / 2013.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro - Orientador do Candidato
DEQ/IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Luis Eduardo Evangelista de Araujo – DEQ/IFGW/UNICAMP

Agradecimentos

Aos professores Cristiano e Marcos pelas orientações. Também agradeço meus amigos pelo apoio durante o tempo de mestrado.

Finalmente, agradeço à FINEP, CAPES e ao Ministério da Defesa (Projeto Pró-Defesa) pelo apoio financeiro durante o tempo de mestrado.

Resumo

Nesta dissertação se estudou por simulação numérica o efeito de interferência multimodal (MMI, do inglês “multimode interference”) em guias de onda, com atenção especial a fibras ópticas, e a resposta óptica do dispositivo MMI a parâmetros externos como temperatura, curvatura e índice de refração. Dispositivos baseados em MMI são formados, em geral, por três guias de onda concatenados sendo as extremidades compostas de guias monomodo e a parte central composta de um guia que permite a propagação de muitos modos, tipicamente, mais do que três. Nesta situação, na seção multimodo, são formadas reimagens que aproximadamente replicam fase e amplitude do campo óptico de entrada.

A observação do espectro de transmissão correspondente à primeira reimagem, em dispositivos MMI, permite desenvolver sensores de índice de refração, temperatura e curvatura. A sensibilidade dos sensores foi avaliada frente às variações do mensurando, ou seja, variações no índice de refração, temperatura e curvatura da estrutura MMI em fibra óptica.

Palavras chaves: interferência multimodal (MMI), método de propagação de feixe, estrutura monomodo-multimodo-monomodo (SMS), fibra óptica, estruturas com fibra óptica, sensor de curvatura, sensor de índice de refração, sensor de temperatura, filtro, fibra taper MMI.

Área de conhecimento: Óptica, Fotônica.

Abstract

In this work the effect of multimodal interference (MMI) in waveguides was studied by numerical simulation. Special attention was given to optical fibers and its the optical response when external parameters such as temperature, curvature or refractive index were varied. MMI devices are usually formed by connecting three waveguides being the input and output ones singlemode waveguides while the middle one is a waveguide that allows the propagation of many optical modes, typically more than three. In this situation re-images that replicate both the phase and the amplitude of the input optical field are formed periodically within the multimode section. The analysis of the transmission spectrum of the first re-image in MMI devices were realized in order to get information about the fiber environment, in particular the surrounding refractive index, radius of curvature and temperature. The sensors sensitivity was evaluated.

Keywords: multimode interference (MMI), beam propagation method (BPM), singlemode-multimode-singlemode structure (SMS), optical fibers, optic fiber structures, curvature sensor, index refraction sensor, temperature sensor, filter, MMI taper fiber.

Area: Optics, Photonics.

Lista de publicações

Artigos em periódicos

- S. Silva; **E. G. P. Pachon**, M. A. R. Franco, J. G. Hayashi, F. X. Malcata, O. Frazão, P. Jorge, C. M. B. Cordeiro, “Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference”, *Applied Optics*, vol. 51, No. 14, pp. 2542-2548, 2012.
- S. Silva; **E. G. P. Pachon**, M. A. R. Franco, P. Jorge, J. L. Santos, F. X. Malcata, C. M. B. Cordeiro, O. Frazão, “Curvature and Temperature Discrimination Using Multimode Interference Fiber Optic Structures – A proof of concept”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, No. 23, pp. 3569-3575, 2012

Artigos em conferências

- **E. G. P. Pachon**; M. A. R. Franco; C. M. B. Cordeiro, “Spectral bandwidth analysis of high sensitivity refractive index sensor based on multimode interference fiber device”. 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, vol. 8421, 2012.

Participação em conferências

- **E. G. P. Pachon**; M. A. R. Franco; C. M. B. Cordeiro, “Spectral bandwidth analysis of high sensitivity refractive index sensor based on multimode interference fiber device”. In: 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012, Beijing, China.
- **E. G. P. Pachon**; E. M. Zavanin; M. A. R. Franco; C. M. B. Cordeiro, “Analyzing curvature and temperature sensitivity of single mode-multimode-single mode optical”. In: Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2011, Foz do Iguaçu. Anais do Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2011. v. 1.
- E. M. Zavanin; **E. G. P. Pachon**; J. G. Hayashi; M. A. R. Franco; C. M. B. Cordeiro, “Probing liquid refractive index with multimode interference effect in optical fibers”. In: Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2011, Foz do Iguaçu. Anais do Encontro de Física da Matéria Condensada. 2011. v. 1.

Sumário

Ficha Catalográfica	iv
Capa de Aprovação	v
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	xi
Lista de publicações	xiii
Participação em conferências.....	xv
Sumário.....	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxv
Capítulo 1.....	1
Introdução	1
Capítulo 2.....	7
Interferência Multimodal	7
2.1 Efeito da interferência multimodal	9
2.2 Análises da propagação de modos guiados	13
2.3 Determinação analítica da reimagem	18
2.4 Determinação da reimagem utilizando o software BPM	23
2.5 Sensoriamento.....	27
Capítulo 3.....	29
Sensoriamento com estruturas SMS.....	29
3.1 Descrição das fibras nas estruturas SMS.....	29
3.2 Sensoriamento de índice de refração	31
3.3 Sensoriamento de Temperatura	40
3.4 Sensoriamento de curvatura	44
3.4.1 Sensoriamento de curvatura com mudança na intensidade do sinal transmitido	44
3.4.2 Sensoriamento de curvatura com deslocamento espectral.....	46

Capítulo 4	53
Largura Espectral.....	53
4.1 Análise da largura espectral do sensor de índice de refração com alta sensibilidade....	53
4.2 Estrutura Mista com MMF <i>no-core</i> de 55 μ m e MMF <i>no-core</i> de 125 μ m	65
4.3 Largura espectral para estruturas SMS com taper	69
4.3.1 Fibra taper MMI com perfil linear e perfil exponencial	72
4.3.2 Reimagens de ordem superior para estruturas SMS com taper.	75
4.3.3 Largura espectral para o sinal das estruturas SMS com taper para perfil linear e exponencial.....	79
4.3.4 Largura espectral para a segunda reimagem para estruturas SMS taper e SMS com MMF <i>no-core</i>	82
Capítulo 5	87
Conclusões e perspectivas futuras	87
Apêndice A	93
Apêndice B	95
Bibliografia	113

Lista de Figuras

Figura 1. Estrutura SMS.	3
Figura 2. Estrutura SMS com taper na região multimodal.	3
Figura 3. Estrutura multimodal com guias de onda planais.....	7
Figura 4. Estrutura monomodo-multimodo-monomodo (SMS) planar. (a) Variáveis de uma estrutura SMS planar. (b) Padrão de interferência de uma estrutura SMS planar.	8
Figura 5. Interferência entre dois modos ao longo do eixo de propagação de uma fibra multimodal <i>no-core</i> 125 μ m.	9
Figura 6. Interferência entre os quatro primeiros modos ao longo do eixo de propagação de uma fibra multimodal <i>no-core</i> de 125 μ m.....	10
Figura 7. Estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m.	11
Figura 8. Perfil de campo para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m.	12
Figura 9. Relação u-w na fibra step-index.....	15
Figura 10. Curvas de dispersão para os modos LP na fibra step-index.....	17
Figura 11. Distribuição de intensidade da luz dentro da MMF <i>no-core</i> de 125 μ m em função do comprimento da MMF <i>no-core</i>	20
Figura 12. Transmissão em função do comprimento de onda com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m.	21
Figura 13. Transmissão da SMS em função do comprimento de onda para índices de refração externos, (a) $n_3=1,3$ e (b) $n_3=1,43$, com Mathematica.....	22
Figura 14. Simulação da estrutura SMS realizada com BPM para índices externos $n_3=1,0$ e $n_3=1,43$	23
Figura 15. Modelo geométrico da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m com BeamProp.	24
Figura 16. Simulação da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m com Rsoft.	26
Figura 17. Simulação da estrutura SMS realizada com BPM para índices externos $n_3=1,0$ e $n_3=1,43$	27

Figura 18. Padrão de interferência do campo elétrico em seção multimodal, plano xz , de estrutura SMS para sensor de índice de refração. O padrão de interferência é alterado com a variação do índice de refração externo à seção multimodo. A estrutura SMS tem seção multimodo (MMF <i>no-core</i>) de diâmetro $55\mu\text{m}$ e sinal com comprimento de onda de $1,55\mu\text{m}$. Os índices de refração externos são: (a) 1,0, (b) 1,3, (c) 1,36 e (d) 1,42.	30
Figura 19. Fibras usadas nos modelos de estruturas SMS para sensoriamento de índice de refração, temperatura e curvatura. (a) Fibra multimodal ThorLabs 105/125, (b) Fibra multimodal <i>no-core</i> e (c) Fibra monomodo.	31
Figura 20. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $125\mu\text{m}$ para índice de refração externo $n_3=1,0$	33
Figura 21. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $125\mu\text{m}$ para índices externos com valores de $n_3=1,0$ até $n_3=1,43$	33
Figura 22. Variação na posição do pico de transmissão em função do índice de refração externo para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $125\mu\text{m}$. A referência é o índice de refração externo $n_3=1,3$	34
Figura 23. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $80\mu\text{m}$ para índices de refração externos com valores de $n_3=1,3$ até $n_3=1,43$	35
Figura 24. Deslocamento do pico em função do índice de refração para estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $80\mu\text{m}$	36
Figura 25. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $55\mu\text{m}$ para índices de refração externos com valores de $n_3=1,30$ até $n_3=1,43$	37
Figura 26. Delta do deslocamento do pico em função do índice de refração para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de $55\mu\text{m}$	37
Figura 27. Comparação da mudança de comprimento de onda em função do índice de refração externo para as estruturas com MMF <i>no-core</i> de (125, 80, 55) μm	38

Figura 28. Resultado experimental para sensoriamento de índice de refração externo com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m (SMS ₃), 80 μ m (SMS ₂) e 55 μ m (SMS ₁). (a) Intensidade da transmissão em função do comprimento de onda, (b) mudança no comprimento de onda em função do índice de refração.	39
Figura 29. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para temperaturas no intervalo entre 20°C – 100°C.	41
Figura 30. Deslocamento espectral do pico de transmissão em função da variação da temperatura.	42
Figura 31. Comparação dos resultados experimentais e numéricos para o deslocamento espectral do pico de transmissão em função da mudança de temperatura.	42
Figura 32. Comparação para líquidos Cargille para sensoriamento de temperatura.	43
Figura 33. Perfil de campo para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m mostrando um vale e a primeira reimagem.	45
Figura 34. Variação na intensidade do sinal de transmissão (reimagem) para sensoriamento de curvatura em estruturas SMS com MMF ThorLabs 105/125 e para raios de curvatura entre 10cm e 50cm.	45
Figura 35. Padrão de interferência do sinal óptico ao longo da estrutura SMS (Ao final da MMF <i>no-core</i> de 125 μ m). (a) Estrutura sem curvatura (b) Estrutura com raio de curvatura de 50cm (c) Estrutura com raio de curvatura 30cm.	47
Figura 36. Sensoriamento de curvatura. Deslocamento do pico de transmissão (condição de reimagem) numa estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> 125 μ m. (a) Intensidade de transmissão normalizada para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do pico de transmissão da reimagem em função do raio de curvatura.	47
Figura 37. Sensoriamento de curvatura. Deslocamento do pico de transmissão (condição de reimagem) numa SMS com MMF <i>no-core</i> de 55 μ m. (a) Intensidade de transmissão normalizada, para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do pico de transmissão da reimagem, em função do raio de curvatura.	48
Figura 38. Pico de baixa transmissão da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μ m de diâmetro.	49

Figura 39. Detalhe da região de baixa transmissão espectral da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> 125 μm de diâmetro para alguns raios de curvatura. (a) Transmissão em função do comprimento de onda para raios de curvatura de 30cm a 70cm. (b) Deslocamento do pico de baixa transmissão em função do raio de curvatura.	50
Figura 40. Transmissão em função do comprimento de onda para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de diâmetro 55 μm	50
Figura 41. Caracterização da variação espectral do pico de baixa transmissão de uma estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 55 μm de diâmetro, em função do raio de curvatura. (a) Transmissão espectral para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do comprimento de onda do pico de baixa transmissão em função do raio de curvatura.....	51
Figura 42. Parâmetros para achar a FWHM do sinal de transmissão.	53
Figura 43. Estruturas SMS e padrão de interferência para seções MMF com diâmetros (ϕ_{MMF}) de (a) 55 μm , (b) 78 μm e (c) 125 μm	54
Figura 44. Transmissão espectral normalizada da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 55 μm de diâmetro para diferentes valores de índice de refração externo.	56
Figura 45. Deslocamento espectral do pico de transmissão (λ_p) como função do índice de refração externo para as estruturas SMS com ϕ_{MMF} de 55 μm , 78 μm e 125 μm	57
Figura 46. Eficiência de acoplamento entre o modo fundamental da SMF e os modos radiais da seção MMF <i>no-core</i> em função da ordem do modo (ν). O gráfico apresenta a eficiência para três diâmetros da seção MMF.	58
Figura 47. Largura espectral das estruturas SMS para mudança no índice de refração externo. Resultados para diâmetros da seção MMF de 55 μm , 78 μm e 125 μm	59
Figura 48. Transmissão espectral de estruturas SMS com diâmetros da MMF iguais a: 55 μm , 78 μm e 125 μm	60
Figura 49. Transmissão espectral da estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ e $n_{\text{liq}}=1,0$, para as três primeiras reimagens formadas na região multimodal.	61
Figura 50. Fase dos onze primeiros modos da seção MMF nas posições da primeira, segunda e terceira reimagens para a estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μm	62

Figura 51. Largura espectral da transmissão de estrutura SMS com MMF <i>no-core</i> com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ e índice externo de 1.0 (n_3). Estudo da variação da largura espectral com o número de modos da seção MMF utilizados na simulação.	63
Figura 52. Caracterização de estruturas SMS com fibras SMF de diferentes aberturas numéricas. (a) Eficiência de acoplamento entre modos na junção SMF-MMF em função da ordem do modo na seção MMF. (b) Transmissão espectral para fibras SMF com diferentes aberturas numéricas.	64
Figura 53. Parâmetros que definem a abertura numérica.	64
Figura 54. Estrutura mista com duas seções MMF <i>no-core</i> de diâmetros $125\mu\text{m}$ e $55\mu\text{m}$	65
Figura 55. Transmissão espectral da estrutura SMS mista.	66
Figura 56. Deslocamento do pico de transmissão espectral para: (a) estrutura SMS com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$, (b) estrutura SMS com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ SMS e (c) estrutura SMS mista, para diferentes valores de índice de refração do meio externo (1,30 e 1,43).	67
Figura 57. Estrutura mista com duas seções MMF <i>no-core</i> de diâmetros $55\mu\text{m}$ e $125\mu\text{m}$	68
Figura 58. Comparação de resultados de deslocamento do pico de transmissão espectral para as duas estruturas SMS mistas. (a) MMF <i>no-core</i> $125\mu\text{m}$ e MMF <i>no-core</i> $55\mu\text{m}$ e (b) MMF <i>no-core</i> $55\mu\text{m}$ e MMF <i>no-core</i> $125\mu\text{m}$	68
Figura 59. Parâmetros de uma estrutura SMS com taper.	69
Figura 60. Estruturas com diferentes perfis e regiões de transição. (a) Taper com perfil linear. (b) Taper “imaginário” com perfil exponencial. (c) Taper com perfil exponencial.	70
Figura 61. Perfis das regiões de transição da estrutura SMS com taper.	71
Figura 62. Perfis de interferência em estruturas SMS com taper de perfil linear ($\alpha=-1/2$, $L_0=5,69\text{cm}$). (a) estrutura sem taper, $D_w=125\mu\text{m}$. (b) estrutura com $D_w=110\mu\text{m}$. (c) estrutura com $D_w=70\mu\text{m}$. Perfil linear,	73
Figura 63. Localização da primeira reimagem para diferentes diâmetros da região afinada em estrutura SMS com taper de perfil linear. $\alpha=-1/2$ e $L_0=5,69\text{cm}$	74
Figura 64. Comparação dos perfis linear e exponencial para $\alpha=-1/2$ e $L_0=5,69\text{cm}$	74

Figura 65. Comparação MMF <i>no-core</i> 86,3 μm com taper linear 86,3 μm de região afinada, $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.	81
Figura 66. Comparação MMF <i>no-core</i> 87,38 μm com taper perfil geométrico exponencial 87,38 μm de região afinada, $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.	81
Figura 67. Comparação MMF <i>no-core</i> 91,1 μm com taper exponencial 91,1 μm de região afinada, primeira reimagem, $\alpha=-1 \times 10^{-10}$, $L_0=2,00\text{cm}$.	82
Figura 68. Comparação MMF <i>no-core</i> 57,08 μm com taper linear com 57,08 μm de região afinada, segunda reimagem com $\alpha=-1/2$ e $L_0=2,00\text{cm}$.	83
Figura 69. Comparação MMF <i>no-core</i> 59,91 μm com taper exponencial de 59,91 μm de região afinada, segunda reimagem. $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.	83
Figura 70. Comparação MMF <i>no-core</i> 68,45 μm com taper exponencial com 68,45 μm de cintura, 2da reimagem. $\alpha=-1 \times 10^{-10}$, $L_0=2,00\text{cm}$.	84
Figura 71. Estrutura DSMF-MeMF-DSMF para a construção dum filtro para separar sinais.	89
Figura 72. Resultados preliminares para a estrutura DSMF-MeMF-DSMF com comprimento de onda de entrada de 1.55 μm .	90
Figura 73. Comparação dos sinais de (a) 0,775 μm e (b) 1,55 μm para o filtro direcional.	91

Lista de Tabelas

Tabela 1. Comparação da localização da reimagem obtida com diferentes métodos.	26
Tabela 2. Resultados de sensibilidade para o sensor de índice de refração com estruturas SMS.	39
Tabela 3. Resultados de sensibilidade para o sensor de curvatura com estruturas SMS.	52
Tabela 4. Comparação dos resultados para reimagem com os métodos de simulação BeamProp-Rsoft e FimmProp-Photon Design.	55
Tabela 5. Localização das reimagens e diferenças na localização das reimagens. Perfil geométrico linear com $L_0=5,69\text{mm}$ e $\alpha=-1/2$	76
Tabela 6. Localização e diferenças na localização das reimagens. Taper “imaginário” com perfil exponencial com $L_0=5,69\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$	76
Tabela 7. Localização e diferença nas localizações das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=4,50\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$	78
Tabela 8. Localização e diferença na localização das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=3,00\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$	78
Tabela 9. Localização e diferenças na localização das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=2,00\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$	79
Tabela 10. Comparação da largura espectral para os sistemas estudados.	85

Capítulo 1

Introdução

O crescimento na indústria de telecomunicações há aumentado o uso da fibra óptica devido a suas propriedades únicas nos sistemas de comunicação. Entre essas propriedades pode-se citar a baixa perda na transmissão de dados (aproximadamente de 0,15dB/Km para $\lambda=1,55\mu\text{m}$), baixa dispersão e baixo custo. Embora as aplicações em comunicações sejam importantes, nosso trabalho se enfocará principalmente no sensoriamento com fibra óptica.

Nas ultimas décadas se incrementou o uso de dispositivos ópticos operando como filtros ([1], [2]), acopladores e lasers sintonizáveis ([3], [4]), em especial os baseados em fibra óptica, devido ao amplo uso que têm nas redes de telecomunicações [5] e em sensoriamento ([6], [7]), entre outros. Entre as aplicações mais importantes, desses dispositivos, pode se citar a transmissão de dados a longas distâncias (devido à elevada largura de banda), na rede mundial de computadores (Internet), e as aplicações em sensoriamento, tais como: sensores de temperatura, curvatura, tensão, umidade, pH e medidas de campos elétricos e magnéticos ([7], [8], [9]). A construção desses sistemas é simples e seu custo é baixo, fazendo-os atrativos para aplicações industriais.

Os filtros usados para a separação de sinais são principalmente construídos e modelados como guias de ondas planais ([10], [11]). Esses guias de onda são as estruturas mais simples para a propagação da luz, embora tenham problemas quando se precisa acoplar com estruturas em fibra. A inovação vem dada então pela construção desse tipo de filtro diretamente em a fibra óptica evitando problemas no acoplamento.

Muitos dos estudos de sensoriamento óptico a fibra utilizam fibras de período longo (LPG, do inglês “Long Period Grade”), fibras com rede de Bragg (FBG, do inglês “Fiber Bragg Grade”), fibras afinadas (fibras taper), fibras micro-estruturadas e fibras que apresentam interferência multimodal. Os sensores com interferência multimodal construídos com fibra óptica são baseados na interação que a luz guiada na seção multimodo tem com o meio externo geralmente por causa do campo evanescente. Esses sistemas são imunes à interferência eletromagnética, são compactos e têm alta sensibilidade; entre outras características importantes.

A crescente demanda de sensores ópticos com elevada sensibilidade, baixo custo, facilidade de fabricação e robustez mecânica é a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho que enfocará dispositivos baseados em interferência multimodal em fibra óptica. Entre os sistemas estudados estão os sensores para monitorar índice de refração, temperatura e curvatura. A estrutura utilizada é baseada na junção de fibras ópticas monomodo-multimodo-monomodo, arranjo que recebe o nome de estrutura SMS (do inglês “singlemode-multimode-singlemode”). As fibras monomodo (SMF, do inglês “singlemode fiber”) são unidas no início e fim de uma seção multimodo (MMF, do inglês “multimode fiber”) [12] como se vê na Figura 1. Essa estrutura opera devido à interferência multimodal (MMI, do inglês “multimode interference”) dos modos guiados na seção MMF [11] sob o princípio da formação de reimagens. A reimagem consiste na replicação, geralmente no final da seção MMF, do perfil de campo de sua entrada. Isto ocorre para um comprimento específico da MMF [5].

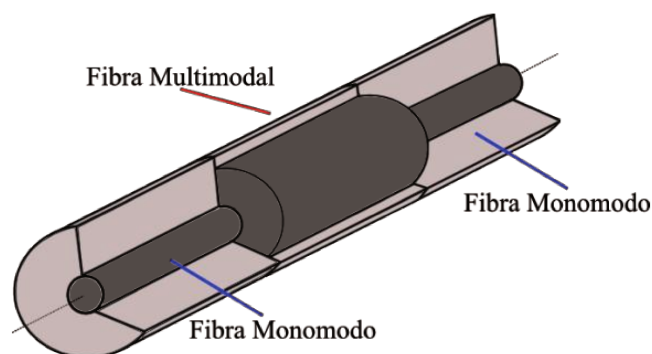


Figura 1. Estrutura SMS.

Este trabalho também inclui o estudo de estruturas SMS com seção multimodo afinada (“taper”) como se mostra na Figura 2. Investigou-se o efeito da variação nas dimensões da SMS na posição de formação da primeira reimagem, ao longo do eixo de propagação, e a variação da largura espectral da primeira e segunda reimagens.

Um parâmetro importante para conhecer antes de fazer o modelo e construir a estrutura SMS é a coordenada ou posição longitudinal de formação da reimagem. O conhecimento do comprimento da MMF, para o qual se obtêm a reimagem, permite construir e modelar as estruturas (sensores e fibra taper) de forma mais prática e rápida.

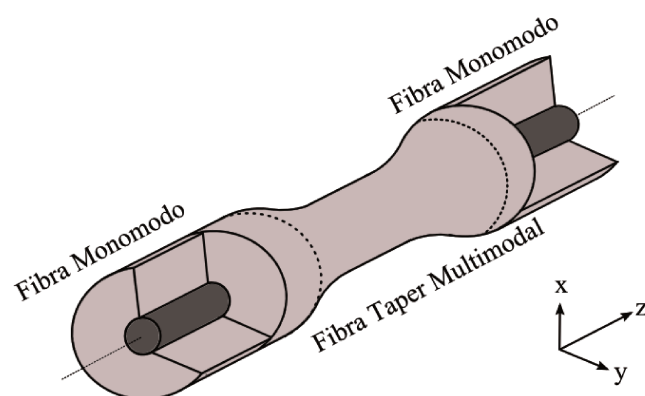


Figura 2. Estrutura SMS com taper na região multimodal.

Os sensores baseados em interferência multimodal têm alta sensibilidade e se construíram como uma alternativa às estruturas feitas de fibra com redes de Bragg [13]. A estrutura SMS com fibra taper é pouco explorada e os efeitos envolvidos pouco estudados.

Para conhecer com precisão a posição da reimagem, a resposta da estrutura SMS como sensor, estudar a largura espectral do sinal de transmissão e o comportamento da reimagem em estruturas SMS taper, organiza-se este trabalho da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 são apresentadas as ferramentas, analíticas e numéricas, necessárias para se encontrar os comprimentos da seção MMF para os quais se formam as reimagens. De posse desses comprimentos pode-se simular e construir as estruturas para os estudos de sensoriamento e para a análise de variação da largura espectral de transmissão. É também possível determinar as dimensões das estruturas SMS com seções MMF baseadas em fibras taper. As primeiras simulações das estruturas SMS são feitas com uma rotina escrita para o programa Mathematica (Wolfram Research). Para estruturas mais complexas emprega-se o programa BeamProp, da empresa RSOFTE, baseado no método de propagação de feixes (“Beam Propagation Method - BPM”).
- No Capítulo 3 apresenta-se a resposta da estrutura, SMS, como elemento sensor. Inicialmente se fez o estudo do sensoriamento de índice de refração externo, para índices de refração externos entre 1,30 e 1,43, e sensoriamento de temperatura para um intervalo entre 20°C e 100°C.

- Posteriormente, estuda-se a resposta da estrutura SMS para curvatura. As primeiras simulações de curvatura (com BPM) se fizeram para uma estrutura SMS com uma fibra multimodal comercial (ThorLabs 105/125) em seguida foram analisadas seções MMF constituídas de fibra sem núcleo (“*no-core*”) e em sílica.
- No Capítulo 4 investiga-se a largura espectral (FWHM – largura completa à meia altura) do sinal transmitido pelas estruturas SMS. Apresenta-se a FWHM do sinal para três estruturas SMS com diâmetros para a seção, MMF, de: 55 μm , 78 μm e 125 μm , e se modela a mudança da FWHM quando o índice de refração externo da estrutura tem valores de 1,30 até 1,43. Para a análise das larguras espectrais foram empregados os softwares BeamProp (RSOFT) e FimmProp (Photon Design), este último baseado na expansão de multimodos. Em seguida, estuda-se a FWHM para a primeira e segunda reimagens, para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μm de diâmetro. Foi analisada a mudança da FWHM na transmissão espectral quando é alterada a abertura numérica da SMF de entrada. Por último, estuda-se a FWHM de uma estrutura mista com MMF *no-core* 125 μm e MMF *no-core* 55 μm . Também se apresenta o estudo da posição da primeira reimagem para estruturas SMS com taper. Foram consideradas duas estruturas taper com regiões de transição linear e exponencial e fez-se o acompanhamento da variação da posição da primeira e segunda reimagens com a diminuição da largura da seção taper.
 - No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros. Entre as perspectivas descreve-se o estudo de um filtro feito a partir de uma

membrana em fibra combinada com fibras de duplo núcleo. Pretende-se estudar a resposta da estrutura, para uma membrana com largura de $75\mu\text{m}$ e investigar a aplicação do dispositivo, na separação de sinais de comprimentos de onda de $0,775\mu\text{m}$ e $1,55\mu\text{m}$.

Capítulo 2

Interferência Multimodal

A interferência multimodal foi estudada e desenvolvida inicialmente para estruturas multimodais com guias de onda planais ([10], [14]). Essas estruturas multimodais (SMS) planas são formadas por três guias de onda concatenadas sendo as extremidades guias monomodo e o centro um guia de onda multimodo, como se vê na Figura 3. Os guias de onda externos somente permitem a propagação de um modo (uma solução para as equações de Helmholtz do guia) enquanto que o guia central permite a propagação de muitos modos, em geral mais do que três. Esses guias são construídos, por exemplo, por uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) sob uma camada de óxido de silício (SiO_2) e as duas anteriores sob uma camada de silício (Si), sendo o silício o substrato [15]. A função dos guias de onda monomodo é o lançamento e recuperação da luz na região multimodal.

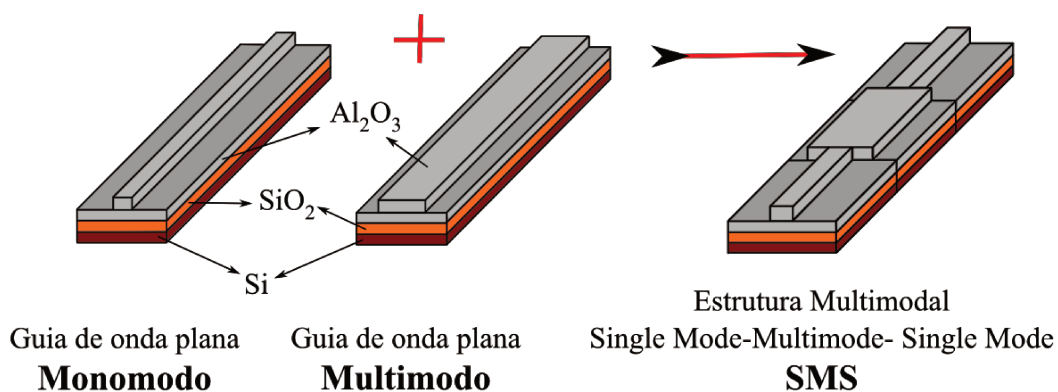


Figura 3. Estrutura multimodal com guias de onda planais.

Nessa estrutura se apresenta o efeito de formação da reimagem, do campo de entrada na seção multimodal [16], inicialmente conhecido como autoimagem e estudado por H. F. Talbot (Apêndice A). Esse efeito consiste na interferência construtiva e destrutiva dos modos da seção multimodal ([17], [18]) como se vê na Figura 4. Na Figura 4(a) se vê uma seção longitudinal da estrutura SMS (Figura 3) mostrando a largura do guia de onda planar multimodal (W), o comprimento para a formação da reimagem (L), o campo de entrada na seção multimodo e os índices de refração da seção multimodo e do meio externo enquanto que na Figura 4(b) se apresenta a interferência dos modos do guia de onda sendo a cor preta o mínimo valor de campo (interferência destrutiva) enquanto que a branca apresenta o maior valor de campo (interferência construtiva).

O efeito de interferência multimodal tem sido muito empregado em estruturas em óptica planar com aplicações em moduladores [10] e filtros [11], que funcionam devido ao monitoramento do deslocamento espectral do pico de transmissão ou variação na amplitude

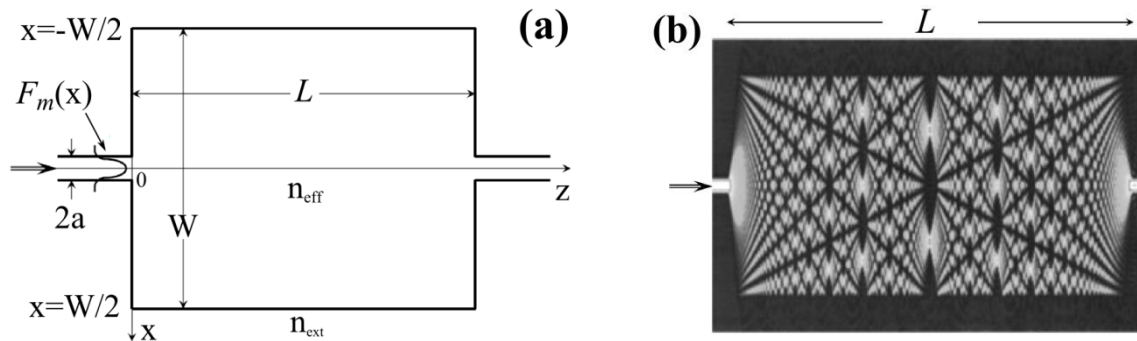


Figura 4. Estrutura monomodo-multimodo-monomodo (SMS) planar. (a) Variáveis de uma estrutura SMS planar. (b) Padrão de interferência de uma estrutura SMS planar.

de transmissão para comprimento de onda fixo, ou seja, sob o princípio de reimagem ([16], [19]). Nos últimos anos se construíram estruturas com fibra (mimetizando as estruturas planares) que operam utilizando o mesmo princípio de reimagem e que apresentam novas aplicações em sensoriamento ([6], [7], [20]) e filtragem [3]. Nesses sensores se fez uso principalmente da reimagem como indicador para mudanças feitas nas estruturas SMS ou no exterior de elas [12].

2.1 Efeito da interferência multimodal

Uma das principais características da interferência multimodal em guias de onda multimodais é a formação de reimagem [16]. Esse efeito é devido à interferência construtiva dos modos guiados do guia de onda, ao longo do eixo de propagação [11]. Como exemplo demonstrativo se ilustra na Figura 5 a interferência construtiva para dois modos de um guia de onda multimodo (fibra *no-core* de 125 μm) com constantes de propagação (β) diferentes.

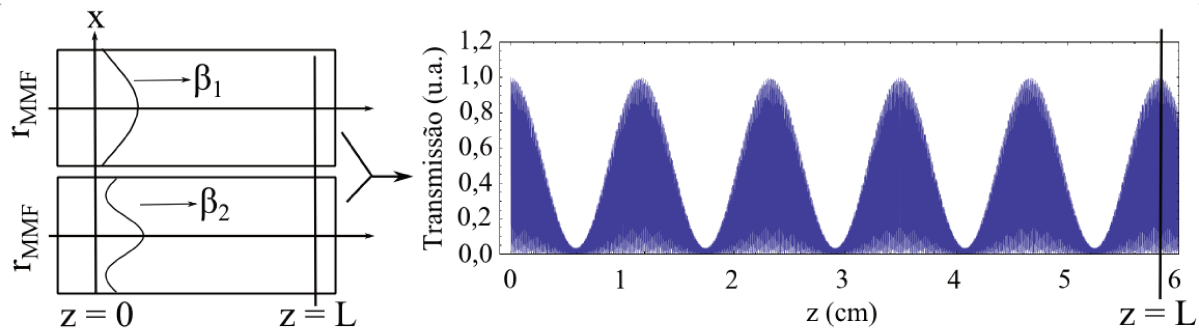


Figura 5. Interferência entre dois modos ao longo do eixo de propagação de uma fibra multimodal *no-core* 125 μm .

Depois, realiza-se o mesmo procedimento para quatro modos do guia de onda (Figura 6). Vê-se que incrementando o número de modos a intensidade de transmissão do sinal em função do comprimento da fibra é definida e pode se encontrar a reimagem mais claramente. Quando aumenta o número de modos usados, também, observa-se que surgem mínimos e máximos locais bem definidos. Os modos utilizados são somente radiais como se mostrará mais na frente.

Para ilustrar o efeito de reimagem, que se apresenta nas estruturas SMS, foram simuladas estruturas como a apresentada na Figura 7, construída por duas fibras monomodo e uma fibra multimodal *no-core* [3]. Essa fibra multimodal é simplesmente um bastão de sílica, sem um núcleo, e que tem como casca o meio externo da estrutura. Os parâmetros da estrutura,

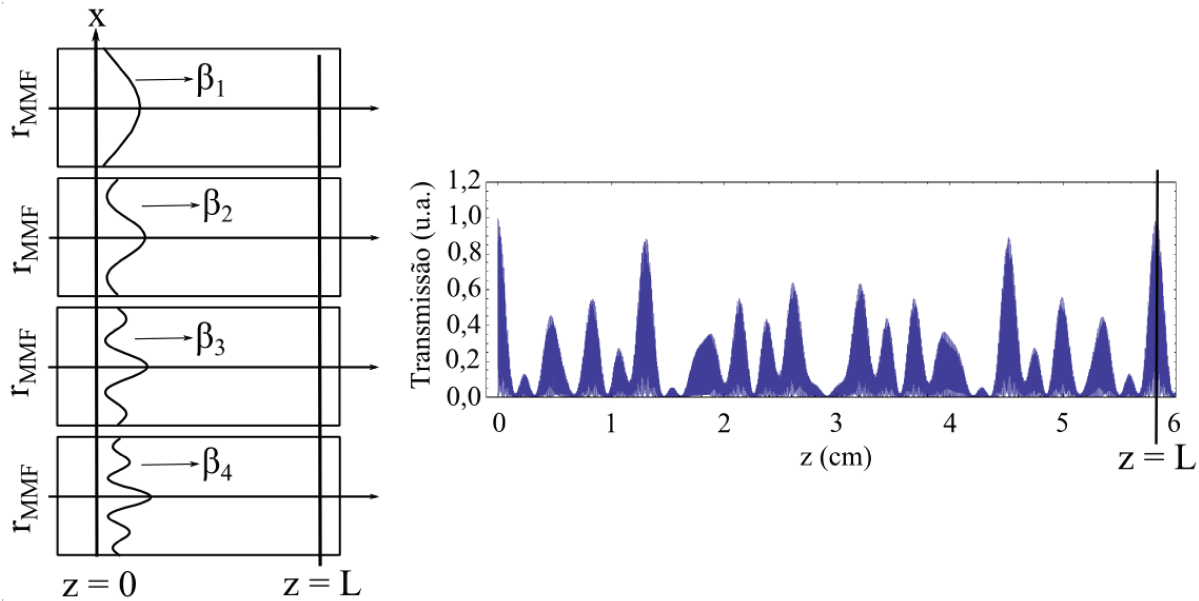


Figura 6. Interferência entre os quatro primeiros modos ao longo do eixo de propagação de uma fibra multimodal *no-core* de 125 μ m.

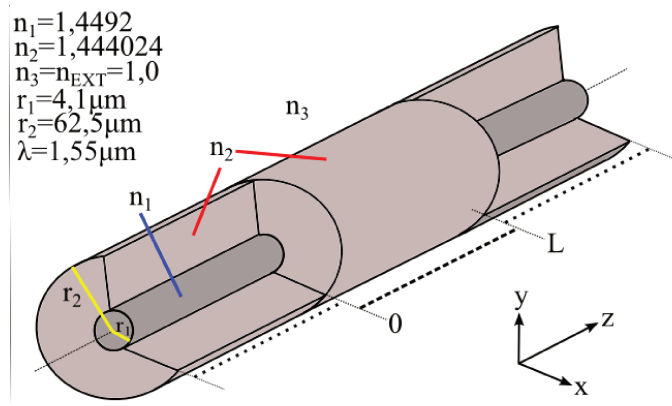


Figura 7. Estrutura SMS com MMF *no-core* de 125µm.

dimensões e materiais, são apresentados na Figura 7. O núcleo da fibra monomodo tem raio de 4,1µm e uma casca com raio de 62,5µm (diâmetro=125µm). O índice de refração da casca, com um valor de 1,444024, é menor que o índice de refração do núcleo, 1,4492, permitindo o guiamento da luz pelo núcleo da fibra (parâmetros equivalentes à fibra padrão em telecomunicações SMF-28 da Corning). O bastão de sílica tem um raio de 62,5µm e índice de refração de 1,444024. O comprimento de onda da luz utilizada foi de 1,55µm.

O resultado da simulação se vê na Figura 8. Essa simulação foi realizada utilizando-se um código computacional baseado no método de propagação de feixe (BPM) [21], da empresa RSOFT. A Figura 8 apresenta a intensidade óptica ao longo de um plano longitudinal da estrutura SMS onde o vermelho significa máxima intensidade de campo elétrico e o violeta a menor intensidade. No início (à esquerda) vê-se o sinal óptico se propagando na seção de fibra monomodo. Em $z = 0$ o sinal é inserido na seção multimodo e a luz se espalha por toda a superfície acoplando-se com vários modos.

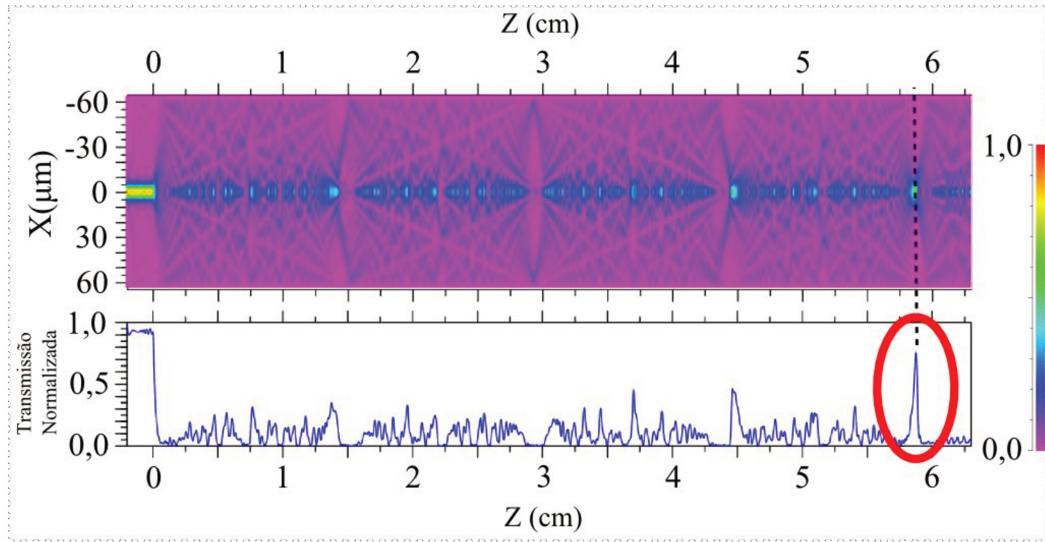


Figura 8. Perfil de campo para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125µm.

Pode-se observar um padrão de interferência ao longo da fibra MMF. A certa distância a maior parte do sinal entra em fase e observa-se um pico de intensidade óptica representando a interferência construtiva dos principais modos da estrutura (os que transportam a maior parte da energia). A posição z na qual esses modos entram em fase é a posição da primeira reimagem $z = L$. A mesma interferência construtiva volta a ocorrer em posições múltiplas da posição da primeira reimagem. Pode-se conhecer o valor de L mediante os dados da simulação ou da análise da propagação dos modos guiados (MPA) [5].

De acordo com a Figura 8, e os dados da simulação, a reimagem se forma para um comprimento da MMF de $\approx 5,8\text{cm}$.

2.2 Análises da propagação de modos guiados

O sinal óptico de entrada na MMF é $E(r, 0)$ que representa o modo fundamental da SMF. Esse modo fundamental é descomposto nos modos da MMF (especificamente LP_{nm} , ver Ref. [18]) para $z = 0$. Devido à simetria circular os únicos modos que se excitam são os LP_{0m} (radiais) [1]. Considerando que o perfil de campo elétrico dos modos LP_{0m} é $F_m(r)$, o modo fundamental da SMF seria descomposto (somente modos guiados) como:

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_m F_m, \quad (1)$$

onde c_m é o coeficiente de excitação de cada modo suportado pela MMF e $F_m(r)$ são as funções próprias da MMF. Esse coeficiente pode ser determinado pela integral de sobreposição entre $E(r, 0)$ e $F_m(r)$, assim

$$c_m = \frac{\int_0^\infty E(r, 0) F_m(r) r dr}{\int_0^\infty F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

A distribuição de campo elétrico, no interior da seção MMF, para uma distância de propagação z , pode ser representada por [5]:

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) e^{i\beta_m z}, \quad (3)$$

onde β_m é a constante de propagação longitudinal do modo guiado com um valor que está entre os índices de refração do núcleo e da casca da seção MMF [17], ou seja:

$$n_3 < \beta_m / k_0 < n_2. \quad (4)$$

A constante de propagação pode ser calculada partindo-se dos valores próprios da MMF [22]. Assim para uma fibra step-index [18] a constante de propagação β_m é obtida resolvendo a equação de dispersão

$$\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} = \frac{K_0(w)}{wK_1(w)}, \quad (5)$$

onde $J_0(u)$ é a função de Bessel de primeira espécie de ordem 0, $J_1(u)$ é a função de Bessel de primeira espécie de ordem 1, $K_0(w)$ é a função de Bessel de segunda espécie de ordem 0 e $K_1(w)$ é a função de Bessel de segunda espécie de ordem 1 e com a condição que $u^2 + w^2 = V^2$, onde $V = \left(\frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) \sqrt{n_2^2 - n_3^2}$. As relações entre os números de onda transversais u e w para $V = 5$ se apresentam na Figura 9 ([18]).

O número em cada curva indica a ordem lm do modo LP_{lm} . Os pontos que cruzam as linhas verticais e o semicírculo dão o conjunto de valores próprios u e w . Os valores de corte dão os valores de u e w permitidos como solução da Eq. (5) e são obtidos quando $w \rightarrow 0$ (e simultaneamente $u \rightarrow V$) na seguinte equação de dispersão:

$$\frac{J_0(V)}{VJ_1(V)} \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Na derivação dessa equação se usa a formula aproximada para as funções de Bessel modificadas para $w \ll 1$:

$$K_l(w) \cong -Ln(w) + 0,1159315. \quad (7)$$

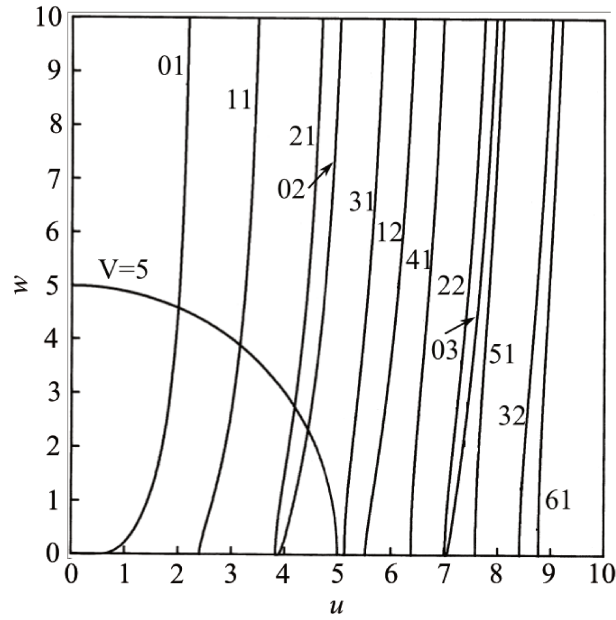


Figura 9. Relação u-w na fibra step-index.

Os valores de corte (V_c) são obtidos da Eq.(5), com especial atenção para o sinal das funções de Bessel, de acordo com:

$$V_c = \begin{cases} 0 & HE_{11} (LP_{01}), \\ j_{1,m-1} & HE_{1m} (LP_{0l}), \quad (m \gg 2), \end{cases} \quad (8)$$

onde $j_{n,m}$ é o ponto m zero da n -ésima função de Bessel $J_n(x)$. É conhecido da Eq. (8) que não existe valor de corte para o modo $HE_{11} (LP_{01})$; assim, o modo HE_{11} é o modo fundamental da fibra óptica. Já que o ponto zero mínimo da função de Bessel é $j_{0,1}$, o modo LP_{11} é conhecido como modo de segunda ordem. O valor da frequência de corte (V_c) de LP_{11} ,

$$V_c = j_{0,1} = 2,4048256 ..., \quad (9)$$

determina o valor de condição de operação monomodo de uma fibra step-index.

O comportamento da equação de dispersão para $w \gg 1$ é encontrado usando-se a fórmula aproximada da função de Bessel modificada da forma:

$$K_l(w) \cong \sqrt{\frac{\pi}{2w}} e^{-w}, \quad (10)$$

e é expressa da forma

$$\frac{J_0(u)}{uJ_1(u)} \rightarrow \infty. \quad (11)$$

É bem conhecido que para $w \gg 1$, u é aproximado por:

$$u = j_{l,m}. \quad (12)$$

O intervalo de variação de u para os modos LP é dado pelas Eqs. (8) e (12), por

$$\begin{array}{ll} \text{modo } LP_{01} (HE_{11}) & u = 0 - j_{0,1} \\ \text{modo } LP_{0m} (HE_{1m}; m \geq 2) & u = j_{1,m-1} - j_{0,m}. \end{array} \quad (13)$$

A Figura 10 ([18]) apresenta curvas de dispersão dos modos LP para a fibra step-index. As constantes de propagação são calculadas numericamente usando a Eq. (5) com a condição que $u^2 + w^2 = V^2$. O eixo horizontal da Figura 10 é a frequência normalizada V e o eixo vertical corresponde à constante de propagação normalizada:

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_3^2}{n_2^2 - n_3^2}. \quad (14)$$

Da Eq. (14) pode se encontrar o valor de β para cada modo.

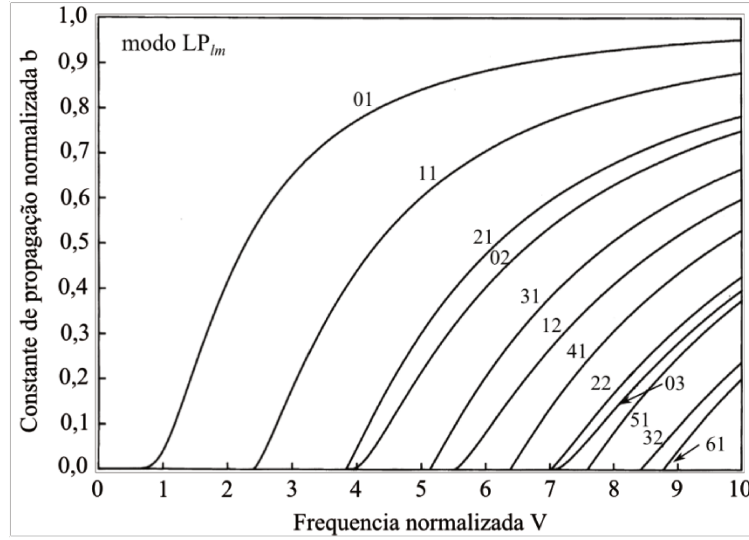


Figura 10. Curvas de dispersão para os modos LP na fibra step-index.

A localização da reimagem é dependente da eficiência de acoplamento entre o modo da SMF e os modos na seção MMF [2]. Uma boa estimativa da posição da reimagem pode ser obtida conhecendo-se qual o modo (m_p) da seção MMF que tem maior eficiência de acoplamento com o modo da SMF. A reimagem depende da diferença de fase entre o modo acoplado com maior eficiência e todos os outros modos na MMF [1]. Assim,

$$\begin{aligned} (\beta_m - \beta_{m_p})z &= \frac{\pi^2[2(m^2 - m_p^2) + (m_p - m)]}{4n_3kr_2^2}z \\ &= 2\pi s, \quad s \in \mathbb{Z}. \end{aligned} \tag{15}$$

Utilizando-se em (15) a condição de formação da reimagem (diferença de fase igual a múltiplos inteiros de 2π e com $m = 3$, $m_p = 4$, $s = 13$, $k = 2\pi/\lambda$), pode-se determinar a posição $z_{\text{reimagem}} (L)$ na qual a reimagem se forma:

$$z_{\text{reimagem}} = L = \frac{8n_3kr_2^2}{\pi} = \frac{4n_3d^2}{\lambda}, \quad (16)$$

onde $d = 2r_2$, é o diâmetro da MMF *no-core*, e $k = 2\pi/\lambda$.

Como exemplo, o comprimento de reimagem, L , para a MMF *no-core* da Figura 7 é

$$L = \frac{4 * 1,444024 * (125\mu m^2)}{1,55\mu m} = 5,87\text{cm}, \quad (17)$$

que comparado com os resultados da simulação (BPM) apresenta uma diferença de 7%.

2.3 Determinação analítica da reimagem

Baseando-nos na aproximação de modos linearmente polarizados [22] se construiu uma rotina computacional utilizando o software Mathematica, para determinar o comprimento da MMF *no-core* de tal forma que a reimagem se forme ao final da seção MMF, que será acoplada a uma SMF. A rotina permite a determinação da posição da reimagem e encontrar a transmissão espectral da estrutura SMS.

O campo elétrico na entrada, da SMF, é:

$$\vec{E}(r, z) = e^{-\left(\frac{r}{\bar{\omega}}\right)^2} e^{-i\beta_0 z} \hat{x}, \quad (18)$$

onde β_0 é a constante de propagação longitudinal do modo LP_{01} da SMF, $\bar{\omega}$ é o diâmetro modal: $\bar{\omega} = \frac{r_1}{\sqrt{\ln 2}} (0,65 + 1,619V^{-1,5} + 2,879V^{-6})$, r_1 é o raio da SMF e V representa a frequência normalizada $V = \left(\frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ [2].

Esse campo elétrico apresentado na Eq. (18), $\vec{E}(r, z)$, representa o modo na seção SMF que excita os vários modos guiados na MMF *no-core*. Esses modos são definidos, para qualquer ponto interno da MMF, pela expressão

$$E(r, \theta, z) = \sum_{\mu=-N}^N \sum_{m=1}^M \psi_{m,\mu}(r, \theta, z), \quad (19)$$

onde μ e m indicam os componentes modais azimutal e radial, respectivamente, e

$$\psi_{m,\mu}(r, \theta, z) = c_{m,\mu} J_{\mu} \left(u_{m,\mu}, \frac{r}{r_3} \right) \cos(\mu\theta) e^{-i\beta_{m,\mu} z} \hat{x}, \quad (20)$$

representa o campo elétrico vetorial complexo do modo. Os valores $u_{m,\mu}$, $\beta_{m,\mu}$ e r_3 são a constante de propagação transversal normalizada, a constante de propagação longitudinal e o raio da MMF *no-core*, respectivamente.

Para o comprimento $z = 0$, as expressões de campo elétrico da MMF *no-core* são uma projeção do campo elétrico da SMF em um conjunto ortogonal das componentes transversais dos modos guiados como se viu na seção anterior. Assim,

$$\vec{E}(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_{m,0} J_0 \left(u_{m,0}, \frac{r}{r_3} \right) \hat{x}, \quad (21)$$

que comparada com a Eq. (1) leva a que

$$F_m = J_0(u_{m,0}, \frac{r}{r_3}). \quad (22)$$

O coeficiente de excitação de campo, c_m , relaciona-se à eficiência de acoplamento η_m através da seguinte expressão: $c_m = \sqrt{\eta_m}$. Desta forma, pode-se escrever:

$$\eta_m = \frac{\left| \int_0^\infty E(r, 0) F_m(r) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |E(r, 0)|^2 r dr \int_0^\infty |F_m(r)|^2 r dr}. \quad (23)$$

Para se construir a rotina computacional na linguagem do software Mathematica, é preciso conhecer o campo elétrico dado pela Eq.(20). Para isso, deve-se encontrar o valor de u_m , o ultimo parâmetro desconhecido. Partindo-se das raízes das funções de Bessel de ordem zero, tem-se [17]:

$$u_m = \left(2m - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{2}, \quad (24)$$

onde m é o modo de propagação.

Os resultados da simulação, para a distribuição de intensidade do campo elétrico ao longo do eixo de propagação, z , para o plano $y = 0$, da estrutura mostrada na Figura 7, mostram-se na Figura 11.

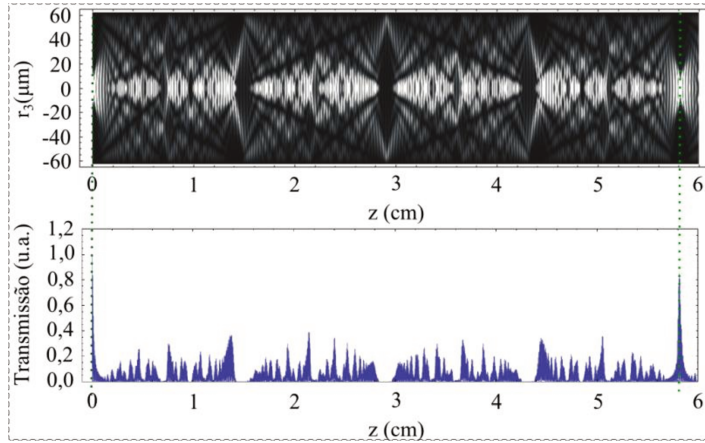


Figura 11. Distribuição de intensidade da luz dentro da MMF *no-core* de 125μm em função do comprimento da MMF *no-core*.

A posição de formação da reimagem, determinada com essa rotina, é de 5,81cm que comparado ao valor dado pela Eq. (17), 5,87cm, apresenta uma diferença de 6%.

Outro aspecto importante para analisar nas estruturas SMS é a resposta espectral da transmissão óptica. Com a finalidade de se determinar o espectro de transmissão se fez a simulação varrendo o comprimento de onda desde 1,4 μ m até 1,7 μ m, mantendo o comprimento da fibra MMF constante com o valor encontrado para a ocorrência da primeira reimagem ($L = 5,89$ cm) como se vê na Figura 12. Observa-se que a maior transmissão se apresenta para o comprimento de onda de 1,55 μ m, considerando uma estrutura SMS na qual o índice de refração externo é $n_3 = 1,0$. A mudança do índice de refração para um valor maior deve gerar um deslocamento em comprimento de onda de máxima transmissão, devido à defasagem entre os modos da seção MMF. Desta forma, se espera que o máximo de transmissão do sinal apresente deslocamento para maiores comprimentos de onda ([12], [23]).

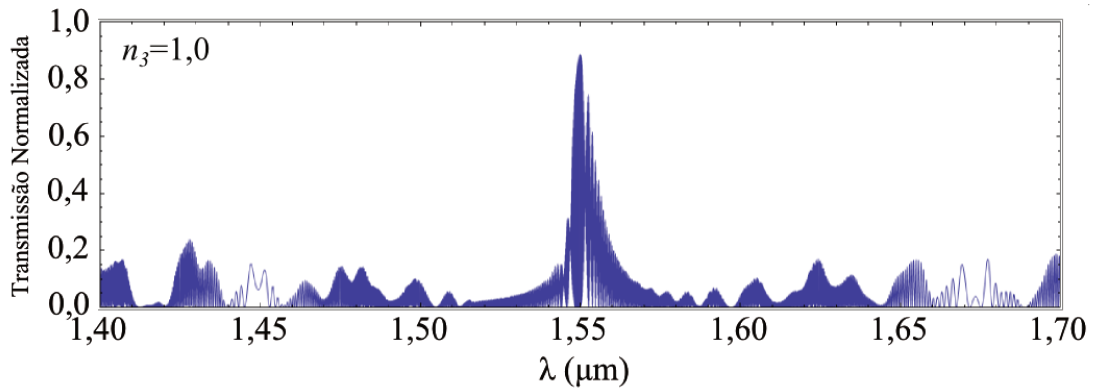


Figura 12. Transmissão em função do comprimento de onda com MMF *no-core* de 125 μ m.

Quando o valor de n_3 (índice de refração externo) muda, para um valor maior que 1.0, o programa não apresenta uma resposta adequada com deslocamento espectral da transmissão, como se vê na Figura 13. Espera-se que para maior índice de refração externo o pico de máxima transmissão do sinal seja deslocado para comprimentos de onda maiores.

Como consequência, começou-se a utilizar um software comercial que apresenta maior robustez e complexidade. Esse software permite resolver as equações de Maxwell numericamente, baseando-se no método de propagação de feixe (BPM) associado ao método das diferenças finitas para a determinação das constantes de propagação β_m , índice efetivo $n_{eff} = \beta/k$ dos modos e o perfil de interferência multimodal.

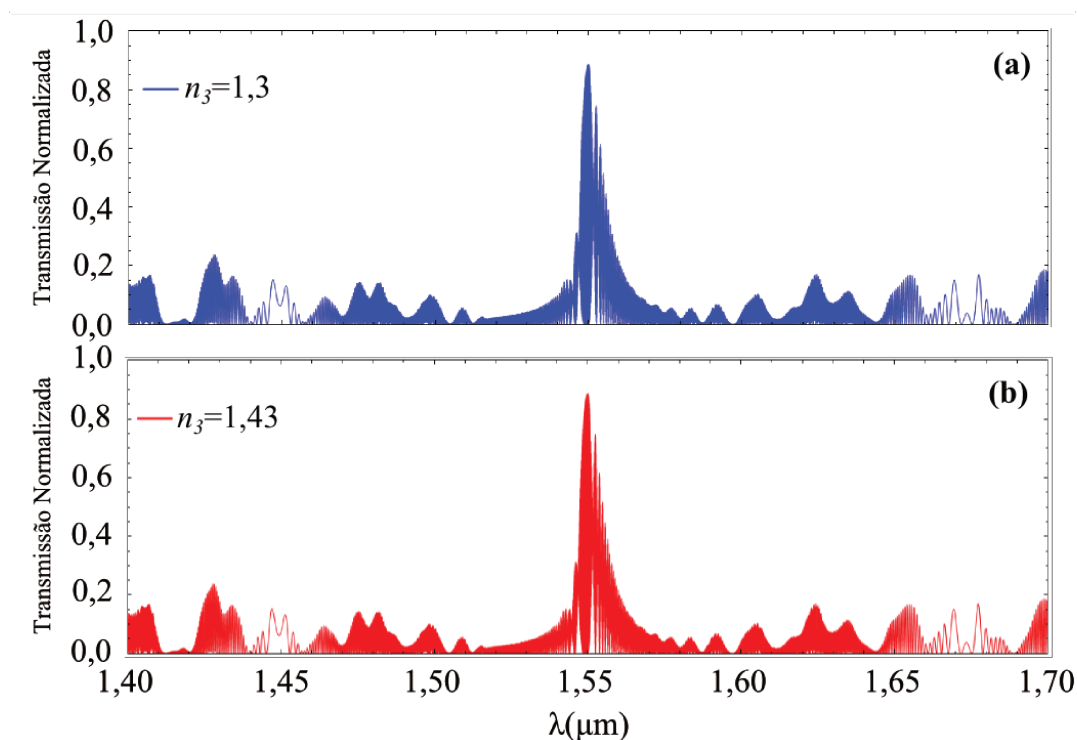


Figura 13. Transmissão da SMS em função do comprimento de onda para índices de refração externos, (a) $n_3=1,3$ e (b) $n_3=1,43$, com Mathematica.

2.4 Determinação da reimagem utilizando o software BPM

Considerando a resposta inadequada da rotina escrita para o software Mathematica, quando se considera mudanças no índice de refração externo, começou-se a utilizar um software comercial baseado no método de propagação de feixe (BPM) da empresa Rsoft Group Design. Nesse programa pode-se observar o deslocamento do pico de transmissão devido à mudança no índice de refração externo (Figura 14). Neste programa também se pode estudar a transmissão em função de perturbações externas, tais como: temperatura e curvatura.

O BPM da RSOFT (BeamProp) permite a modelagem de dispositivos fotônicos como fibras ópticas, fibras ópticas de cristal fotônico, anéis ressonadores, guias e circuitos de óptica integrada entre outros.

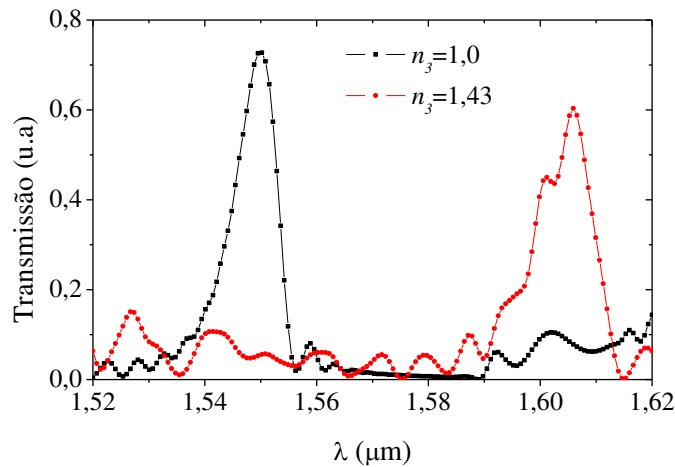


Figura 14. Simulação da estrutura SMS realizada com BPM para índices externos $n_3=1,0$ e $n_3=1,43$.

Em nosso estudo, utiliza-se o BeamProp para o estudo da propagação da luz na estrutura SMS. O computador utilizado para executar as simulações tem as seguintes características:

Processador: Intel Core i7 CPU 3.07GHz

Sistema Operacional: Windows 7 Professional. Service Pack 1, 64 bits

Memória RAM: 24Gb.

A primeira modelagem se fez para a estrutura SMS da Figura 7. A Figura 15 apresenta a interface gráfica do software BeamProp, com um modelo que representa a estrutura SMS. O modelo geométrico não está em escala, para permitir melhor interação com os elementos geométricos de tamanhos muito diferentes.

O sinal óptico de entrada ou lançador é o modo fundamental da fibra monomodo (SMF). A recuperação da luz é feita, novamente por uma SMF na saída da estrutura SMS. Nessa modelagem se considera uma estrutura tridimensional (3D).

Os resultados da simulação para essa estrutura se vêem na Figura 16 (igual que a Figura 8).



Figura 15. Modelo geométrico da estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μ m com BeamProp.

As análises numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos e Expansão de Multimodos foram realizadas em modelo 3D, como foi mencionado anteriormente, e em coordenadas cartesianas. É sabido que, para estruturas SMS com simetria cilíndrica, é possível utilizar uma análise axissimétrica (bidimensional) com plano de simetria x-z com eixo de simetria em $x=0$ e coordenadas cilíndricas, já que apenas os modos radiais são importantes na caracterização da estrutura SMS.

Esse tipo de análise tem por objetivo reduzir o custo computacional por utilizar discretização bidimensional e evitar a dispersão numérica dos resultados induzida pela distribuição da malha tridimensional. Entretanto, as análises nas quais há uma quebra desta simetria exigem modelo tridimensional. Por exemplo, a análise de curvatura induz uma assimetria no perfil dos índices de refração da fibra ao longo do eixo da curvatura. A simetria axissimétrica também é quebrada ao se estudar o efeito do deslocamento axial do acoplamento entre as seções SMF e MMF. Tendo em vista a construção de modelos numéricos que permitam a realização de todos os estudos propostos neste trabalho, foram realizadas apenas modelos tridimensionais. Esta escolha implicou na necessidade de escolha da densidade de malha que resultasse bom ajuste com resultados analíticos e experimentais.

Obteve-se a reimagem para um comprimento da MMF de 5,89cm, que está, novamente, em acordo com o resultado da Eq. (17) (5,87cm). Esse comprimento depende muito da qualidade da malha utilizada para discretizar a seção transversal das fibras e também do passo em z utilizado para a análise de propagação, como se analisou anteriormente.

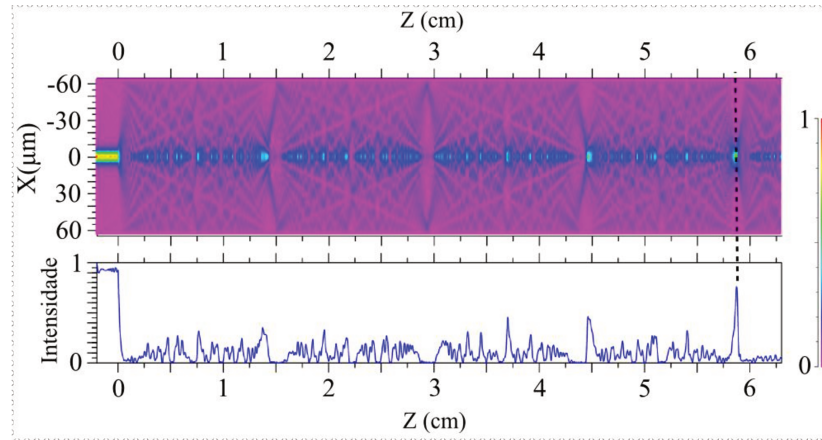


Figura 16. Simulação da estrutura SMS com MMF *no-core* de 125μm com Rsoft.

As respostas espectrais da estrutura para índices de refração externos de 1,0 e 1,43 são apresentadas na Figura 17 (igual que a Figura 14). Para o índice de refração externo de $n_3 = 1,0$, o pico de transmissão ocorre em um comprimento de onda $\lambda = 1,5502\mu\text{m}$ e para $n_3 = 1,43$ o pico se desloca $\lambda = 1,6091\mu\text{m}$. Observa-se um deslocamento do pico para maiores comprimentos de onda ($\Delta\lambda = 55,7\text{nm}$).

Os resultados para a localização da reimagem para os três métodos são resumidos na Tabela 1. A diferença entre os valores da posição da reimagem pelos diferentes métodos (Tabela 1) se origina nas aproximações utilizadas para a determinação das constantes de propagação dos vários modos ópticos para a formação da reimagem.

Tabela 1. Comparação da localização da reimagem obtida com diferentes métodos.

Analítico (cm)	Mathematica (cm)	BPM (cm)
5,87	5,81	5,89

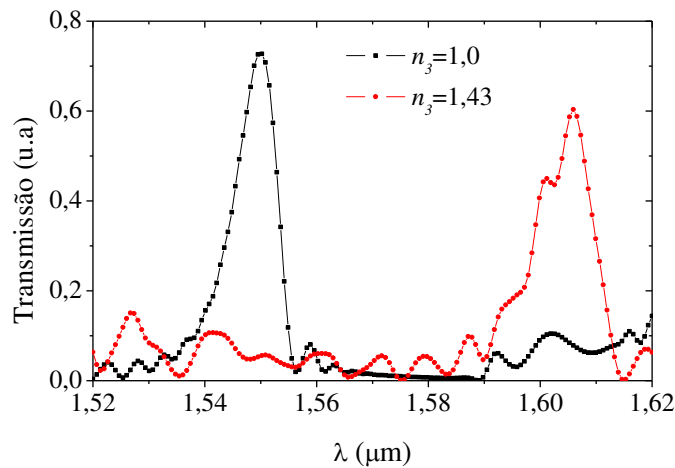


Figura 17. Simulação da estrutura SMS realizada com BPM para índices externos $n_3=1,0$ e $n_3=1,43$.

2.5 Sensoriamento

O sensoriamento com estruturas SMS nasceu como uma alternativa ao sensoriamento pontual de alta sensibilidade, empregando fibra óptica de período longo (LPG) ou fibra óptica com rede de Bragg (FBG), para medidas de índice de refração externo [23], temperatura [8] e curvatura [24]. A resposta espectral dos sensores construídos com estruturas SMS pode ser estudada com o seguimento do pico de transmissão em função do comprimento de onda, ou com a mudança na intensidade na transmissão, do sinal. Para o sensoriamento de índice de refração e temperatura se estudou o deslocamento do pico de transmissão devido à mudança de parâmetros externos à estrutura e para o sensoriamento de curvatura se estudou o deslocamento do pico de transmissão e a mudança em sua intensidade. O desenvolvimento

dos sensores baseados em estruturas SMS será abordado com maior profundidade no Capítulo 3.

Capítulo 3

Sensoriamento com estruturas SMS

Sensores ópticos são dispositivos promissores e atrativos já que não são afetados por interferência eletromagnética, têm baixo custo, suportam ambientes hostis (do ponto de vista químico e mecânico), apresentam alta sensibilidade ou largo intervalo dinâmico, bem como, têm rápida resposta ([20], [25]). Existem diferentes tipos de sensores a fibra óptica que cumprem essas funções, tais como: sensores com rede de Bragg, redes de período longo (LPG) [26], sensores com fibra óptica micro-estruturada (MOF) [27], sensores com fibra óptica e rede de Bragg inscrita (FBG) e sensores baseados em estruturas, como a estrutura SMS ([8], [9], [28]).

Neste capítulo, o estudo enfocará o sensoriamento com as estruturas SMS. O funcionamento das estruturas é baseado no efeito de interferência multimodal [5] ou efeito de reimagem. Esse efeito é o principal indicador para perturbações externas consistindo no deslocamento espectral da reimagem na região multimodal [29] (Figura 18) ou na mudança na intensidade do sinal de transmissão. Entre as perturbações que se estudam estão: mudança no índice de refração externo [30], mudança na temperatura [31] e curvatura [32].

3.1 Descrição das fibras nas estruturas SMS

Para a modelagem das estruturas se utilizaram três tipos de fibra; fibra multimodal sem núcleo (MMF *no-core*), fibra multimodal da empresa ThorLabs (105/125) e fibra monomodo SMF-28 fabricada pela Corning.

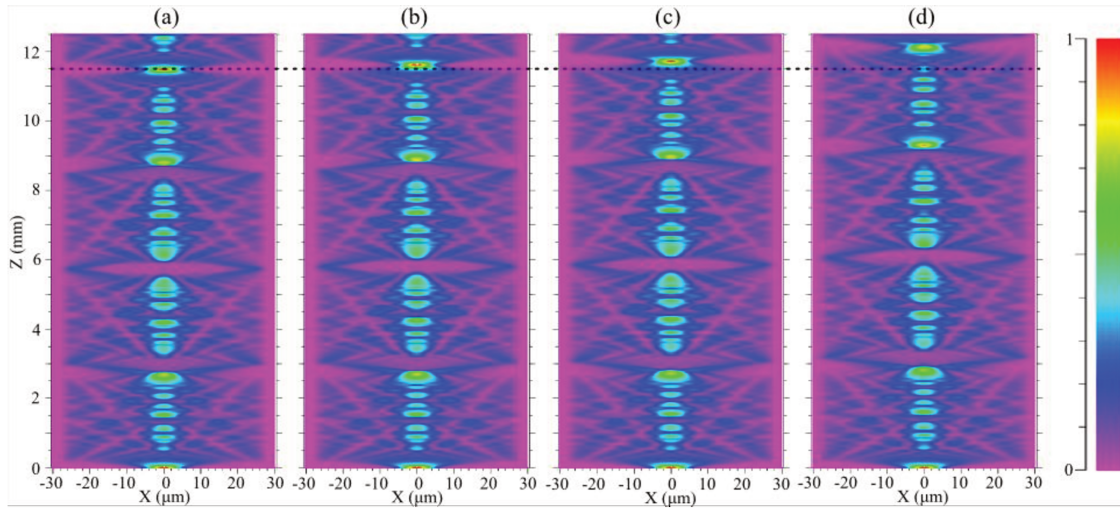


Figura 18. Padrão de interferência do campo elétrico em seção multimodal, plano xz , de estrutura SMS para sensor de índice de refração. O padrão de interferência é alterado com a variação do índice de refração externo à seção multimodo. A estrutura SMS tem seção multimodo (MMF *no-core*) de diâmetro $55\mu\text{m}$ e sinal com comprimento de onda de $1,55\mu\text{m}$. Os índices de refração externos são: (a) 1,0, (b) 1,3, (c) 1,36 e (d) 1,42.

A MMF ThorLabs 105/125 tem núcleo com diâmetro de $105\mu\text{m}$ e casca de $125\mu\text{m}$ de diâmetro (Figura 19 (a)). O índice de refração do núcleo é de 1,4446 e da casca de 1,4271. Essa fibra foi utilizada principalmente para o sensoriamento de curvatura.

A MMF *no-core* é simplesmente uma barra de sílica; que não tem região dopada de maior índice. Aqui se considerará como casca o meio externo da estrutura que pode ser ar ou um líquido com baixo índice de refração. O índice de refração da barra é 1,444024 (Figura 19 (b)). Essa fibra é usada para sensoriamento de índice de refração, sensoriamento de temperatura e também para o sensoriamento de curvatura. Devido à ausência de casca, os modos da fibra estão mais expostos às perturbações do meio externo por meio do campo evanescente, por isto, o sensoriamento é mais efetivo resultando alta sensibilidade.

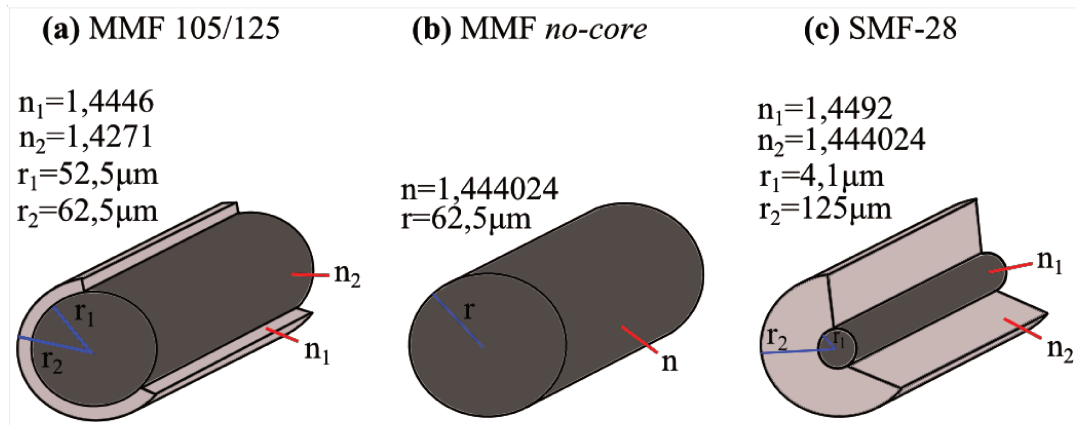


Figura 19. Fibras usadas nos modelos de estruturas SMS para sensoriamento de índice de refração, temperatura e curvatura. (a) Fibra multimodal ThorLabs 105/125, (b) Fibra multimodal *no-core* e (c) Fibra monomodo.

A SMF-28 é uma fibra monomodo (Figura 19 (c)) usada nas extremidades da estrutura SMS, unidas à seção multimodal ao centro. O papel da SMF é lançar e recolher a luz nos extremos da MMF.

3.2 Sensoriamento de índice de refração

O sensoriamento de índice de refração é baseado no deslocamento espectral do pico do sinal de transmissão (pico de reimagem) [25] como se observa na Figura 17. Para o exemplo da Figura 17, foram calculadas as transmissões espectrais para os casos nos quais o índice de refração do meio externo varia de $n_3 = 1,0$ a $n_3 = 1,43$, resultando em apreciável deslocamento espectral do pico de transmissão ($\Delta\lambda \approx 0,055\mu\text{m}$) [30]. Esse deslocamento do pico se deve à interação dos modos do guia multimodal com o meio externo [25]. Ao alterarmos o índice de refração do meio externo os modos mudam suas constantes de propagação longitudinais [5] e, portanto, obtém-se uma localização diferente da reimagem na

estrutura [29]. Como o comprimento da seção multimodal é fixo, a condição de formação de reimagem, no final desta seção, só é obedecida para outro comprimento de onda, acarretando o deslocamento espectral do pico de transmissão como se vê na Figura 17.

Para o sensoriamento de índice de refração externo foram utilizadas três estruturas SMS com diâmetros da seção multimodal de 55 μm , 80 μm e 125 μm , todas com seções MMF do tipo *no-core*. A primeira estrutura analisada é a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μm . A tarefa inicial é determinar o valor da reimagem para a construção do modelo para análise numérica e, também, para a construção experimental. Como se viu no Capítulo 2, o valor da reimagem calculada por diferentes métodos é $\approx 5,89\text{cm}$. O valor obtido numericamente foi adotado para as posteriores simulações e também como referência de dimensão a ser obtida no experimento.

O primeiro resultado que se obteve foi o espectro de intensidade de transmissão do sinal (na reimagem) em função do comprimento de onda [29] para um índice de refração externo de $n_3 = 1,0$ (Figura 20). O comprimento de onda muda entre 1,52 μm e 1,62 μm enquanto que a transmissão é normalizada e fica entre 0 e 1. Vê-se que a maior transmissão para a estrutura obtém-se quando o comprimento de onda é aproximadamente 1,55 μm .

Para a determinação da sensibilidade do sensor de índice de refração proposto, variou-se o índice externo entre 1,33 e 1,43 e observou-se o deslocamento espectral do pico de transmissão da estrutura SMS (Figura 21). Vê-se que o pico apresenta deslocamento para maior comprimento de onda enquanto que a intensidade diminui. A largura espectral do sinal aumenta com o incremento do índice de refração.

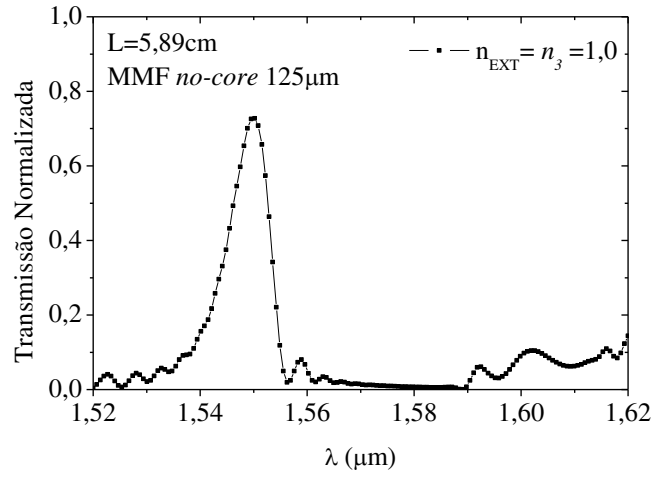


Figura 20. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF *no-core* de $125\mu\text{m}$ para índice de refração externo $n_3=1,0$.

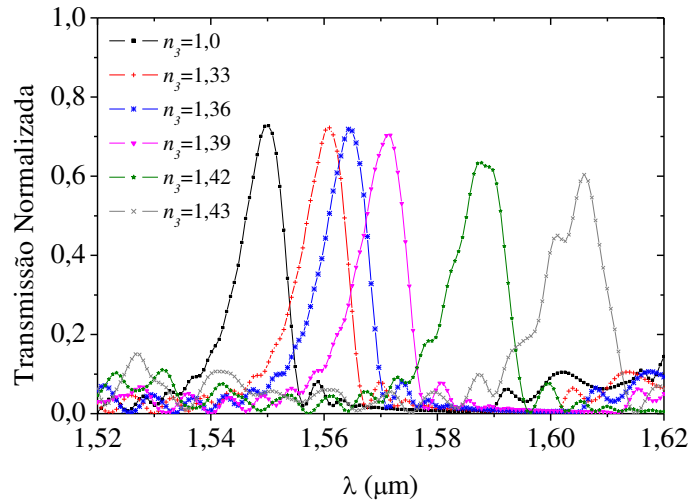


Figura 21. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para estrutura SMS com MMF *no-core* de $125\mu\text{m}$ para índices externos com valores de $n_3=1,0$ até $n_3=1,43$.

A Figura 22 apresenta a variação do comprimento de onda do pico de transmissão em função do índice de refração externo, tendo como referência a posição do pico para $n_3 = 1,30$. A sensibilidade do elemento sensor ao índice de refração é 104nm/RIU (RIU, do inglês “refractive index unity”) no intervalo de índices externos de 1,30 a 1,33 e de 1820nm/RIU para o intervalo de índices de 1,42 a 1,43. Essa sensibilidade é determinada como a divisão entre o deslocamento do pico ($\Delta\lambda$) e a diferença em índice de refração. Assim, o maior deslocamento espectral de transmissão ocorre quando o índice de refração externo tem valores próximos do valor do índice de refração da seção MMF *no-core* [33]. A situação de máximo deslocamento espectral é a região de maior sensibilidade do sensor e deve ser levada em conta para o projeto e construção experimental do sensor. Finalmente, vê-se que o deslocamento total do pico de transmissão, pico da reimagem, é de ≈ 50 nm.

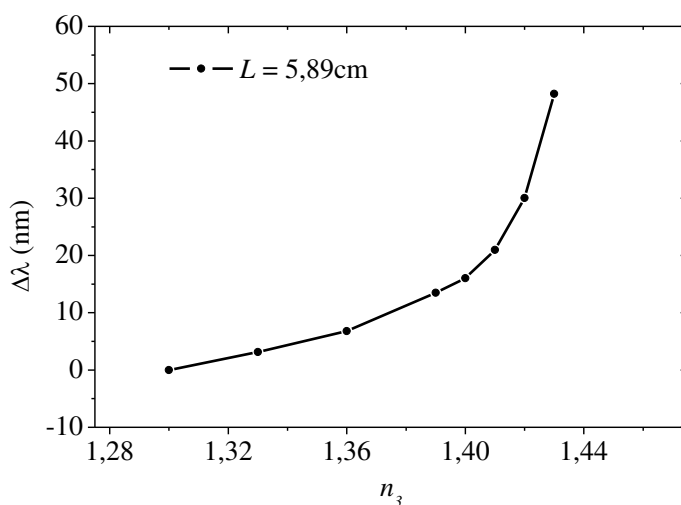


Figura 22. Variação na posição do pico de transmissão em função do índice de refração externo para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μ m. A referência é o índice de refração externo $n_3=1,3$.

A seguinte estrutura de estudo é uma SMS, com MMF *no-core* de 80 μm . O valor determinado para a posição da reimagem com a Eq. (17) é 2,38cm, enquanto que o valor determinado com a simulação por, BPM, é 2,42cm.

Os resultados para a variação espectral do pico de transmissão em função do índice de refração (de 1,30 a 1,40) é apresentado na Figura 23. Pode se observar que ao aumentarmos o índice externo o pico de transmissão se desloca para maiores comprimentos de onda e o pico se torna mais largo. A variação da posição do comprimento de onda do máximo de transmissão em função do índice externo é apresentada na Figura 24. Para o intervalo de índices de refração entre 1,30 até 1,33 obtém-se um elemento sensor com sensibilidade de 134nm/RIU enquanto que para o intervalo entre 1,42 até 1,43 obtém-se 2190nm/RIU.

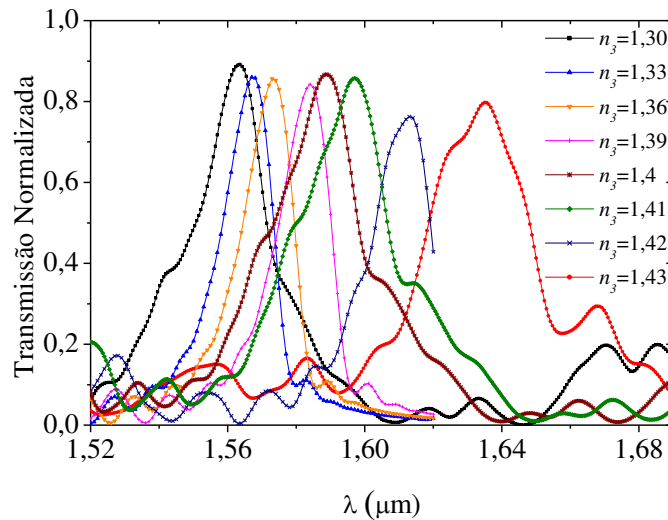


Figura 23. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF *no-core* de 80 μm para índices de refração externos com valores de $n_3=1,3$ até $n_3=1,43$.

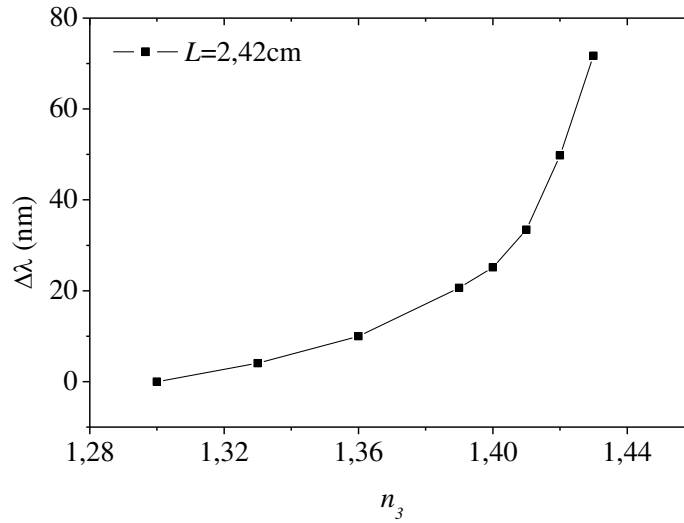


Figura 24. Deslocamento do pico em função do índice de refração para estrutura SMS com MMF *no-core* de 80μm.

Vê-se que o deslocamento total do pico de transmissão, ou pico de reimagem, foi de $\approx 70\text{nm}$. Nesta estrutura são excitados menos modos que na estrutura com MMF *no-core* de 125μm e a perturbação do meio externo sob os modos é maior, levando a atrasos de fase que geram um maior deslocamento da reimagem.

Finalmente, se estuda uma estrutura feita com uma MMF *no-core* de 55μm. A reimagem é localizada na posição 1,13cm no interior da MMF, de acordo com a Equação (17); enquanto que a simulação, com BPM, resulta em 1,15cm. O deslocamento do pico em função do comprimento de onda é maior que para as duas estruturas anteriores. A mudança no comprimento de onda do pico, para o intervalo 1,30 até 1,33, resulta em sensibilidade de 186nm/RIU enquanto que para o intervalo entre 1,42 até 1,43 é de 3550nm/RIU. Vê-se que o deslocamento total do pico tem um valor de $\approx 105\text{nm}$. Os resultados são apresentados nas Figura 25 e Figura 26, respectivamente.

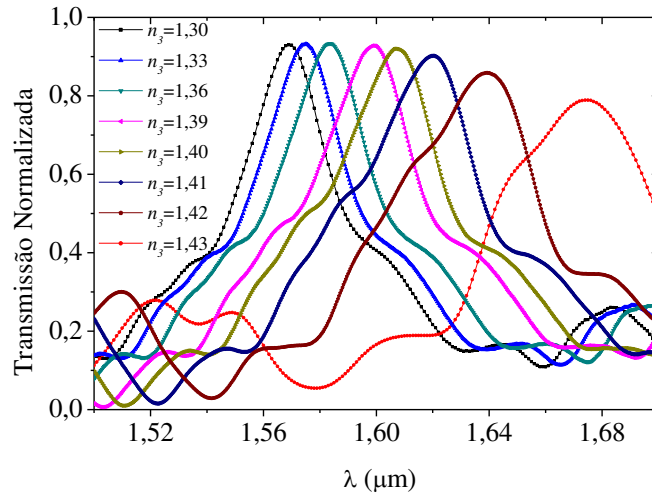


Figura 25. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para uma estrutura SMS com MMF *no-core* de 55μm para índices de refração externos com valores de $n_3=1,30$ até $n_3=1,43$.

A comparação das três estruturas é feita na Figura 27, onde se pode observar que a estrutura com MMF *no-core* de 55μm tem a maior sensibilidade.

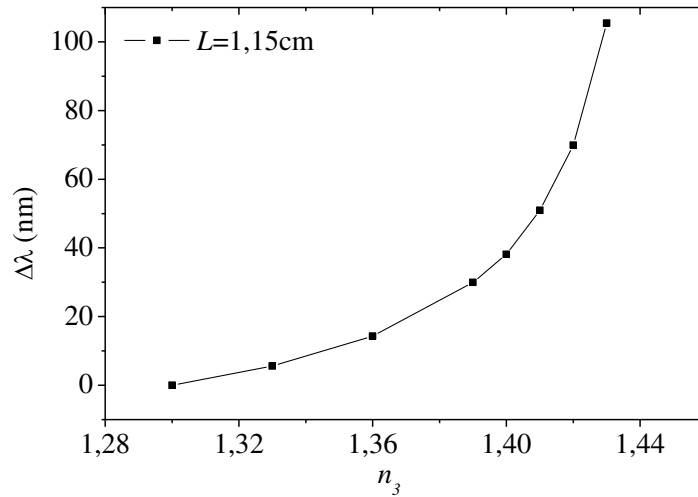


Figura 26. Delta do deslocamento do pico em função do índice de refração para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 55μm.

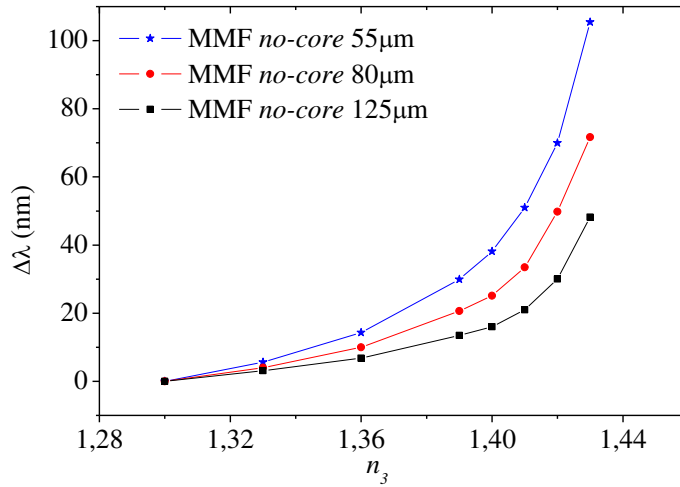


Figura 27. Comparação da mudança de comprimento de onda em função do índice de refração externo para as estruturas com MMF *no-core* de (125, 80, 55) μm .

Da Figura 21, Figura 23 e Figura 25 se vê que a largura espectral do pico de transmissão aumenta quando o raio da MMF diminui (tópico tratado no Capítulo 4); assim, para a MMF *no-core* de 55 μm se tem maior largura espectral que para a estrutura com MMF *no-core* de 80 e 125 μm ([25], [29]).

Os resultados experimentais confirmam as previsões das simulações. Esses resultados podem ser vistos na Figura 28. A parte experimental foi executada por Susana Silva [29] da Universidade de Porto-Portugal durante sua visita ao nosso laboratório no IFGW-UNICAMP.

Os resultados principais são resumidos [29] na Tabela 2. Nesta etapa, o estudo comparativo das simulações com os resultados experimentais foi principalmente qualitativo, indicando o mesmo tipo de comportamento e atingindo altas sensibilidades.

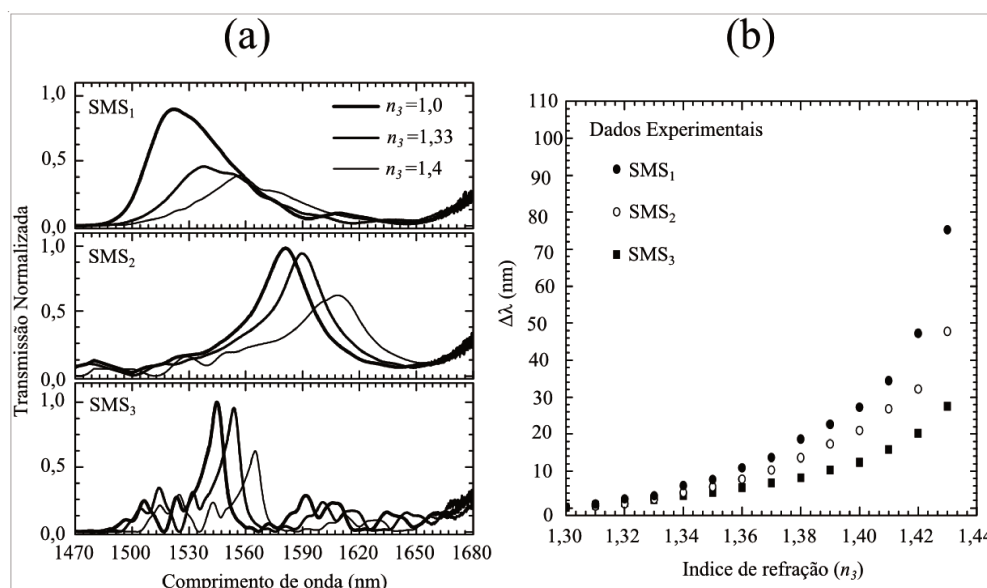


Figura 28. Resultado experimental para sensoriamento de índice de refração externo com MMF *no-core* de 125μm (SMS₃), 80μm (SMS₂) e 55μm (SMS₁). (a) Intensidade da transmissão em função do comprimento de onda, (b) mudança no comprimento de onda em função do índice de refração.

Tabela 2. Resultados de sensibilidade para o sensor de índice de refração com estruturas SMS.

Estrutura	Índice de refração (nm/RIU)			
	Intervalo IR* 1.30-1.33		Intervalo IR 1.42-1.43	
	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
MMF <i>no-core</i> 55	186	140	3550	2800
MMF <i>no-core</i> 80	134	98	2190	1560
MMF <i>no-core</i> 125	104	79	1820	735

*IR= Índice de refração

3.3 Sensoriamento de Temperatura

Tendo em consideração os resultados da seção de sensoriamento de índice de refração, a estrutura SMS para sensoriamento de temperatura [34] foi construída com uma MMF *no-core* de 55 μ m de diâmetro e duas seções SMF. Um líquido com índice de refração muito bem conhecido, comercializado pela empresa Cargille (valor nominal 1,4298 a 20°C e coeficiente termo-óptico de $3,95 \times 10^{-4}$ 1/°C), foi utilizado para cobrir toda a região multimodal, onde ocorreria a interação do modo óptico com o líquido pelo campo evanescente dos modos da MMF. O sensoriamento é baseado no efeito termo-óptico nos materiais da SMF e MMF principalmente no líquido externo [35], ou seja, a mudança de temperatura acarreta uma variação no índice de refração do líquido que ocasiona uma diferente variação no índice efetivo de cada um dos modos da seção MMF e que interagem com o líquido através do campo evanescente. A alteração dos índices efetivos dos múltiplos modos ópticos acarreta mudança de fase ao longo da seção MMF e, conseqüentemente, a alteração na posição da formação da reimagem. Como a seção MMF tem comprimento fixo, observa-se a variação de potência do sinal transmitido em função da variação de temperatura (comprimento de onda fixo), e também, a variação espectral do pico de transmissão, já que a reimagem volta a se formar no fim da seção MMF para outro comprimento de onda. Considerando-se um intervalo de temperatura entre 20°C e 100°C, observa-se que o pico de transmissão é deslocado para menores valores no comprimento de onda (Figura 29) com o incremento da temperatura.

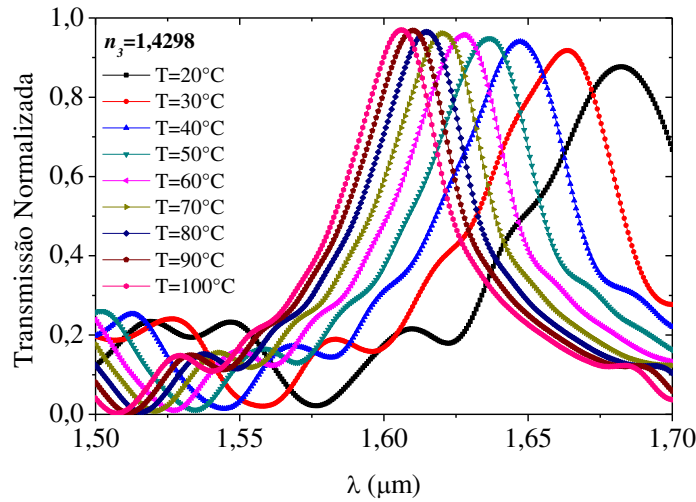


Figura 29. Intensidade de transmissão em função do comprimento de onda para temperaturas no intervalo entre 20°C – 100°C.

O deslocamento total do pico para o intervalo entre 20°C e 100°C foi de $\approx 68\text{nm}$. A maior sensibilidade à temperatura ocorre para o intervalo de 0 a 25°C, com o valor de $|-1880\text{pm}/^\circ\text{C}|$. Esse resultado é 100 vezes superior ao tipicamente encontrado na literatura, $13\text{pm}/^\circ\text{C}$, para uma estrutura do tipo SMS [31]. Com o aumento de temperatura a sensibilidade diminui até o valor aproximado de $|-360\text{pm}/^\circ\text{C}|$ (Figura 30).

A Figura 31 apresenta a variação espectral do pico de transmissão em função da temperatura, obtidos numérica e experimentalmente [29]. Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados e a comprovação de que a estrutura SMS pode resultar em sensores de alta sensibilidade e, neste caso, largo intervalo de operação ($\Delta T = 80^\circ\text{C}$).

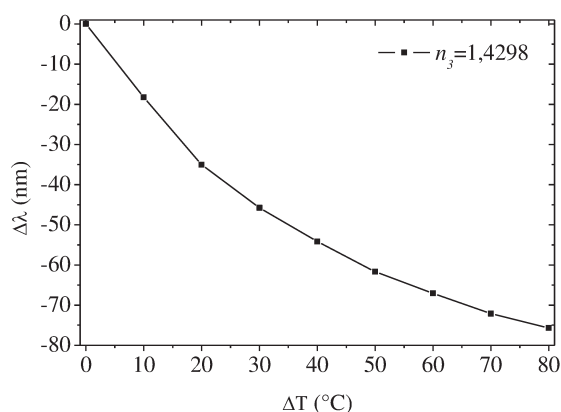


Figura 30. Deslocamento espectral do pico de transmissão em função da variação da temperatura.

A seguir, estuda-se a influência da utilização de outro líquido com índice de refração inferior ao apresentado acima. Denominaremos líquido 1 ao empregado no exemplo anterior (índice 1,4298 a 20°C e coeficiente termo-óptico de $3,95 \times 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$) e líquido 2 para um líquido de índice de refração 1,4198 a 20°C e coeficiente termo-óptico $3,95 \times 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, ambos disponíveis no catálogo da Cargille.

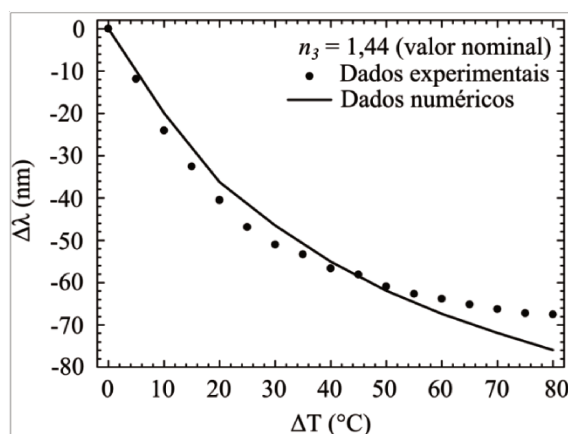


Figura 31. Comparação dos resultados experimentais e numéricos para o deslocamento espectral do pico de transmissão em função da mudança de temperatura.

A Figura 32 apresenta os resultados para o deslocamento espectral do pico de transmissão para a estrutura SMS com cada um desses líquidos. Pode-se observar que o arranjo com o líquido 1 tem maior sensibilidade que o arranjo com o líquido 2. Este resultado é esperado, pois, o índice do material da seção MMF é sílica, que tem índice de refração $\sim 1,444$ para 20°C e $\lambda = 1,55\mu\text{m}$. Deste modo, quanto mais próximo o índice de refração do líquido estiver do índice do material da MMF maior é a sensibilidade do sensor. Entretanto, menor será o intervalo de operação, já que uma menor variação de temperatura fará com que o índice do líquido se iguale ao da seção MMF ocasionando elevadas perdas por confinamento dos modos ópticos.

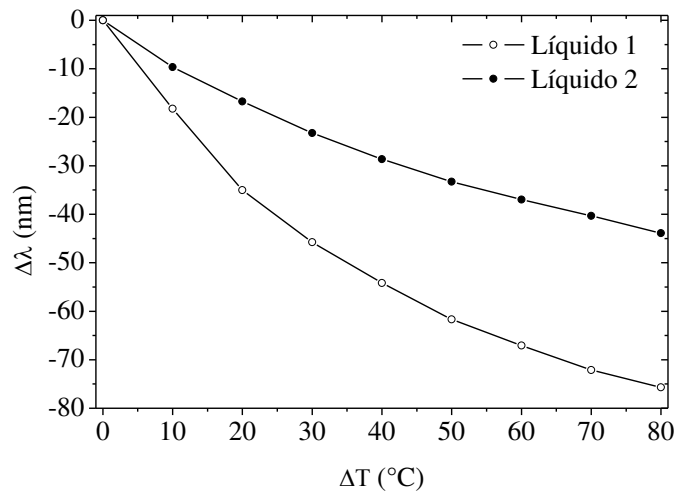


Figura 32. Comparação para líquidos Cargille para sensoriamento de temperatura.

3.4 Sensoriamento de curvatura

O projeto do sensor de curvatura envolve a construção de uma estrutura SMS, como as já apresentadas anteriormente. Entretanto, neste caso, o sensoriamento não é baseado na interação do campo evanescente dos modos ópticos da seção MMF com o material do meio externo. Por este motivo, além das seções MMF *no-core* de 55 e 125 μ m de diâmetro, foram também empregadas, nas simulações, seções MMF utilizando fibras ópticas comerciais da empresa ThorLabs, com núcleo dopado de 105 μ m e casca de 125 μ m de diâmetro. Este sensor apresenta mudança na intensidade do pico de transmissão, bem como, deslocamento espectral. Para sensoriamento baseado na mudança de intensidade de transmissão utilizou-se uma estrutura SMS com MMF ThorLabs 105/125 (Figura 34), bem como, uma MMF *no-core* de 125 μ m (Figura 35). Para o sensoriamento com deslocamento espectral do pico de transmissão, foram utilizadas estruturas SMS com MMF *no-core* de 125 μ m e 55 μ m de diâmetro. O deslocamento espectral é estudado para a reimagem e também para um ponto de mínima transmissão (vale). A Figura 33 mostra a reimagem e um vale.

3.4.1 Sensoriamento de curvatura com mudança na intensidade do sinal transmitido

A Figura 34 apresenta o deslocamento do espectro de transmissão para alguns raios de curvatura (R) da estrutura SMS com seção MMF da ThorLabs (105/125). Esses picos de transmissão correspondem à formação da reimagem no fim da seção MMF. Pode-se observar que a intensidade do sinal diminui quando o raio de curvatura diminui (maior curvatura).

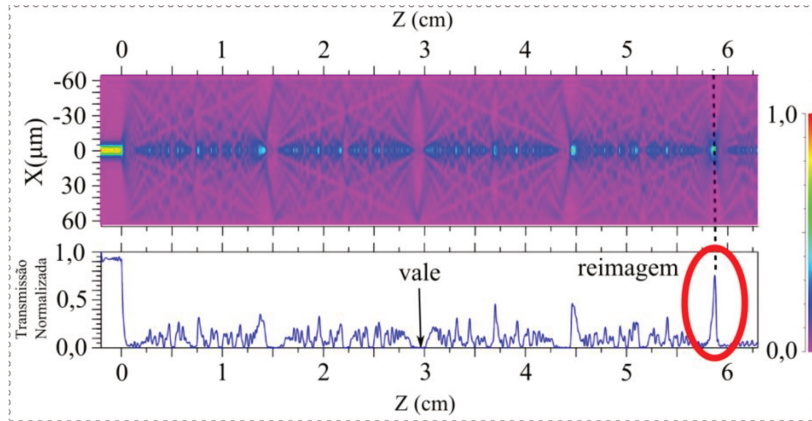


Figura 33. Perfil de campo para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125μm mostrando um vale e a primeira reimagem.

Para uma variação no raio de curvatura de 50cm para 10cm, ocorre uma diminuição na transmissão do sinal óptico de 60% para 5%.

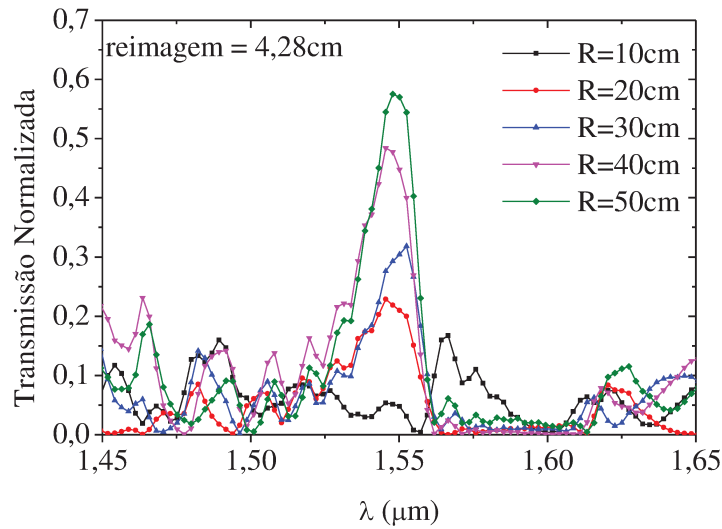


Figura 34. Variação na intensidade do sinal de transmissão (reimagem) para sensoriamento de curvatura em estruturas SMS com MMF ThorLabs 105/125 e para raios de curvatura entre 10cm e 50cm.

A amplitude óptica ao final da estrutura SMS pode ser utilizada para a construção de um sensor de curvatura. Devido à curvatura, os modos guiados da seção multimodal vão perdendo energia ao longo do eixo de propagação formando, na reimagem, um sinal com transmissão reduzida.

A resposta para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μ m para a parte final da MMF entre comprimento da fibra de ~45mm e ~62mm com fibras diferentes, onde se apresenta a primeira reimagem, se vê na Figura 35. Para a fibra sem curvatura a reimagem ocorre ao final de uma seção MMF de 5,89cm de comprimento. Quando a estrutura SMS é curvada, o sinal transmitido diminui de amplitude com a diminuição do raio de curvatura. Assim, quando a fibra está reta, a transmissão na reimagem tem uma intensidade de 80% (Figura 35(a)) e quando o raio de curvatura é 30cm, a transmissão na reimagem é reduzida para 30% (Figura 35(c)).

3.4.2 Sensoriamento de curvatura com deslocamento espectral

Para o sensoriamento de curvatura também se estudou o deslocamento espectral do pico de máxima transmissão [28] e, também, o pico de rejeição ou baixa transmissão (“vale”), como se vê na Figura 33. Para estudar o deslocamento espectral na condição de alta transmissão se utilizou uma estrutura SMS com seção MMF *no-core* de 125 μ m de diâmetro e comprimento de 5,89cm, bem como, uma seção MMF *no-core* de 55 μ m de diâmetro, com comprimento de 1,15cm. Nos resultados apresentados na Figura 36(a) observa-se que o deslocamento do pico de transmissão é de aproximadamente 2,5nm para a estrutura com MMF *no-core* de 125 μ m.

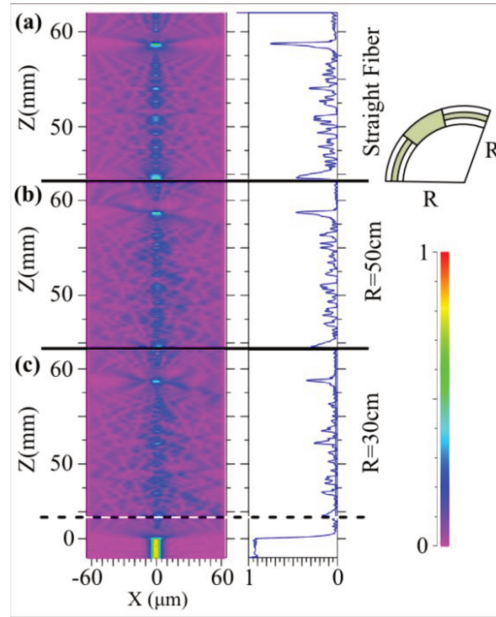


Figura 35. Padrão de interferência do sinal óptico ao longo da estrutura SMS (Ao final da MMF *no-core* de 125μm). (a) Estrutura sem curvatura (b) Estrutura com raio de curvatura de 50cm (c) Estrutura com raio de curvatura 30cm.

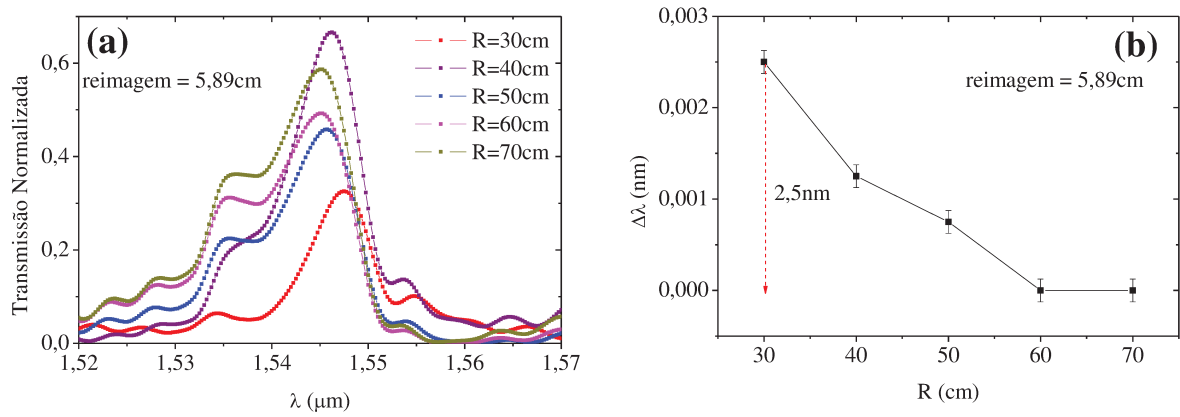


Figura 36. Sensoriamento de curvatura. Deslocamento do pico de transmissão (condição de reimagem) numa estrutura SMS com MMF *no-core* 125μm. (a) Intensidade de transmissão normalizada para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do pico de transmissão da reimagem em função do raio de curvatura.

Com a diminuição do raio de curvatura a condição de reimagem ocorre para menores comprimentos de onda (Figura 36(b)). A sensibilidade à curvatura é de $\sim 0.083\text{nm/cm}$ (deslocamento espectral / raio de curvatura).

O deslocamento para a estrutura com SMS, com fibra MMF *no-core* de $55\mu\text{m}$, é contrario ao apresentado na estrutura anterior. Ou seja, o pico é deslocado para comprimentos de onda maiores (Figura 37) e a mudança do pico de transmissão com o raio de curvatura para o intervalo entre 30cm e 40cm é de $0,07\text{nm/cm}$ (deslocamento espectral/raio de curvatura) enquanto que para o intervalo entre 60cm e 70cm é de $0,01\text{nm/cm}$.

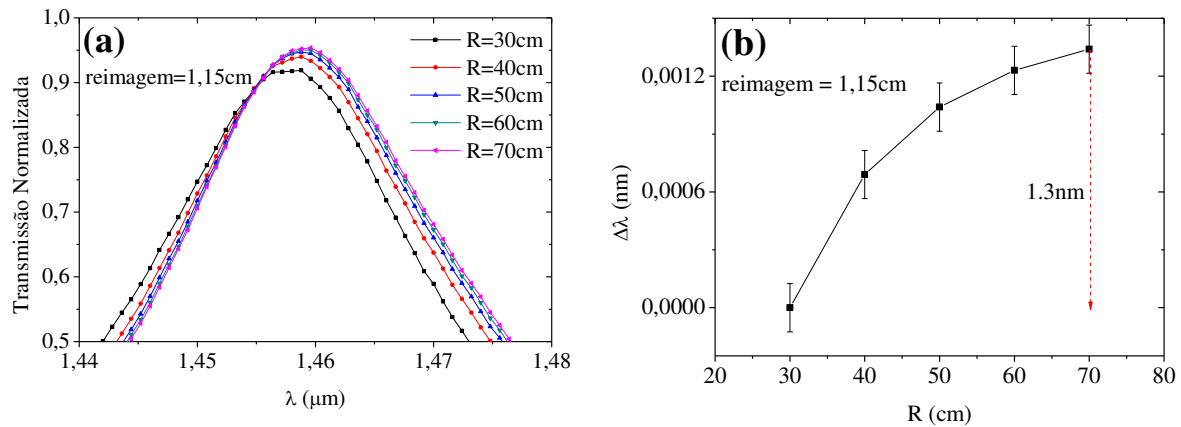


Figura 37. Sensoriamento de curvatura. Deslocamento do pico de transmissão (condição de reimagem) numa SMS com MMF *no-core* de $55\mu\text{m}$. (a) Intensidade de transmissão normalizada, para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do pico de transmissão da reimagem, em função do raio de curvatura.

O deslocamento espectral dos picos de baixa transmissão também podem ser utilizados como parâmetro de monitoramento da curvatura. Para o deslocamento espectral para vales [32] se utilizou uma estrutura SMS com uma MMF *no-core* de 125 μm com comprimento de 1,40cm, que apresenta um claro pico de baixa transmissão, como se observa na Figura 33. Para melhor representar baixas intensidades de transmissão, será utilizada escala em decibéis, como para os resultados da Figura 38. Depois de encontrar o vale com menor transmissão procede-se o estudo do efeito da curvatura sob o pico de baixa transmissão, como se observa na Figura 39. O pico de menor transmissão tem deslocamento para maiores comprimentos de onda, quando o raio de curvatura diminui de 70cm para 30cm. O pico de baixa transmissão tem comportamento similar ao do pico de máxima transmissão (reimagem). A mudança media é de: 0,04nm/cm (deslocamento espectral/raio de curvatura).

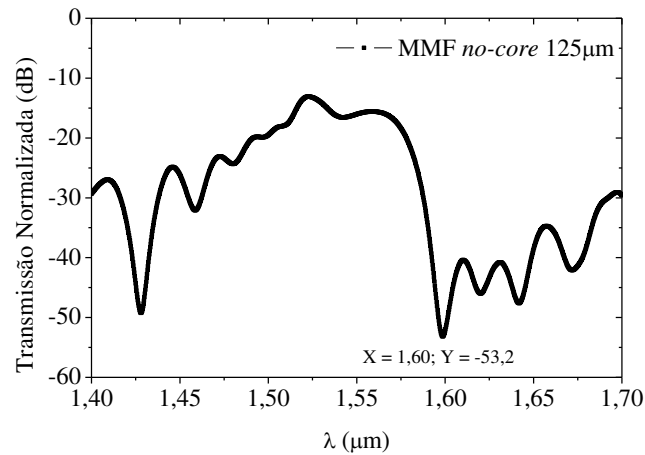


Figura 38. Pico de baixa transmissão da estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μm de diâmetro.

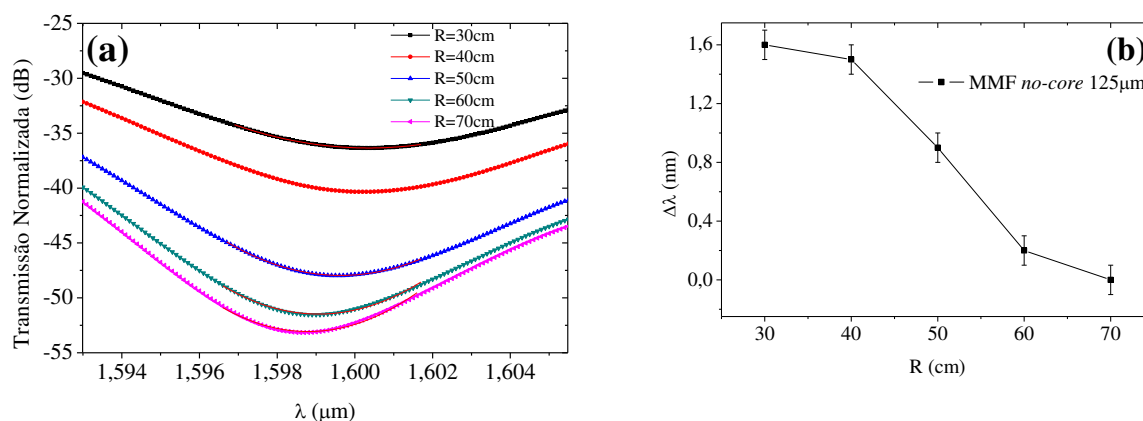


Figura 39. Detalhe da região de baixa transmissão espectral da estrutura SMS com MMF *no-core* 125 μm de diâmetro para alguns raios de curvatura. (a) Transmissão em função do comprimento de onda para raios de curvatura de 30cm a 70cm. (b) Deslocamento do pico de baixa transmissão em função do raio de curvatura.

Estudo similar foi realizado para uma estrutura SMS com MMF *no-core* de 55 μm de diâmetro e comprimento de 2,64cm para a qual se obtém um pico de mínima transmissão em comprimento de onda próximo de 1,55 μm (Figura 40).

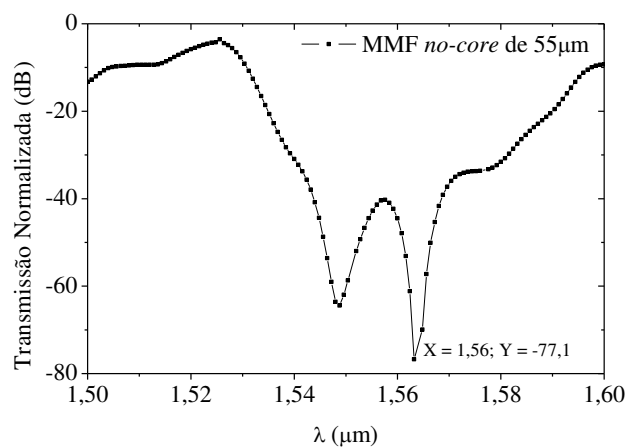


Figura 40. Transmissão em função do comprimento de onda para a estrutura SMS com MMF *no-core* de diâmetro 55 μm .

Contrariamente ao caso anterior, o deslocamento do pico de baixa transmissão ocorre na direção de menores comprimentos de onda com a diminuição do raio de curvatura (Figura 41). Na Figura 41(b) pode-se observar que a sensibilidade do sensor, utilizando-se o pico de baixa transmissão, é de 0,25nm/cm para raios de curvatura variando de 30 a 40cm e de 0,032nm/cm para raios de curvatura entre 60 e 70cm. Isso implica que o sensor apresenta maior sensibilidade para menores raios de curvatura. Este comportamento é similar ao obtido com o monitoramento do deslocamento espectral do pico de máxima transmissão da estrutura SMS com MMF *no-core* de 55 μ m de diâmetro.

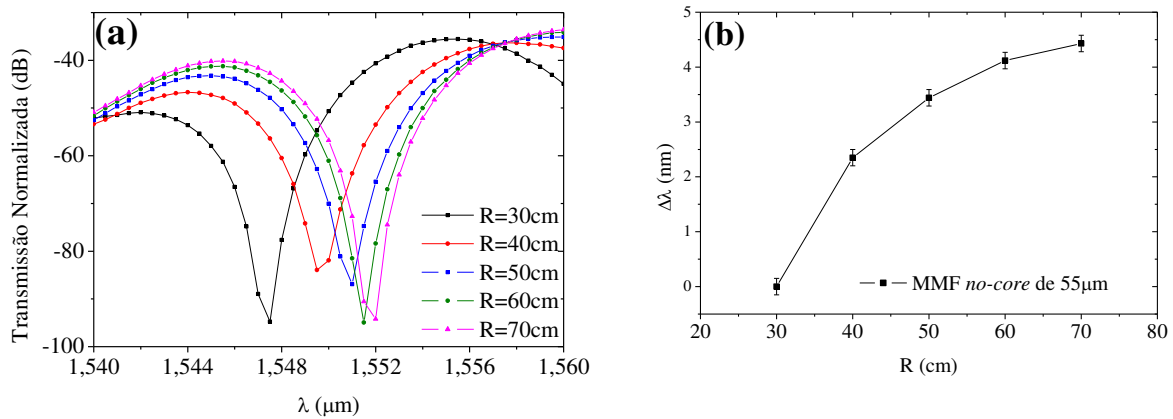


Figura 41. Caracterização da variação espectral do pico de baixa transmissão de uma estrutura SMS com MMF *no-core* de 55 μ m de diâmetro, em função do raio de curvatura. (a) Transmissão espectral para raios de curvatura entre 30cm e 70cm. (b) Deslocamento do comprimento de onda do pico de baixa transmissão em função do raio de curvatura.

Os resultados principais são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de sensibilidade para o sensor de curvatura com estruturas SMS.

Estrutura	Sensibilidade (nm/cm) (deslocamento espectral/raio curvatura)	
	Intervalo R (30-60)cm	Intervalo R (30-70)cm
MMF <i>no-core</i> 125 (reimagem)	0,083	---
MMF <i>no-core</i> 125 (vale)	---	0,04
	Intervalo R (30-40)cm	Intervalo R (60-70)cm
MMF <i>no-core</i> 55 (pico reimagem)	0,07	0,01
MMF <i>no-core</i> 55 (vale)	0,25	0,03

Pode-se observar que a maior sensibilidade foi obtida para pequenos raios de curvatura e para a MMF *no-core* de 55 μ m de diâmetro. Para a estrutura com MMF *no-core* de 125 μ m é difícil fazer uma comparação devido à irregularidade nos resultados, como se vê na Figura 36 e Figura 39. O deslocamento dos picos de transmissão nas estruturas com MMF *no-core* de 125 μ m de diâmetro é oscilante com o aumento de raio de curvatura (não segue uma mesma direção), como se vê na Figura 36 e Figura 39. Assim, somente se pode ter uma meia dos intervalos.

Capítulo 4

Largura Espectral

Com o objetivo de melhorar a resolução dos sensores refractométricos desenvolvidos no Capítulo 3, especificamente o sensor de índice de refração, se fez o estudo da largura espectral do sinal transmitido (condição de reimagem). Um sensor com elevada resolução se caracteriza por um bem distinto pico de transmissão com pequena largura medida à meia altura do pico (FWHM). Os parâmetros para a determinação FWHM são mostrados na Figura 42.

4.1 Análise da largura espectral do sensor de índice de refração com alta sensibilidade

As análises numéricas foram desenvolvidas utilizando-se complementarmente os programas

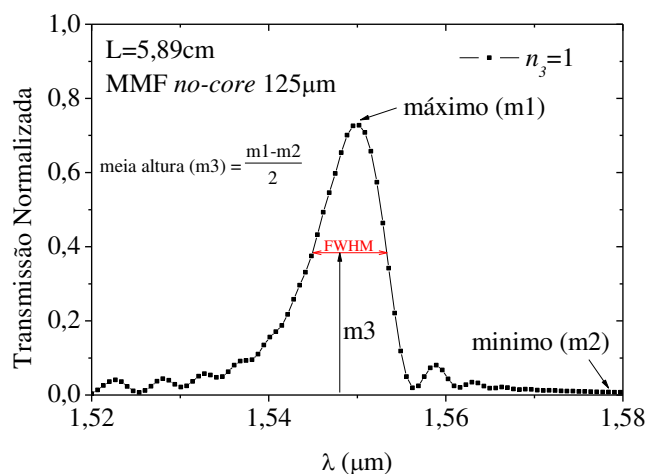


Figura 42. Parâmetros para achar a FWHM do sinal de transmissão.

comerciais baseados: no método de propagação de feixe (BPM da RSOFT Design Group) e no método de expansão modal (FimmProp da Photon Design).

A largura espectral (FWHM) é estudada para três estruturas SMS com diâmetros da seção MMF (ϕ_{MMF}) de 55, 78 e 125 μm (Figura 43), levando em consideração a eficiência no acoplamento entre os modos da seção monomodo SMF e seção multimodo MMF [36].

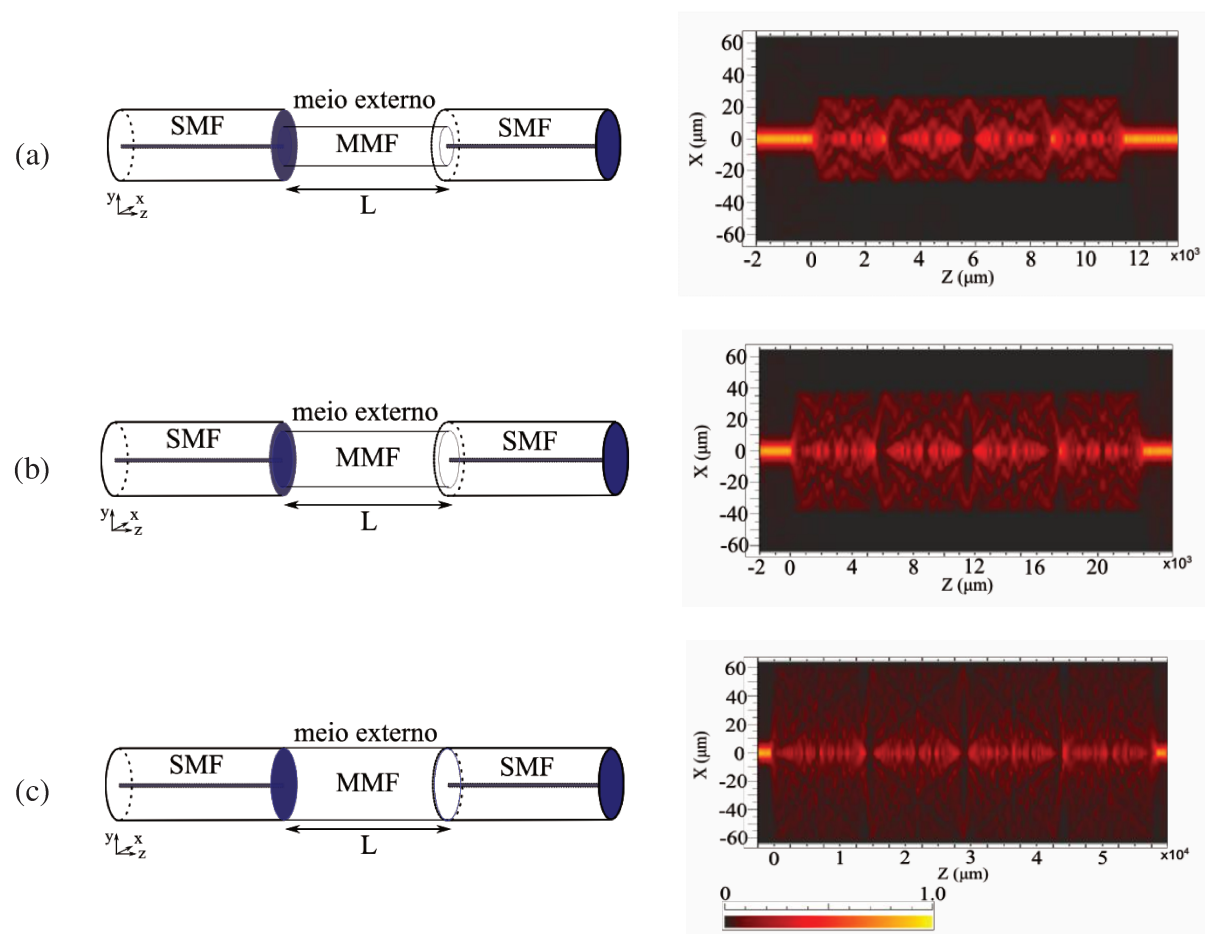


Figura 43. Estruturas SMS e padrão de interferência para seções MMF com diâmetros (ϕ_{MMF}) de (a) 55 μm , (b) 78 μm e (c) 125 μm .

Na Figura 43 se apresenta o padrão de interferência no plano xz para as estruturas SMS com diâmetros (ϕ_{MMF}) da MMF de 55 μm (Figura 43(a)), 78 μm (Figura 43(b)) e 125 μm (Figura 43(c)), respectivamente. Para um índice de refração externo $n_3=1,0$, foram calculadas as posições da reimagem (L) na seção MMF. Utilizando o método de expansão modal obteve-se 1,14cm, 2,28cm e 5,84cm para a posição da reimagem de seções com os seguintes diâmetros 55 μm , 78 μm e 125 μm , respectivamente. Observa-se uma pequena diferença entre esses valores e os obtidos com o método de propagação de feixe determinados no Capítulo 3. A Tabela 4 mostra a comparação dos valores para as posições das reimagens.

Tabela 4. Comparação dos resultados para reimagem com os métodos de simulação BeamProp-Rsoft e FimmProp-Photon Design.

	Posição da primeira reimagem na seção MMF (μm)	
Estrutura	BPM (Rsoft)	Expansão de modos (Photon Design)
SMS com MMF <i>no-core</i> 55 μm	1,13	1,14
SMS com MMF <i>no-core</i> de 78 μm	2,42*	2,28
SMS com MMF <i>no-core</i> de 125 μm	5,89	5,84

* Valor determinado para uma SMS com MMF de 80 μm .

Da Tabela 4 observa-se a diferença entre os valores calculados para a posição da primeira reimagem, obtidas pelos métodos BPM e expansão de modos.

Com o intuito de comparação com os resultados apresentados no Capítulo 3, foram novamente simuladas as estruturas SMS com o programa baseado no método de expansão modal (Photon Design). As três estruturas SMS com diâmetros de 55 μm , 78 μm e 125 μm foram modeladas e os resultados mostrados nas Figura 44 e Figura 45. A Figura 44 apresenta as transmissões espectrais normalizadas para diferentes valores de índice de refração do meio externo, enquanto a Figura 45 sumariza os resultados de sensibilidade das três estruturas SMS, calculadas pelo programa Photon Design.

A curva para a SMS com ϕ_{MMF} de 55 μm apresenta a maior sensibilidade para todo intervalo em índice de refração, com uma media de 827nm/RIU sobre o intervalo de 1,30 a 1,44 [29], como mostrado no Capítulo 3.

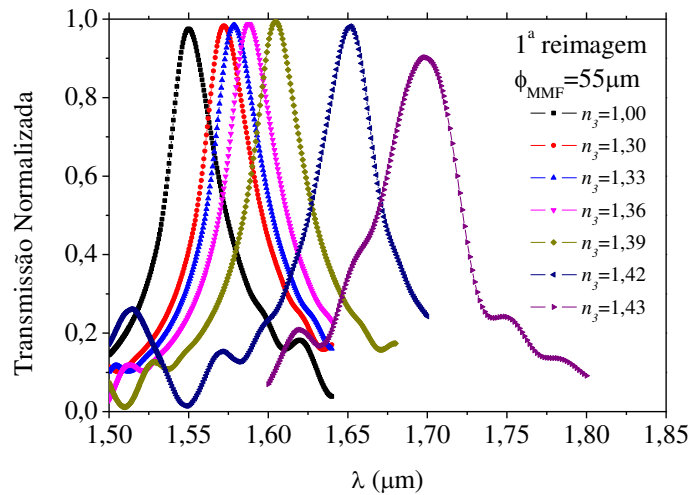


Figura 44. Transmissão espectral normalizada da estrutura SMS com MMF *no-core* de 55 μm de diâmetro para diferentes valores de índice de refração externo.

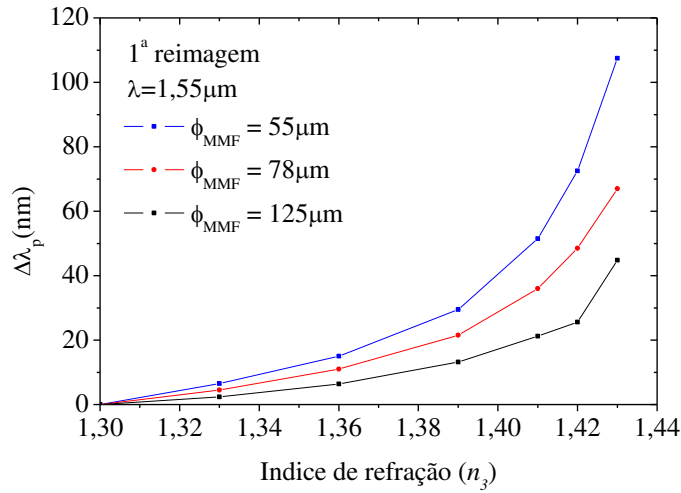


Figura 45. Deslocamento espectral do pico de transmissão (λ_p) como função do índice de refração externo para as estruturas SMS com ϕ_{MMF} de 55 μm , 78 μm e 125 μm .

Os resultados dessa estrutura podem ser comparados com o desenvolvido em [37], que utiliza uma estrutura taper MMI. A sensibilidade média obtida no presente trabalho é de 1010nm/RIU, duas vezes superior ao obtido em [37] (~487nm/RIU) para um intervalo de índice de refração de 1,33 a 1,44. Uma sensibilidade máxima de 3500nm/RIU é alcançada próximo ao índice de refração de ~1,43, este valor é 80% superior ao obtido em [37] (~1913nm/RIU). Da Figura 45 observa-se que os índices para os quais se obtém maior sensibilidade são aqueles próximos do índice de refração do material da seção multimodal, no caso uma seção MMF *no-core* de sílica.

Com a intenção de entender quais parâmetros influenciam na largura espectral dos picos de transmissão associados às reimagens, foram realizados estudos para determinar a eficiência de acoplamento entre modos na junção entre as fibras monomodo (SMF) e seção multimodo (MMF). A Figura 46(a) mostra a eficiência de acoplamento modal entre o modo fundamental

da SMF e os modos radiais da MMF, como função do diâmetro da MMF, calculada usando a Eq.(23) do Capítulo 2. A distribuição de campo elétrico dos primeiros seis modos radiais é apresentada na Figura 46(b). Os modos radiais têm ao menos duas ordens de grandeza maiores na eficiência de acoplamento com o modo fundamental da SMF que os modos azimutais na seção MMF. Por esse motivo, os modos azimutais serão desconsiderados nas análises deste trabalho.

Da Figura 46(a) observa-se que, para a estrutura SMS com fibra SMF (fibra SMF-28 da Corning) e seção MMF de diâmetro $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$, o acoplamento máximo ocorre para o segundo modo da seção MMF e também se observa que a curva inclui poucos modos

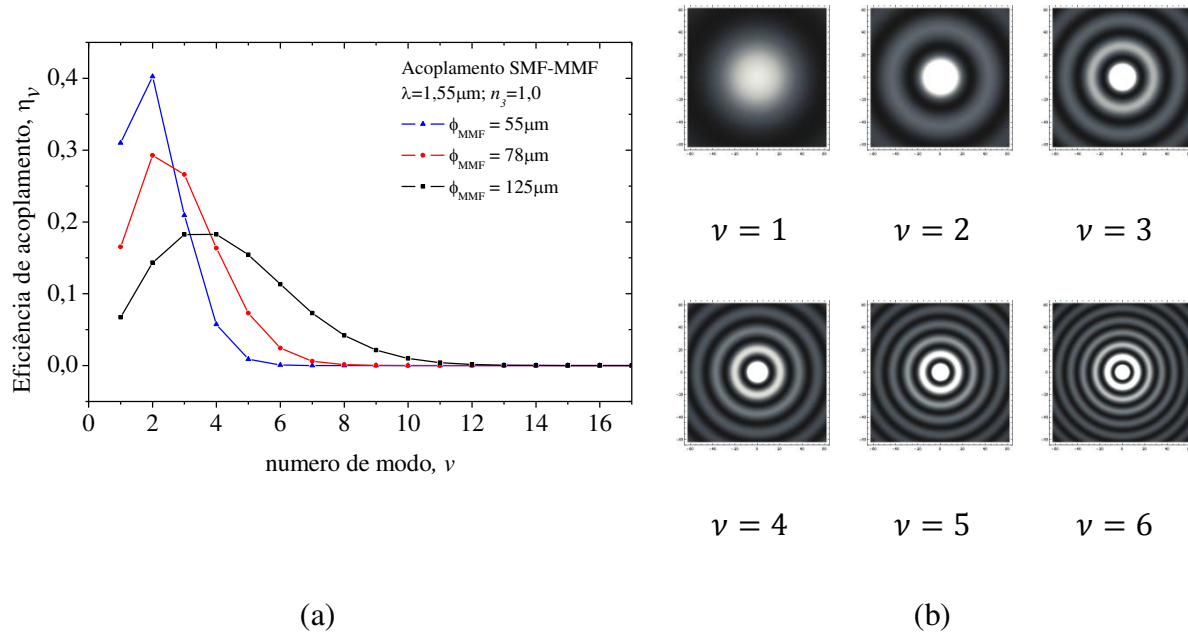


Figura 46. Eficiência de acoplamento entre o modo fundamental da SMF e os modos radiais da seção MMF *no-core* em função da ordem do modo (v). O gráfico apresenta a eficiência para três diâmetros da seção MMF.

excitados. Por outro lado, para as estruturas SMS com MMF de diâmetro de 78 μm e 125 μm , aumenta-se a ordem do modo que tem maior eficiência de acoplamento e mais modos são excitados na seção MMF, chegando a 11 modos para a MMF com 125 μm .

A largura espectral de transmissão à meia altura (FWHM) aumenta quando o diâmetro da MMF diminui ou quando aumenta o índice de refração externo (Figura 44). O maior aumento se obteve quando o índice de refração externo está próximo do valor do índice de refração do núcleo da seção MMF *no-core* (Figura 47) e para a estrutura com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$.

A Figura 48 mostra as curvas para largura espectral em função do comprimento de onda para as estruturas SMS com $\phi_{\text{MMF}} = 55\mu\text{m}$, 78 μm e 125 μm e índice do meio externo $n_3=1.0$. Neste caso, é possível observar a mudança na largura espectral (FWHM) com a variação do diâmetro da seção MMF. Vê-se que a FWHM para a fibra com MMF *no-core* de 55 μm é

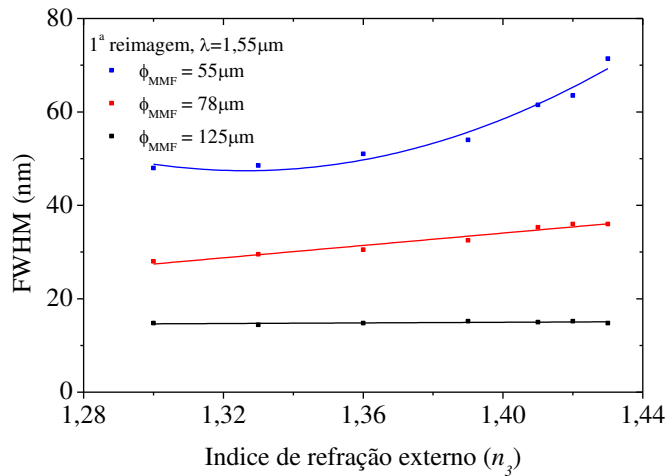


Figura 47. Largura espectral das estruturas SMS para mudança no índice de refração externo. Resultados para diâmetros da seção MMF de 55 μm , 78 μm e 125 μm .

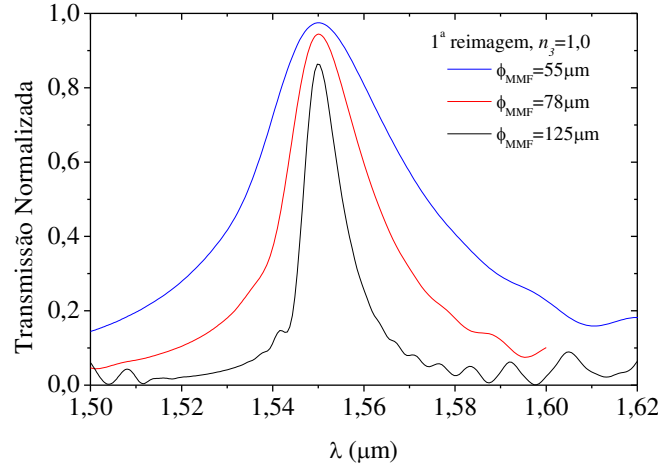


Figura 48. Transmissão espectral de estruturas SMS com diâmetros da MMF iguais a: 55μm, 78μm e 125μm.

maior que a largura espectral da estrutura SMS com MMF *no-core* de 78μm e 125μm sendo seus valores: 41,12nm, 24,49nm e 9,40nm, respectivamente.

Das Figura 46 e Figura 48 observa-se que a FWHM depende fortemente do número de modos radiais excitados na seção MMF e, também, de sua eficiência de acoplamento com o modo fundamental da SMF. Se poucos modos são excitados na seção MMF, o modo com maior eficiência de acoplamento tem baixa ordem e, como resultado, obtém-se uma maior largura espectral (FWHM) para o pico de transmissão. Por outro lado, se muitos modos são excitados na seção MMF, como no caso em que $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$, a FWHM passa a ser menor.

Também se vê que a FWHM muda com a ordem da reimagem (Figura 49), reduzindo-se para reimagens de ordem maior. Pode-se observar na Figura 49 as larguras espectrais para três ordens de reimagem. A primeira reimagem de uma estrutura SMS com seção *no-core* de diâmetro 55μm é da ordem de 41,12nm. A segunda e terceira reimagens têm larguras

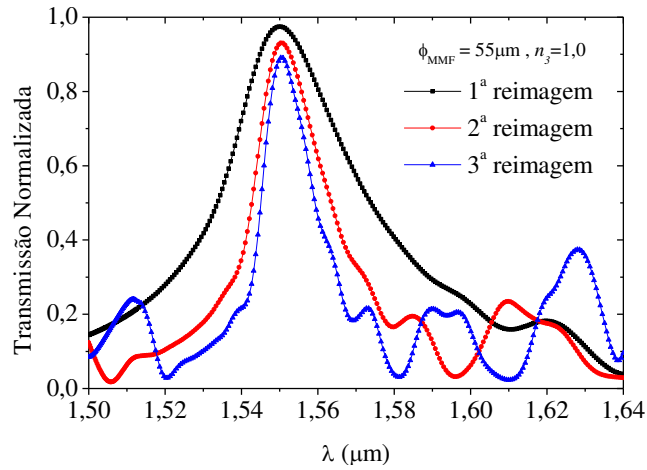


Figura 49. Transmissão espectral da estrutura SMS com MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ e $n_{\text{liq}}=1,0$, para as três primeiras reimagens formadas na região multimodal.

espectrais de valores 22,57nm e 15,87nm, respectivamente. Essa mudança na largura espectral é dependente do número de modos que chegam em fase na posição da reimagem.

Assim, para uma estrutura SMS com seção MMF de 125 μm de diâmetro, foi investigada a evolução de fase de cada modo excitado, ao longo da seção MMF. O que se observa é que na localização das reimagens há vários modos em fase, mas não todos os modos obedecem esta condição. Em especial, nota-se que para a primeira reimagem mais modos radiais estão em fase do que nas posições para a segunda e terceira reimagem. A Figura 50 apresenta a fase dos onze primeiros modos da seção MMF, na posição das três reimagens. À medida que menos modos chegam em fase, devido à diferença de fase acumulada, mais estreita é a largura espectral. A reimagem fica espacialmente mais definida no interior da seção MMF o que acarreta também uma mais rápida queda de transmissão com a alteração do comprimento de onda e isto se traduz em redução da largura espectral.

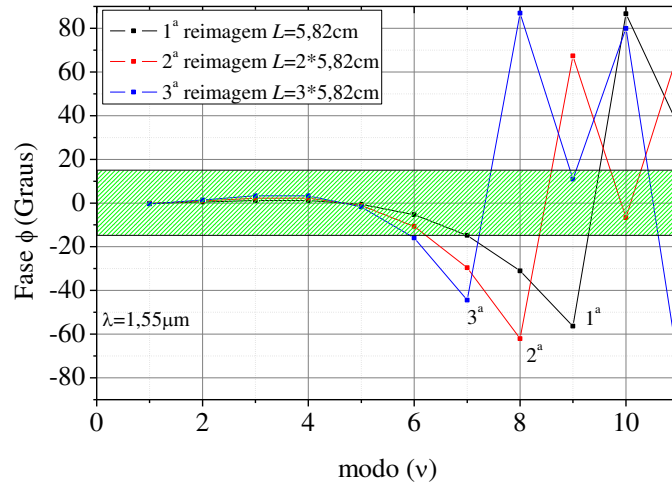


Figura 50. Fase dos onze primeiros modos da seção MMF nas posições da primeira, segunda e terceira reimagens para a estrutura SMS com MMF *no-core* de 125μm.

Também se estudou a mudança na largura espectral quando é excitado um número específico de modos radiais da estrutura SMS com MMF *no-core* de 125μm e com $n_3=1,0$. É possível observar que a largura espectral é reduzida quando o número de modos aumenta (Figura 51). Assumindo 3, 4, 7, 10 modos tem-se largura espectral de 71, 27, 15 e 10nm, respectivamente. Assim, neste caso, para se obter um correto espectro de transmissão é necessário usar pelo menos 10 modos radiais.

Com o intuito de se reduzir a largura espectral do sensor interferométrico para índice de refração, baseado na estrutura SMS com seção MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ (FWHM de 50nm), buscou-se incrementar a eficiência no acoplamento entre os modos na junção SMF-MMF, para excitar mais modos na seção MMF. Uma forma de atingir esse objetivo é mudar a SMF na entrada e saída da estrutura.

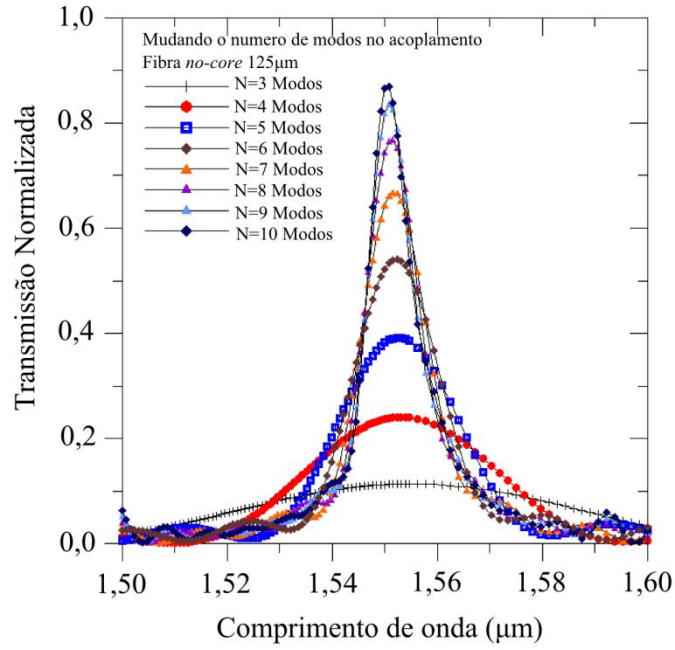


Figura 51. Largura espectral da transmissão de estrutura SMS com MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ e índice externo de 1.0 (n_3). Estudo da variação da largura espectral com o número de modos da seção MMF utilizados na simulação.

A Figura 52(a) apresenta a eficiência de acoplamento de uma estrutura SMS com seção MMF de $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$, na qual a SMF padrão (SMF-28) é trocada por uma fibra monomodo com diferente abertura numérica (NA). A abertura numérica é definida como:

$$NA = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{casca}}^2} = \text{sen } \theta, \quad (25)$$

onde θ define o cone permitido para a existência de reflexão interna total na fibra óptica. Na Figura 53 se mostram os parâmetros necessários para determinar a NA.

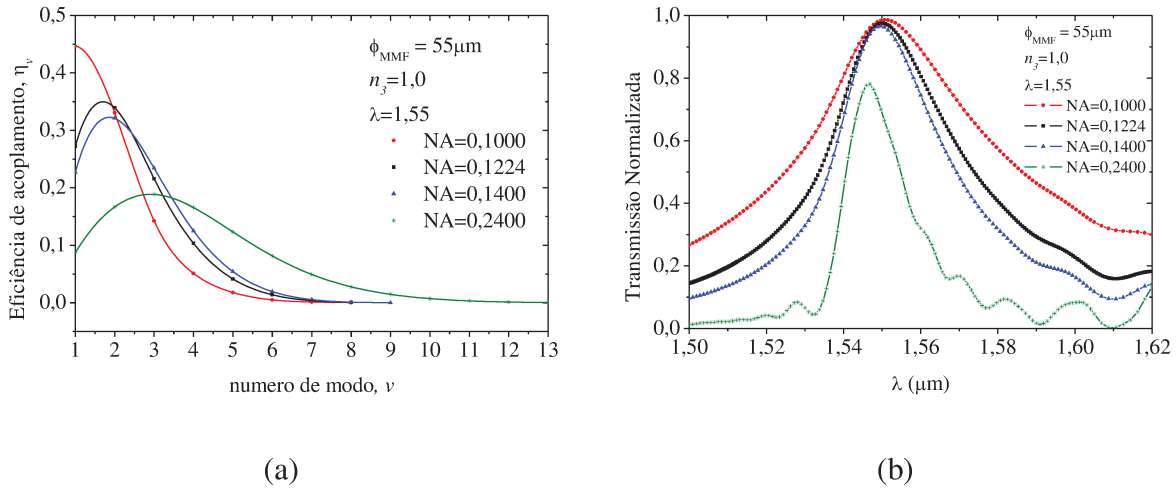


Figura 52. Caracterização de estruturas SMS com fibras SMF de diferentes aberturas numéricas. (a) Eficiência de acoplamento entre modos na junção SMF-MMF em função da ordem do modo na seção MMF. (b) Transmissão espectral para fibras SMF com diferentes aberturas numéricas.

O incremento da abertura numérica da fibra SMF aumenta o ângulo da aceitação permitindo que modos de alta ordem sejam mais eficientemente excitados na seção MMF, como consequência o pico de transmissão da estrutura SMS tem redução na largura espectral.

A Figura 52(b) mostra a transmissão espectral das estruturas SMS com fibras SMS de diferentes aberturas numéricas. Pode-se observar que aumentando a abertura numérica de 0,1000 até 0,2400 é possível obter uma redução de 65% na largura espectral, passando a ser

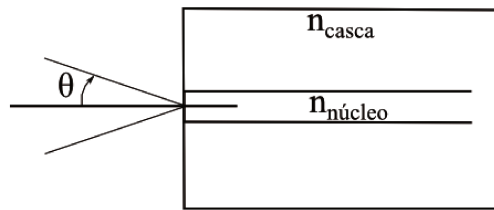


Figura 53. Parâmetros que definem a abertura numérica.

FWHM=17,8 nm. Pode-se observar também que para a abertura numérica 0,2400 ocorre acentuada redução na amplitude do pico de transmissão. Acredita-se que a maior abertura numérica ocasione, na junção SMF-MMF, uma difração dos raios luminosos em ângulos acima do ângulo crítico ocasionando perda de parte do sinal óptico e consequente redução da energia transmitida.

Outra forma de reduzir a largura espectral é construir uma estrutura SMS mista, com diferentes seções em sequência.

4.2 Estrutura Mista com MMF *no-core* de 55 μm e MMF *no-core* de 125 μm

Com o intuito de melhorar a resolução (redução da largura espectral) do sensor refractométrico incluímos a modelagem de uma estrutura mista com uma seção MMF *no-core* de 55 μm e uma seção MMF *no-core* de 125 μm (Figura 54).

O projeto da estrutura SMS mista requer a definição de comprimentos específicos para as seções MMF *no-core* $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ (L_{125}) e da MMF *no-core* $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ (L_{55}).

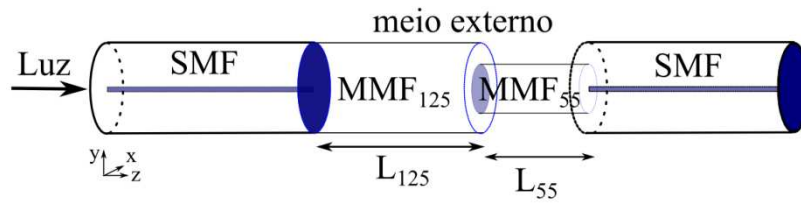


Figura 54. Estrutura mista com duas seções MMF *no-core* de diâmetros 125 μm e 55 μm .

O comprimento da MMF *no-core* de $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ foi fixado em $L_{125}=4,44\text{cm}$ enquanto que o comprimento da MMF *no-core* $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ foi modificado até encontrar-se um pico com alta transmissão (Figura 55). O comprimento efetivo encontrado para a MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ foi de $0,29\text{cm}$ com uma transmissão de 80% aproximadamente.

Para determinar a resposta da estrutura alterou-se o índice de refração do meio externo para valores entre 1,30 e 1,43 (Figura 56). Na Figura 56(c), pode-se observar que a largura espectral, para a estrutura SMS mista, tem valores intermediários aos valores de largura espectral obtidos para as estruturas SMS com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ (Figura 56(a)) e $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ (Figura 56(b)). A redução na largura espectral é apreciável e os picos de transmissão têm sua posição quase inalterada, mantendo-se a elevada sensibilidade obtida para a estrutura SMS com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ e assim resultando em melhoria na resolução do sensor.

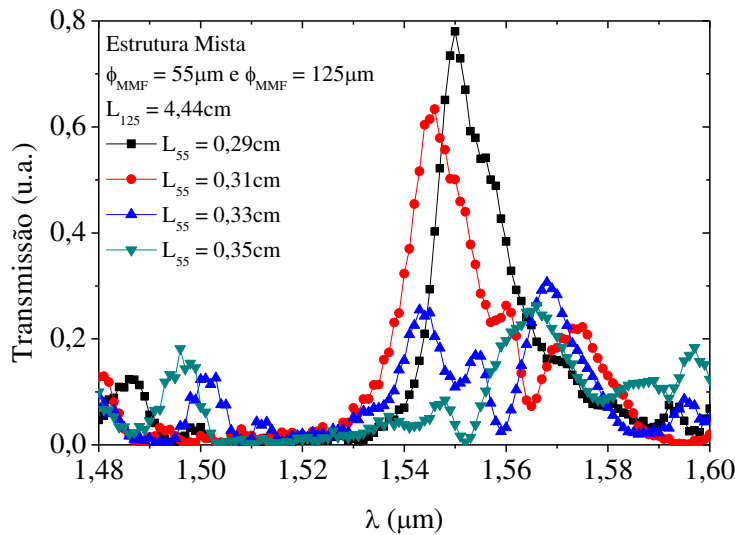


Figura 55. Transmissão espectral da estrutura SMS mista.

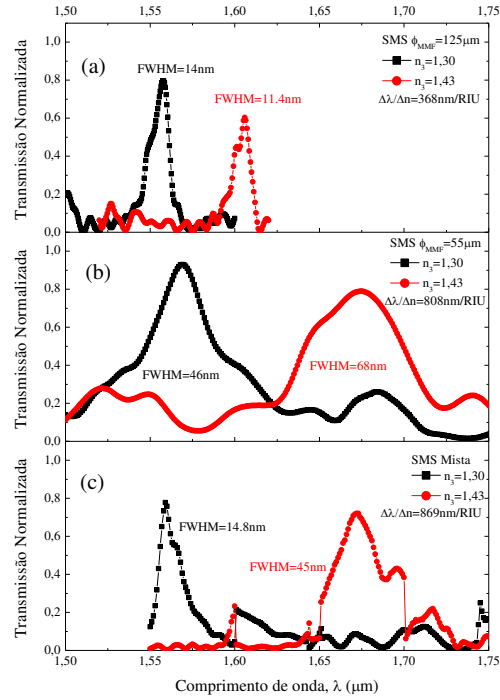


Figura 56. Deslocamento do pico de transmissão espectral para: (a) estrutura SMS com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$, (b) estrutura SMS com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ SMS e (c) estrutura SMS mista, para diferentes valores de índice de refração do meio externo (1,30 e 1,43).

Para complementar o estudo anterior modelou-se duas estruturas SMS mistas invertendo-se a ordem das seções multimodo. A primeira estrutura conta com uma seção MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=125\mu\text{m}$ no lado da entrada do sinal óptico, com comprimento de 5,84cm, e em seguida uma seção MMF *no-core* com $\phi_{\text{MMF}}=55\mu\text{m}$ e comprimento de 1,14cm (Figura 54) enquanto que na segunda estrutura inverte-se a ordem das seções multimodo (Figura 57). Os resultados mostram que a largura espectral dessa segunda SMS mista (Figura 57) difere da estrutura obtida para a estrutura invertida (Figura 54); como se vê na Figura 58. O sinal, quando se utiliza a estrutura com seção MMF *no-core* 55 μm – MMF *no-core* 125 μm , apresenta uma largura espectral maior que para a estrutura invertida, ou seja, a estrutura com

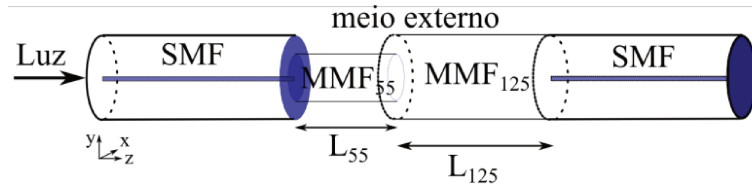


Figura 57. Estrutura mista com duas seções MMF *no-core* de diâmetros 55μm e 125μm.

MMF *no-core* 125μm e MMF *no-core* 55μm. Isto se deve a que o acoplamento de modos da MMF *no-core* 125μm com a MMF *no-core* 55μm é diferente dos modos excitados e acoplados na segunda estrutura, MMF *no-core* 55μm com a MMF *no-core* de 125μm.

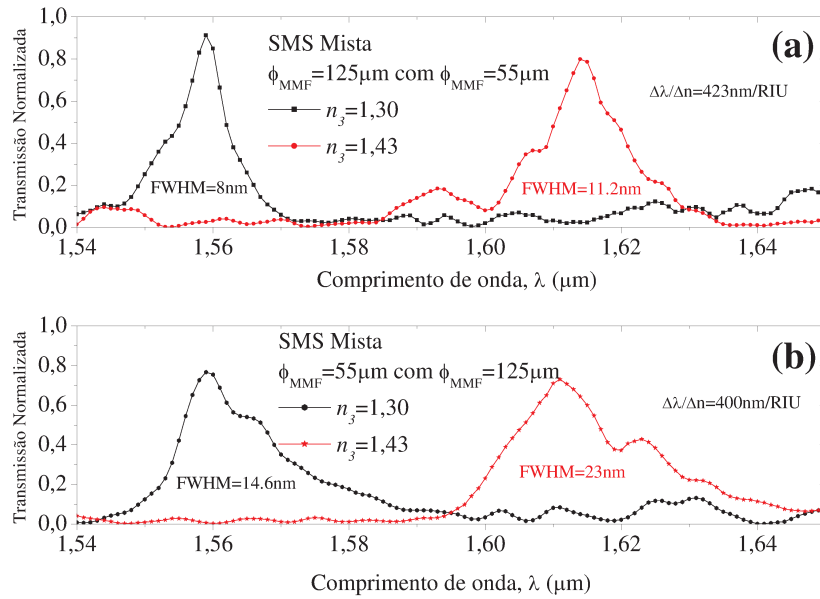


Figura 58. Comparação de resultados de deslocamento do pico de transmissão espectral para as duas estruturas SMS mistas. (a) MMF *no-core* 125μm e MMF *no-core* 55μm e (b) MMF *no-core* 55μm e MMF *no-core* 125μm.

Dos resultados anteriores se mostra que a melhor estrutura para sensoriamento de índice de refração, considerando-se a melhor resolução, é a estrutura construída com uma seção MMF *no-core* de 125 μm no lado de entrada do sinal óptico seguida de uma seção MMF *no-core* de 55 μm , como se vê na Figura 54.

4.3 Largura espectral para estruturas SMS com taper

Com o objetivo de melhorar a resolução no sensor refractométrico estudou-se, também, uma estrutura SMS com seção MMF afinada (“*taper*”). Como apresentado no Capítulo 1, uma estrutura SMS com taper é construída partindo-se do afinamento da região multimodal de uma estrutura SMS normal. A transmissão nessa seção MMF com taper depende de parâmetros como o diâmetro inicial da seção MMF (D_0), comprimento inicial de afinação (L_0), comprimento das regiões de transição (Z_1, Z_2), diâmetro da seção reta afinada do taper (D_w) e comprimento da região afinada (L_w). Esses parâmetros vêm-se mais claramente na Figura 59.

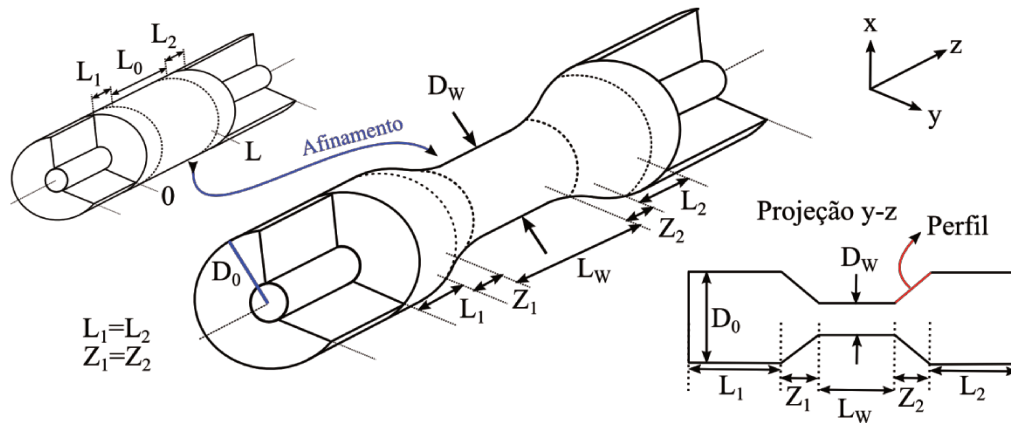


Figura 59. Parâmetros de uma estrutura SMS com taper.

O comprimento da região de transição (Z_1, Z_2) é definido por ([38], [39]):

$$Z_1 = \frac{(\alpha - 1)L_0}{2\alpha} \left[1 - \left(\frac{D_0}{D_W} \right)^{2\alpha} \right], \quad (26)$$

onde α define o perfil da região de transição Z_1 e Z_2 ; que pode ser linear ($\alpha \rightarrow -1/2$) ou exponencial ($\alpha \rightarrow 0$). Adicionalmente para entender o comportamento dos modos se estudou uma estrutura “imaginária” com perfil exponencial e com igual região de transição (Z_1) que o perfil linear, ou seja, com $\alpha = -1/2$. As estruturas se vêem na Figura 60.

Para representar mais claramente a forma do perfil da região de transição, e a dependência deste perfil com α , reorganiza-se a Eq. (26) para se obter D_W em função de Z_1 e α :

$$\left(\frac{D_0}{D_W} \right)^{2\alpha} = 1 - \frac{2\alpha}{(\alpha - 1)L_0} Z_1, \quad (27)$$

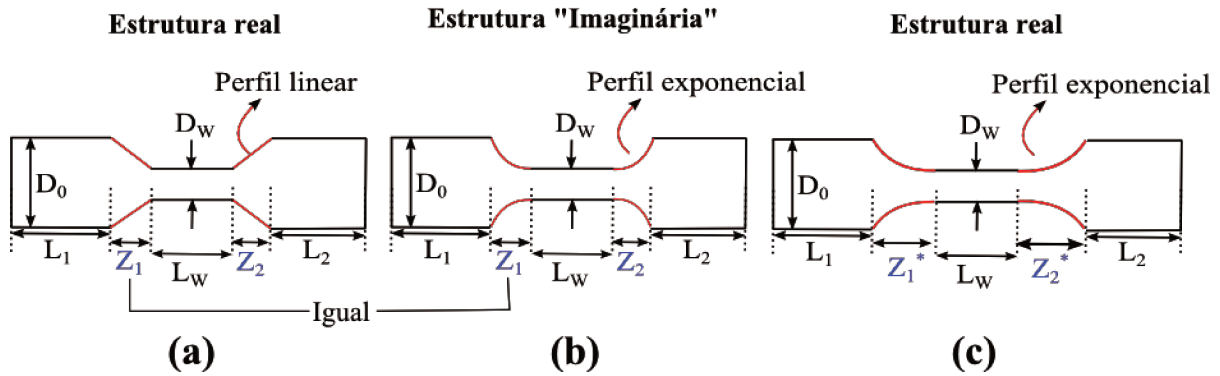


Figura 60. Estruturas com diferentes perfis e regiões de transição. (a) Taper com perfil linear. (b) Taper “imaginário” com perfil exponencial. (c) Taper com perfil exponencial.

assim,

$$\alpha \rightarrow -1/2$$

$$D_W = D_0 \left(1 - \frac{2}{3L_0} Z_1 \right) \quad (28)$$

$$\alpha \rightarrow 0$$

$$1 - \frac{2\alpha}{(\alpha - 1)L_0} Z_1 = e^{-2\alpha/[(\alpha-1)L_0]Z_1}$$

$$D_W = D_0 e^{-Z_1/L_0}. \quad (29)$$

Se $\alpha \rightarrow -1/2$ o perfil da região de transição é linear enquanto que se $\alpha \rightarrow 0$ o perfil é exponencial. Na Figura 61 se vêem esses dois perfis: linear e exponencial.

O comprimento da região afinada pode ser obtido utilizando:

$$L_W = L_0 + \frac{2\alpha Z_1}{1 - \alpha}. \quad (30)$$

Para nossas simulações utilizou-se um comprimento de onda de $1,55\mu\text{m}$ enquanto que o valor para $L_1 = L_2$ é de $1,5\text{mm}$.

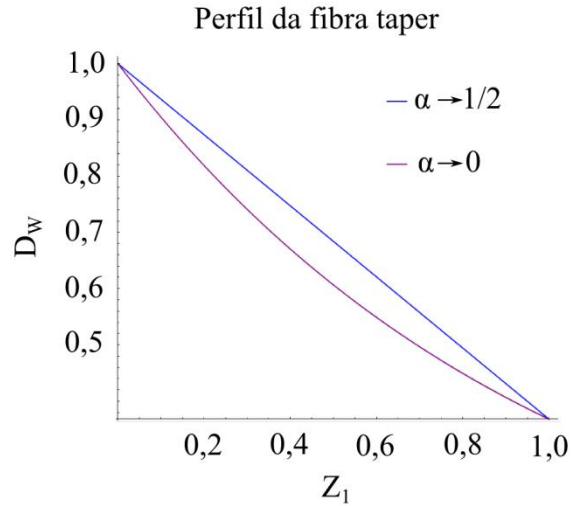


Figura 61. Perfis das regiões de transição da estrutura SMS com taper.

4.3.1 Fibra taper MMI com perfil linear e perfil exponencial

A estrutura SMS com taper também apresenta os padrões de interferência construtiva e destrutiva como os observados nas estruturas SMS convencionais, mas a localização das reimagens não pode ser calculada analiticamente (Eq.(16)) devido ao afinamento da região multimodal. A localização das reimagens é dependente dos parâmetros geométricos da seção MMF com taper, descritos na subseção anterior.

O primeiro estudo buscou encontrar a localização da primeira reimagem ao longo do eixo de propagação utilizando uma estrutura SMS com taper de perfil linear. Foram realizadas simulações com $\alpha = -1/2$ e $L_0 = 5,69\text{cm}$. Quando a região de comprimento L_W tem um diâmetro (D_W) de $125\mu\text{m}$, ou seja, antes de sofrer afinamento, a localização da primeira reimagem pode ser determinada e seu valor é 58.8mm (Figura 62(a)). Se o diâmetro da região afinada (D_W) diminui (Figura 62(b) e (c)) a posição da primeira reimagem se desloca para valores menores no eixo de propagação, ou seja, para mais perto da entrada da fibra. Quando a primeira reimagem se forma na região de transição (Z_1) os modos não são mais afetados pela região afinada e o deslocamento da primeira reimagem se torna mínimo e pode-se afirmar que a posição da primeira reimagem fica estabilizada. O comprimento da região de transição (Z_1) é variável com o diâmetro da região afinada (D_W). Quando o diâmetro da região afinada é da ordem de $70\mu\text{m}$ apareceram a segunda (2^a) e terceira (3^a) reimagens.

Uma representação mais detalhada da variação da posição da primeira reimagem com a variação do diâmetro da região afinada é mostrada na Figura 63. O ponto de partida é a posição $5,88\text{cm}$, que corresponde à posição da reimagem para a estrutura SMS sem taper (Figura 62(a)). Quando a afinação começa a primeira reimagem se desloca para valores

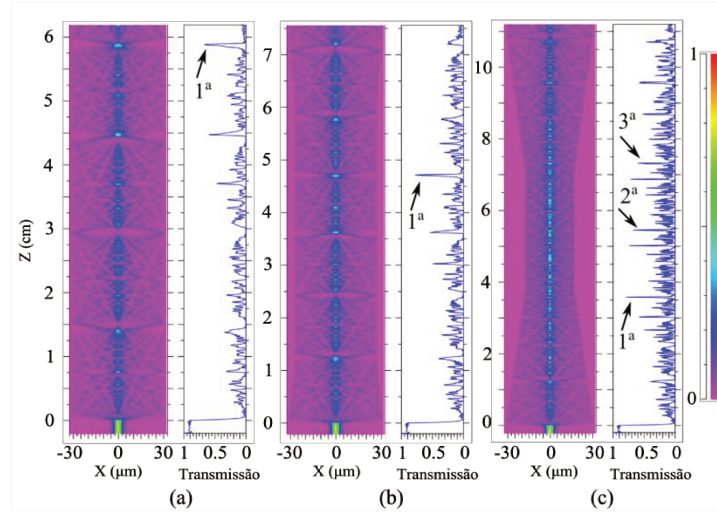


Figura 62. Perfis de interferência em estruturas SMS com taper de perfil linear ($\alpha = -1/2$, $L_0 = 5,69\text{cm}$). (a) estrutura sem taper, $D_w = 125\mu\text{m}$. (b) estrutura com $D_w = 110\mu\text{m}$. (c) estrutura com $D_w = 70\mu\text{m}$. Perfil linear,

menores no eixo de propagação, como se observa na Figura 62-(b) e Figura 62-(c). Para diâmetros da região afinada menores de $80\mu\text{m}$ a primeira reimagem fica estabilizada como mostra a Figura 63.

Ao construir-se estruturas SMS com taper de diâmetros da região afinada menores que $80\mu\text{m}$ a reimagem se forma no interior da região de transição (Z_1). Para determinar-se a influência do perfil do taper na localização da primeira reimagem ao longo do eixo de propagação, foi modelada uma estrutura SMS “imaginária” com taper de perfil exponencial (Figura 61). Esse taper “imaginário” com perfil exponencial tem um comprimento de transição Z_1 que foi calculado utilizando-se $\alpha \rightarrow -1/2$. A comparação dos perfis se vê na Figura 64. Nessa Figura 64 observa-se que a primeira reimagem se forma antes na região de transição Z_1 para a estrutura com perfil exponencial do que com o perfil linear. Isso se deve a

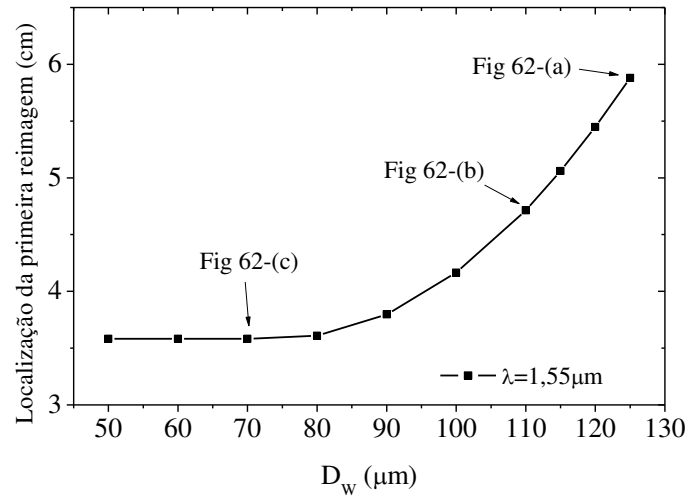


Figura 63. Localização da primeira reimagem para diferentes diâmetros da região afinada em estrutura SMS com taper de perfil linear. $\alpha=-1/2$ e $L_0=5,69$ cm.

que os modos no perfil exponencial são mais influenciados pelo meio externo que os modos no perfil linear. Isto indica que a localização da primeira reimagem ao longo do eixo de propagação é fortemente afetada pelo perfil da fibra taper.

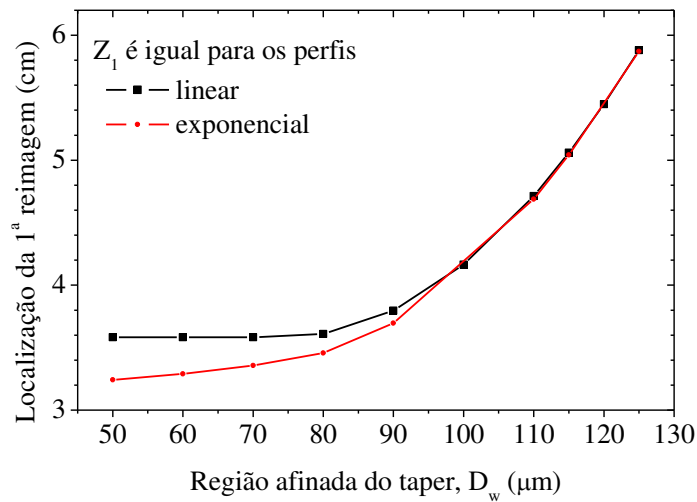


Figura 64. Comparação dos perfis linear e exponencial para $\alpha=-1/2$ e $L_0=5,69$ cm.

Deve se notar que para as duas curvas na Figura 64 o valor para α é $-1/2$. Esse valor é usado para o perfil linear e para o perfil exponencial. O valor correspondente à região de transição (Z_1) é igual para os dois perfis. Isto se fez com a finalidade de ressaltar o efeito do perfil na localização da reimagem mas mantendo o comprimento Z_1 fixo; já que Z_1 depende de α como se mostra na Eq. (26).

4.3.2 Reimagens de ordem superior para estruturas SMS com taper.

Para ter maior entendimento sobre a formação de reimagens ao longo do eixo de propagação da luz se determinou a localização da segunda reimagem até a quarta reimagem para o perfil linear e até a quinta reimagem para o perfil exponencial. Determinou-se a diferença em comprimento para a localização das reimagens, como também, os valores correspondentes para Z_1 , L_w e L_{total} ($L_{total} = L_T = L_w + 2 * Z_1 + 2 * L_1$). Os resultados são mostrados na Tabela 5 e na Tabela 6.

Na Tabela 5 observa-se que para o diâmetro da seção reta afinada do taper (D_w) de $125\mu\text{m}$ a única reimagem que se tem, sobre o eixo de propagação, é a primeira em 58.8mm . Quando a região afinada do taper diminui para um valor de $90\mu\text{m}$, aparecem a primeira reimagem, deslocada para $\sim 38\text{mm}$, e a segunda reimagem que se encontra no valor de 68.5mm ao longo do eixo de propagação. A diferença no eixo de propagação para esses valores é de 30.6mm que aparece na coluna D1 da Tabela 5. A região afinada do taper segue diminuindo até se encontrar a terceira e quarta reimagens. Igual análise é realizada para o taper “imaginário” com perfil exponencial cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5. Localização das reimagens e diferenças na localização das reimagens. Perfil geométrico linear com $L_0=5,69\text{mm}$ e $\alpha=-1/2$.

Resultados (cm)										
D_W	Z_1	L_w	L_T	1^{a*}	$D1^\dagger$	2^{a*}	$D2^\star$	$3^{a^\blacksquare}$	$D3^\star$	$4^{a^\bullet}$
125	0,0	5,69	5,99	5,88	X	X	X	X	X	X
120	0,34	5,46	6,44	5,45	X	X	X	X	X	X
115	0,68	5,24	6,90	5,06	X	X	X	X	X	X
110	1,02	5,01	7,36	4,71	X	X	X	X	X	X
100	1,71	4,55	8,27	4,16	X	X	X	X	X	X
90	2,39	4,10	9,18	3,80	3,06	6,85	X	X	X	X
80	3,07	3,64	10,09	3,61	2,41	6,02	3,06	9,08	X	X
70	3,76	3,19	11,00	3,58	1,87	5,46	1,86	7,32	X	X
60	4,44	2,73	11,91	3,58	1,56	5,14	1,36	6,51	1,44	7,95
50	5,12	2,28	12,82	3,58	1,49	5,08	0,96	6,04	0,95	6,99

*Localização no eixo de propagação da primeira reimagem (*segunda reimagem, $^\blacksquare$ terceira reimagem, $^\bullet$ quarta reimagem),

† (D1) Diferença entre as posições da primeira e segunda reimagens, * (D2) Diferença entre as posições da segunda e terceira reimagens, * (D3) Diferença entre as posições da terceira e quarta reimagens.

Tabela 6. Localização e diferenças na localização das reimagens. Taper “imaginário” com perfil exponencial com $L_0=5,69\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$.

Resultados (cm)												
D_W	Z_1	L_w	L_T	1^{a*}	$D1^\dagger$	2^{a*}	$D2^\star$	$3^{a^\blacksquare}$	$D3^\star$	$4^{a^\bullet}$	$D4^\circ$	$5^{a^\star}$
125	0,0	5,69	5,99	5,87	X	X	X	X	X	X	X	X
115	0,68	5,24	6,90	5,04	X	X	X	X	X	X	X	X
110	1,02	5,01	7,36	4,69	X	X	X	X	X	X	X	X
90	2,39	4,10	9,18	3,70	3,05	6,75	X	X	X	X	X	X
80	3,07	3,64	10,09	3,46	2,42	5,87	2,73	8,60	X	X	X	X
70	3,76	3,19	11,00	3,36	1,89	5,24	1,85	7,10	2,57	9,67	X	X
60	4,44	2,73	11,91	3,29	1,58	4,87	1,36	6,23	1,38	7,61	1,97	9,58
50	5,12	2,28	12,82	3,24	1,47	4,71	1,00	5,71	0,95	6,66	0,95	7,61

*Localização no eixo de propagação da primeira reimagem (*segunda reimagem, $^\blacksquare$ terceira reimagem, $^\bullet$ quarta reimagem,

$^\circ$ quinta reimagem), † (D1) Diferença entre as posições da primeira e segunda reimagens, * (D2)Diferença entre as posições da segunda e terceira reimagens, * (D3) Diferença entre as posições da terceira e quarta reimagens, $^\circ$ (D4) Diferença entre as posições da quarta e quinta reimagens.

Na Tabela 5 e Tabela 6 se vê que a diferença entre as reimagens diminui quando o diâmetro da região afinada do taper diminui. Isto ocorre para a diferença entre posições de todas as reimagens. Deve se notar que o valor para região de transição Z_1 , comprimento da região afinada L_w e comprimento total L_{total} é igual para as duas estruturas taper (já que usamos o mesmo valor de $\alpha = -1/2$), enquanto a localização das reimagens para as estruturas é diferente, devido ao tipo de perfil do taper. Por exemplo, para um diâmetro de taper (D_w) de $110\mu m$ se tem, para o perfil linear, a localização da primeira reimagem de $4,71cm$ enquanto que para o perfil exponencial a localização da primeira reimagem ocorre em $4,69cm$. Essa diferença na localização das reimagens torna-se maior com a diminuição do diâmetro da região afinada do taper, levando a concluir que o perfil do taper afeta fortemente a localização da reimagem na estrutura.

Em sequencia, estudou-se a localização da primeira, segunda e terceira reimagens para fibras taper com perfil exponencial, $\alpha = -1/2$ mas com L_0 menores. Para isso, considerou-se três estruturas SMS taper com $L_0 = 4,50cm, 3,00cm$ e $2,00cm$. As localizações, junto com a diferença entre as reimagens se vêem nas Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Na Tabela 7 observa-se que para a fibra sem taper ($D_w = 125\mu m$) não há a formação da reimagem. Baseados nos efeitos estudados anteriormente sabe-se que quando o diâmetro da região afinada for menor a primeira reimagem aparecerá, o que se observa quando o diâmetro da região afinada é de $115\mu m$ e a reimagem está localizada em $5,04cm$.

Tabela 7. Localização e diferença nas localizações das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=4,50\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$.

Resultados (cm)								
D_W	Z_1	L_W	L_T	1^{a*}	$D1^\dagger$	2^{a*}	$D2^\star$	$3^{a^\blacksquare}$
125	0,0	4,50	4,80	X	X	X	X	X
115	0,54	4,14	5,52	5,04	X	X	X	X
110	0,81	3,96	5,88	4,67	X	X	X	X
90	1,89	3,24	7,32	3,58	3,43	7,01	X	X
80	2,43	2,88	8,04	3,26	2,42	5,68	X	X
70	2,97	2,52	8,76	3,09	1,85	4,94	2,16	7,10

*Localização no eixo de propagação da primeira reimagem (*segunda reimagem, $^\blacksquare$ terceira reimagem), † D(D1) Diferença entre as posições da primeira e segunda reimagens, * (D2) Diferença entre as posições da segunda e terceira reimagens.

Para menores comprimentos sujeitos a afinação (L_0), a reimagem ocorrerá apenas para menores diâmetros do taper (D_W). Esta observação pode ser verificada dos resultados apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9.

Na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 observa-se que a localização da primeira reimagem depende do comprimento inicial da região para afinação do taper (L_0). Assim, para a fibra

Tabela 8. Localização e diferença na localização das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=3,00\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$.

Resultados (cm)								
D_W	Z_1	L_W	L_T	1^{a*}	$D1^\dagger$	2^{a*}	$D2^\star$	$3^{a^\blacksquare}$
125	0,0	3,00	3,30	X	X	X	X	X
115	0,36	2,76	3,78	X	X	X	X	X
110	0,54	2,64	4,02	X	X	X	X	X
90	1,26	2,16	4,98	3,43	X	X	X	X
80	1,62	1,92	5,46	3,01	X	X	X	X
70	1,98	1,68	5,94	2,71	2,04	4,76	X	X

*Localização no eixo de propagação da primeira reimagem (*segunda reimagem, $^\blacksquare$ terceira reimagem), † (D1) Diferença entre as posições da primeira e segunda reimagens, * (D2) Diferença entre as posições da segunda e terceira reimagens.

Tabela 9. Localização e diferenças na localização das reimagens. Perfil exponencial com $L_0=2,00\text{cm}$ e $\alpha=-1/2$.

Resultados (cm)								
D_W	Z_1	L_W	L_T	1^{a*}	$D1^*$	2^{a*}	$D2^*$	$3^{a\blacksquare}$
125	0,0	2,00	2,30	X	X	X	X	X
115	0,24	1,84	2,62	X	X	X	X	X
110	0,36	1,76	2,78	X	X	X	X	X
90	0,84	1,44	3,42	X	X	X	X	X
80	1,08	1,28	3,74	2,88	X	X	X	X
70	1,32	1,12	4,06	2,46	X	X	X	X

*Localização no eixo de propagação da primeira reimagem (*segunda reimagem, $\blacksquare$ terceira reimagem), * Diferencia em comprimento para as localizações no eixo de propagação entre a primeira e segunda reimagens (* entre segunda e terceira reimagens).

taper com comprimento inicial, $L_0 = 4,50\text{cm}$, a primeira reimagem aparece quando o diâmetro da região afinada é menor que $115\mu\text{m}$; enquanto que a primeira reimagem para as fibras taper de (3,00 e 2,00)cm aparecem para diâmetros D_W menores que 90 e $80\mu\text{m}$, respectivamente.

4.3.3 Largura espectral para o sinal das estruturas SMS com taper para perfil linear e exponencial

Para realizar o estudo de largura espectral para o sinal de transmissão dos tapers com perfil linear e exponencial precisa-se conhecer com precisão o comprimento para o qual a primeira reimagem se forma na saída da seção MMF do taper. Deste modo, deve-se conhecer o diâmetro da região afinada da estrutura SMS taper.

Nesta parte do estudo se fizeram varias simulações com a finalidade de encontrar o diâmetro da fibra taper para ter na saída da estrutura a primeira reimagem. O valor determinado para a fibra taper com perfil linear, com $\alpha = -1/2$ e $L_0 = 2,00\text{cm}$, é $D_W=86.3\mu\text{m}$ e para o taper

“imaginário” com perfil exponencial, com $\alpha = -1/2$ e $L_0 = 2,00\text{cm}$, $D_W=87.38\mu\text{m}$; enquanto que para a fibra taper com perfil exponencial, com $\alpha \rightarrow 0$ (numericamente se escolhe $\alpha = -1 \times 10^{-10}$) e $L_0 = 2,00\text{cm}$ é $D_W=91.1\mu\text{m}$. O taper “imaginário” com perfil exponencial, com $\alpha = -1/2$, não representa uma fibra real mas é incluído para permitir a comparação direta com o caso de $\alpha = -1/2$ e perfil linear, ambos com o mesmo Z_1 (Eq. (26)). Observa-se que existe uma diferença nas localizações da primeira reimagem para os perfis estudados. Esse valor de comprimento inicial de afinação $L_0 = 2,00\text{cm}$ é escolhido para possibilitar uma comparação com os resultados experimentais [39]. Os valores determinados para o diâmetro da região afinada são utilizados para a construção de estruturas SMS com MMF *no-core*. A comparação da largura espectral (FWHM) para os sistemas, SMS com MMF *no-core* e fibra taper, é apresentada nas Figura 65, Figura 66 e Figura 67. Mostra-se que a FWHM para a fibra taper é menor que para a estrutura SMS com MMF *no-core* para os três casos.

Neste ponto não está claro como se dá a interferência multimodal dos modos na fibra taper e o efeito da estrutura sobre a largura espectral. Para a estrutura SMS sem taper se determinou (seção 4.1) que a FWHM é proporcional ao número de modos radiais excitados na região multimodal, assim como a fase dos modos na saída da fibra. Entretanto, no caso da estrutura taper, no início, tem-se a formação dos modos de uma fibra SMS com MMF *no-core* de $125\mu\text{m}$, mas esses modos têm suas constantes de propagação alteradas ao longo da seção de transição e alguns destes modos podem se perder por atingir o corte ou tornar-se muito evanescente. O estudo da evolução destes modos na região afinada será objeto de estudo futuro além desta dissertação.

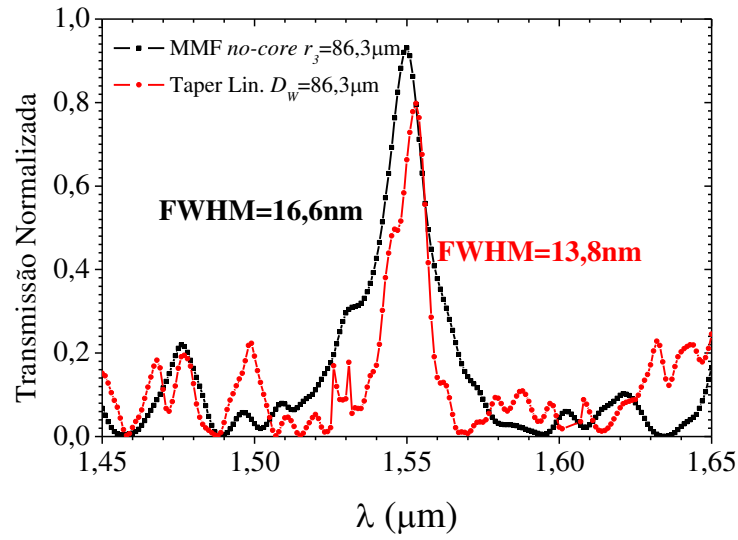


Figura 65. Comparação MMF *no-core* 86,3 μm com taper linear 86,3 μm de região afinada, $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.

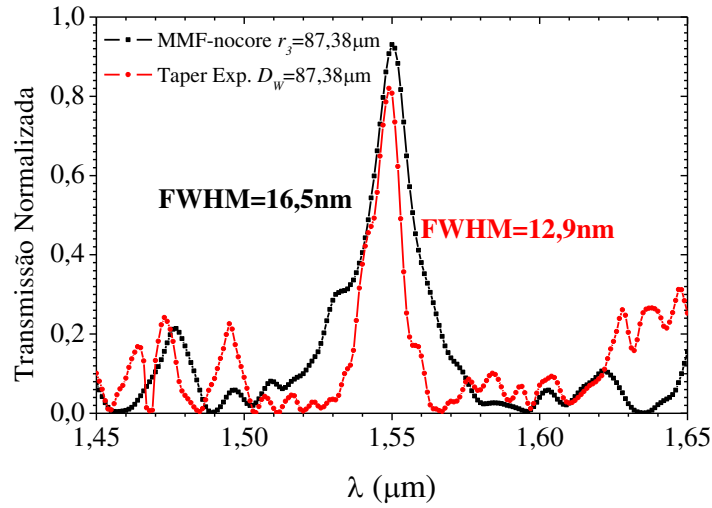


Figura 66. Comparação MMF *no-core* 87,38 μm com taper perfil geométrico exponencial 87,38 μm de região afinada, $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.

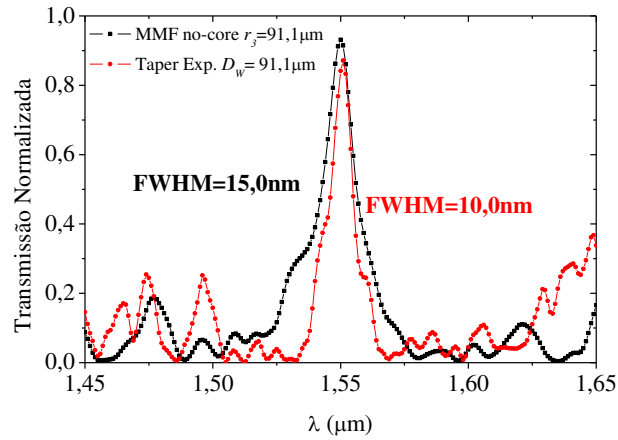


Figura 67. Comparação MMF *no-core* 91,1μm com taper exponencial 91,1μm de região afinada, primeira reimagem, $\alpha=-1 \times 10^{-10}$, $L_0=2,00\text{cm}$.

Observa-se que a FWHM é menor para a estrutura taper com perfil exponencial que com o perfil linear o que pode melhorar a resolução do sensor.

4.3.4 Largura espectral para a segunda reimagem para estruturas SMS taper e SMS com MMF *no-core*

Nesta seção se fez a comparação da FWHM entre as estruturas SMS taper e as estruturas SMS com MMF *no-core* para a segunda reimagem. Novamente, para fazer a comparação da FWHM do sinal se precisa conhecer o diâmetro da região afinada do taper para a qual se tem a segunda reimagem na saída da seção MMF no taper.

Para a formação da segunda reimagem em estruturas SMS com taper linear, $\alpha = -1/2$ e $L_0 = 2,00\text{cm}$ se encontra um diâmetro de região afinada $D_W=57,08\mu\text{m}$ e para a fibra taper “imaginária”, com perfil exponencial, com $\alpha = -1/2$ e $L_0 = 2,00\text{cm}$ um diâmetro $D_W=59,91\mu\text{m}$; enquanto que para o taper com perfil exponencial e com $\alpha = -1 \times 10^{-10}$ e $L_0 = 2,00\text{cm}$ $D_W=68,45\mu\text{m}$.

Para fazer a comparação se simulam as três estruturas SMS com MMF *no-core* com diâmetros para a MMF de 57,08 μm , 59,91 μm e 68,45 μm . As respectivas comparações se vêem nas Figura 68, Figura 69 e Figura 70.

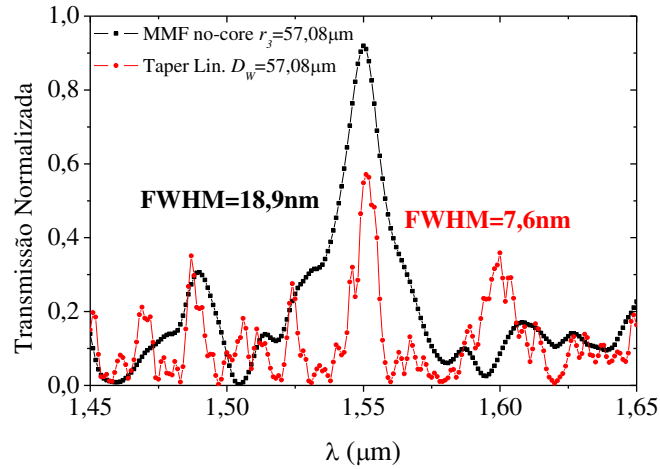


Figura 68. Comparação MMF *no-core* 57,08 μm com taper linear com 57,08 μm de região afinada, segunda reimagem com $\alpha=-1/2$ e $L_0=2,00\text{cm}$.

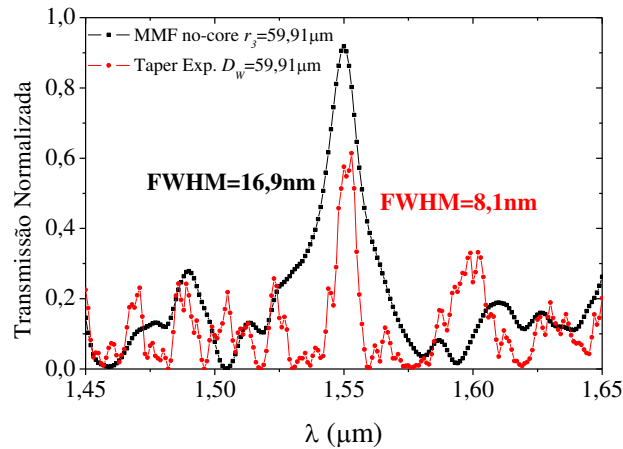


Figura 69. Comparação MMF *no-core* 59,91 μm com taper exponencial de 59,91 μm de região afinada, segunda reimagem. $\alpha=-1/2$, $L_0=2,00\text{cm}$.

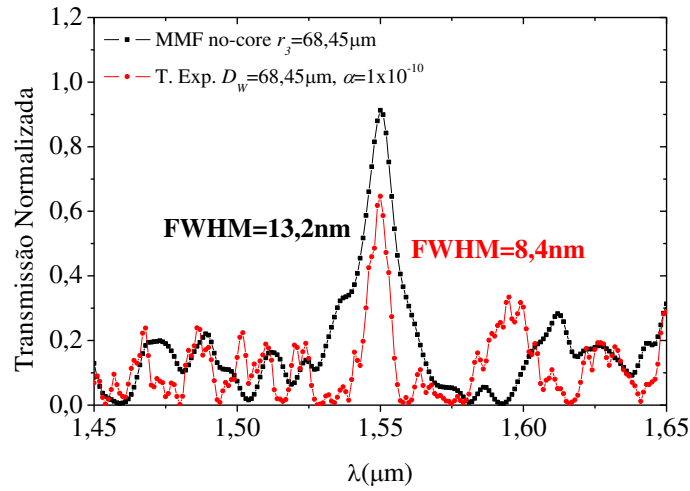


Figura 70. Comparação MMF *no-core* 68,45μm com taper exponencial com 68,45μm de cintura, 2da reimagem. $\alpha=-1 \times 10^{-10}$, $L_0=2,00\text{cm}$.

Observa-se novamente que a FWHM para a estrutura SMS com MMF *no-core* sem taper é maior que para a estrutura SMS com taper. A intensidade de sinal óptico na segunda reimagem da fibra taper diminui consideravelmente comparada com a intensidade de transmissão da primeira reimagem. Finalmente a FWHM para a segunda reimagem, para a estrutura taper com perfil exponencial e com $\alpha=1 \times 10^{-10}$, é a menor de todas as estruturas.

Os resultados se vêem na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação da largura espectral para os sistemas estudados.

Descrição	Primeira reimagem		Segunda reimagem	
	(D_W/ϕ_{MMF}) (μm)	FWHM (nm)	(D_W/ϕ_{MMF}) (μm)	FWHM (nm)
Taper com perfil linear, com Z_1 linear	86.3	13.8	57.1	7.6
SMS com MMF <i>no-core</i>		16.6		18.9
Taper “imaginário” com perfil exponencial, com Z_1 linear	87.38	12.9	59.9	8.2
SMS com MMF <i>no-core</i>		16.5		16.9
Taper exponencial, com Z_1 exponencial	91.1	10.0	68.4	8.4
SMS com MMF <i>no-core</i>		15.0		13.2

(Pagina em branco)

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas futuras

Conclusão

Determinou-se partindo do método analítico, rotina com Mathematica e o método de propagação de feixe a posição da primeira reimagem para uma estrutura SMS com MMF *no-core* de 125 μ m com valores de 5,87, 5,81 e 5,89 cm, respectivamente. Conhecendo a posição da primeira reimagem e realizando as respectivas simulações numéricas estudou-se a resposta das estruturas SMS para a mudança de índice de refração externo, temperatura e curvatura. Para a resposta à mudança de índice de refração externo, simulou-se um elemento sensor com diferentes diâmetros da MMF *no-core* e observou-se que a sensibilidade do sensor aumenta quando o diâmetro da fibra multimodal diminuiu. A estrutura SMS que apresenta a maior sensibilidade à mudança de índice de refração externo (3550nm/RIU no intervalo 1,42 -1,43) é construída com uma MMF *no-core* de 55 μ m. Para a resposta à temperatura, construiu-se um elemento sensor baseado no efeito termo-óptico do líquido externo ($n_3=1,4298$), para um intervalo entre 20°C e 100°C com uma sensibilidade máxima de -1880pm/°C para o intervalo de temperatura entre 20°C e 30°C. As simulações correspondentes estão de acordo com os resultados experimentais. Para a resposta de curvatura, simulou-se um elemento sensor baseado na medida de intensidade do sinal transmitido e, também, no deslocamento espectral do sinal transmitido. Para o primeiro caso, observou-se que a intensidade do sinal diminui quando o raio de curvatura diminui (maior raio de curvatura) e no segundo caso se apresenta deslocamento espectral com o aumento de

raio de curvatura apresentando-se a maior sensibilidade para a estrutura com MMF *no-core* de $55\mu\text{m}$ ($0,25\text{nm/cm}$) para um vale no intervalo entre 30 até 40cm. A comparação experimental não foi possível.

A largura espectral dos sinais foi analisada em função do índice de refração externo, diâmetro da MMF, número de modos excitados na MMF, abertura numérica da SMF de entrada e ordem da reimagem na MMF. Observou-se que a largura espectral aumenta quando o diâmetro da MMF diminui ou quando aumenta o índice de refração externo e a FWHM diminui quando aumenta a ordem da reimagem. Também se vê que a FWHM aumenta quando a abertura numérica da SMF diminui e se vê uma correspondência entre a FWHM e o número máximo de modos excitados na MMF como também com a eficiência de acoplamento na junção SMF-MMF.

Para as estruturas SMS com região afinada “taper” foi possível encontrar a localização da primeira reimagem para as fibras taper com perfil linear e perfil exponencial com uma ótima precisão. Para a fibra taper com comprimento inicial de 56.9mm a primeira reimagem depende do valor do diâmetro da seção reta afinada (D_W) e do perfil do taper. Para comprimentos iniciais menores $L_0 = (45, 30, 20)\text{mm}$ se observou que a formação da primeira reimagem só ocorre com a redução do diâmetro D_W e que quando o taper inicia com comprimento $L_0 = 20\text{mm}$ a localização da primeira reimagem na saída da seção MMF se encontra nos diâmetros D_W de 86,3, 87,38 e $99,1\mu\text{m}$, para os perfis linear e exponencial, respectivamente. Finalmente se vê que a FWHM do sinal para as estruturas SMS com MMF

no-core sempre é maior que para as estruturas taper MMI. Isto ocorre para a primeira e segunda reimagem nos tapers com $L_0 = 20\text{mm}$.

Foi possível encontrar estruturas que melhoram a resolução do sensor refractométrico para índice de refração. Entre essas estão as estruturas mistas e a estruturas taper MMI. Esta última foi a que apresentou melhores resultados em termos de resolução.

Perspectivas futuras

Entre as perspectivas futuras está entender a evolução dos modos em estruturas do tipo MMI-taper. Qual é a dependência na formação da reimagem dos modos de propagação. Conhecer a posição de formação da reimagem nessas estruturas.

Outra perspectiva é a modelagem de um filtro composto da junção de duas fibras de duplo núcleo (DSMF), monomodo, e uma fibra-membrana multimodal (MeMF) como se vê na Figura 71, operando sob o mesmo princípio de funcionamento das seções MMF.

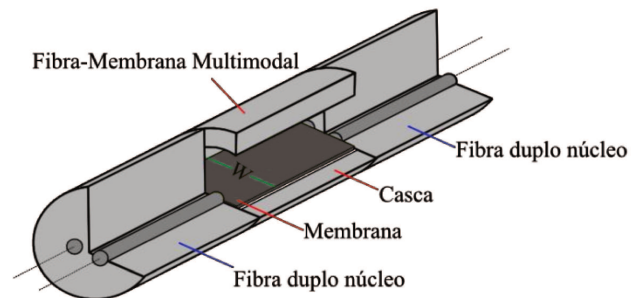


Figura 71. Estrutura DSMF-MeMF-DSMF para a construção dum filtro para separar sinais.

A principal função desse filtro será a separação de sinais com comprimentos de onda múltiplos harmônicos. Assim, um sinal com dois comprimentos de onda ($1,55\mu\text{m}$ e $0,775\mu\text{m}$) pode ser separado para um comprimento específico da seção multimodo em forma de membrana. Como exemplo inicial se utilizou uma membrana com largura de $75\mu\text{m}$, espessura de $1,5\mu\text{m}$ e comprimento de $1,43\text{cm}$.

Pode-se observar a formação de uma reimagem nas posições $0,72\text{cm}$ (linha verde) e $1,43\text{cm}$ (linha azul) para o sinal de $1,55\mu\text{m}$. Utilizando-se o comprimento de onda de $0,775\mu\text{m}$ encontra-se a primeira reimagem na posição $1,42\text{cm}$, no canal de saída 2. A comparação dos sinais é apresentada na Figura 72.

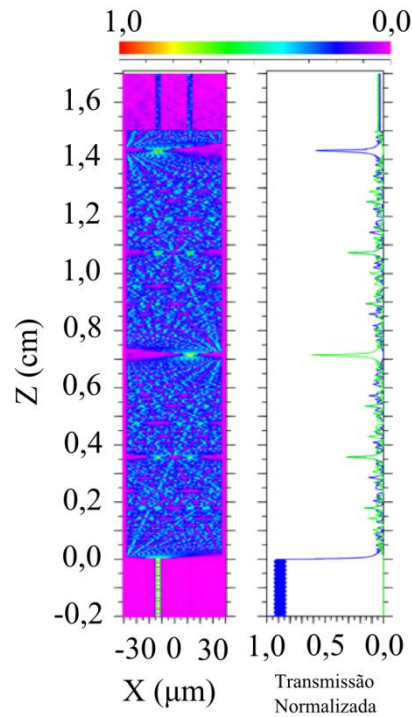


Figura 72. Resultados preliminares para a estrutura DSMF-MeMF-DSMF com comprimento de onda de entrada de $1,55\mu\text{m}$.

Utilizando as transmissões dos dois sinais é possível calcular a razão de extinção entre modos, nos diferentes comprimentos de onda, em cada canal de saída do filtro direcional. A Figura 73 apresenta a variação da razão de extinção em função do comprimento de onda para ambos os canais de saída.

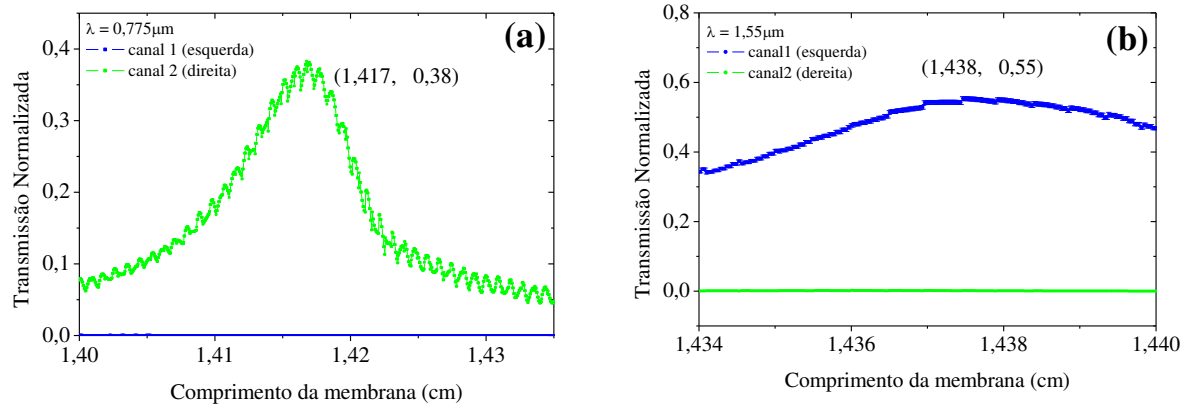


Figura 73. Comparação dos sinais de (a) 0,775 μm e (b) 1,55 μm para o filtro direcional.

(Pagina em branco)

Apêndice A

O EFEITO TALBOT

O efeito Talbot, também conhecido como autoimagem ou imagem sem lentes, foi inicialmente descoberto em 1830 por H. F. Talbot. Esse efeito é observado quando, sob condições apropriadas, um feixe de luz é refletido (ou transmitido) partindo de um padrão periódico. O padrão pode ter periodicidade unidimensional (como uma rede tradicional), ou pode ter periodicidade em duas dimensões (uma superfície de uma estrutura em relevo ou uma lâmina fotográfica impressa com características idênticas sobre uma rede regular).

Para explicar porque esses padrões interferométricos periódicos são reproduzidos para certos intervalos deve-se ter em conta o seguinte argumento. Uma onda plana normalmente incidente sob uma estrutura periódica cria um espectro discreto de ondas planas se propagando ao longo das direções

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) = 2\pi \left(\frac{m}{p}, \frac{n}{p}, \sqrt{(1/\lambda)^2 - (m/p)^2 - (n/p)^2} \right). \quad (31)$$

O componente z deste vetor pode ser aproximado por:

$$k_z \approx (2\pi/\lambda) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m\lambda}{p} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n\lambda}{p} \right)^2 \right]. \quad (32)$$

Já que p/λ é grande, para todo m e n , é suficiente considerar apenas termos de primeira ordem de uma expansão em serie de Taylor. A fase adquirida depois de uma distância de propagação z é

$$k_z z \approx (2\pi z/\lambda) - \frac{\pi z(m^2 + n^2)\lambda}{p^2}. \quad (33)$$

Se z é um múltiplo inteiro par de p^2/λ , e considerado que m e n são inteiros, a fase da Eq. (33) será diferente de $2\pi z/\lambda$ por um múltiplo de 2π . Já que todas as ondas saindo do objeto chegam ao plano imagem com igual fator de fase, sua sobreposição recriará o padrão original.

Não é necessário que z seja um múltiplo inteiro de p^2/λ para obter a autoimagem. Com múltiplos inteiros ímpares de p^2/λ , por exemplo, também é possível obter uma replica do padrão original, porém com a metade do período. Também, múltiplas imagens do padrão podem acontecer para múltiplos não inteiros de p^2/λ .

Embora o argumento matemático que suporta o efeito Talbot dependa da periodicidade do objeto no plano XY, para certos padrões que não são globalmente periódicos, e que são periódicos localmente, também se obtém autoimagens. As periodicidades do padrão podem estar em uma ou duas dimensões; o objeto pode modular a amplitude e a fase do feixe de luz; certas aplicações usam o fato da fonte de luz ser incoerente. No caso de padrões periódicos bidimensionais, a rede fundamental pode ser quadrada, retangular, hexagonal, etc.; o feixe incidente pode ser uma onda plana ou um frente de onda esférico se originando na fonte origem. As aplicações não são limitadas para a luz visível, estendem-se para raios-X e micro-ondas, e também para óptica eletrônica e atômica [19].

Apêndice B

Artigos em periódicos

Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference

Susana Silva,^{1,2,3} Edwin G. P. Pachon,¹ Marcos A. R. Franco,⁴ Juliano G. Hayashi,¹ F. Xavier Malcata,^{5,6} Orlando Frazão,³ Pedro Jorge,³ and Cristiano M. B. Cordeiro¹

¹Instituto de Física "Gleb Wataghin," Universidade Estadual de Campinas—UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brazil

²Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

³INESC-Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

⁴Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos—São Paulo, Brazil

⁵ISMAI—Instituto Superior da Maia, Avenida Carlos Oliveira Campos, 4475-690 Avioso S. Pedro, Portugal

⁶Instituto de Tecnologia Química e Biológica, Universidade Nova de Lisboa, Avenida da República, 2780-157 Oeiras, Portugal

*Corresponding author: sfsilva@inescporto.pt

Received 5 December 2011; revised 6 February 2012; accepted 8 February 2012;
posted 8 February 2012 (Doc. ID 159363); published 3 May 2012

This communication describes a highly sensitive temperature sensor based on multimode interference. The proposed sensing device is a singlemode-multimode-singlemode (SMS) based fiber structure, where a section of pure silica multimode fiber (coreless-MMF) is specifically used. The sensing concept relies on the self-imaging effect that occurs in the coreless-MMF-based SMS fiber structure. The influence of MMF diameter on the external refractive index (RI) variation was ascertained. The highest sensitivity to RI was achieved for the SMS fiber structure with the lowest coreless-MMF diameter (i.e., 55 μm) which exhibited a maximum sensitivity of 2800 nm/RIU (RI units). This analysis also implied an ultrahigh sensitivity of this sensing structure to temperature variations in the liquid RI of 1.43; a maximum sensitivity of $-1880 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ was indeed attained. The results produced were over 100-fold those of the typical value of approximately 13 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ achieved in air using a coreless-MMF-based SMS fiber structure. A simple approach based on evanescent wave absorption is suggested, where a polymer coating with an RI as low as 1.3 is deposited over the coreless-MMF section in order to extend the range of possible RI liquids around the MMF fiber to values above 1.43. © 2012 Optical Society of America
OCIS codes: 060.0060, 060.2310, 060.2370, 120.6780.

1. Introduction

Multimode interference (MMI) on optical fiber devices has been thoroughly investigated as an attractive technology for optical communications and sensing [1]. A typical example is singlemode-multimode-singlemode (SMS) fiber structure—which, owing to its unique spectral characteristics,

has already found many applications, e.g., in edge filtering for wavelength measurement [2], refractometry [3], strain measurement with compensation of temperature [4] and curvature sensing [5].

The self-imaging phenomenon in waveguided devices is a well-known concept [6]; in the past few years, many efforts have been made to develop MMI based-fiber devices based on such a concept. Mohammed et al. [7] reported an SMS fiber structure relying on the self-imaging effect for bandpass filtering; in this case, the sensing head was a section of

1559-128X/12/142542-07\$15.00/0
© 2012 Optical Society of America

pure silica multimode fiber (MMF)—125 μm in diameter and 57.7 mm in length, spliced between two singlemode fibers—and proposed as a fixed-wavelength bandpass filter. The wavelength peak arising from the fourth self-image could be adjusted by changing the MMF length or finely tuned by applying strain on the fiber device. Later, Antonio-Lopez et al. [8] developed a wavelength-tunable filter based on a SMS fiber structure; the total MMF section was based on two spliced sections of a standard MMF with 105 μm and 125 μm core and cladding diameters, respectively, and coreless-MMF with 125 μm diameter, so that the combined length still formed the fourth self-image in the end of the MMF fiber. A capillary tube filled with refractive-index-matching liquid was used between the 105/125 μm MMF section and the input SMF, to effectively increase the length of the total MMF section, and thus achieve wavelength tuning.

A different approach relied on a MMI-based fiber tip sensor for liquid level measurement [9]. The sensing structure was a 125 μm diameter coreless-MMF section spliced to an SMF, with 60.816 mm in length corresponding to the fourth self-image; the MMF tip was coated with a 200 nm thick layer of gold that acted as mirror, so that the self-image was back-reflected and coupled into the SMF. Therefore, when the coreless-MMF was immersed in a liquid and its level was changed, a correlated shift of the wavelength peak was found. Wu et al. [10] produced, in turn, a displacement sensor based on a bent SMS fiber structure. A standard 105/125 μm MMF section was accordingly used, with a length of 42.1 mm to ensure self-imaging. The bending decreased the risk of fiber breakage, as well as the limitation of displacement range that occurs in a straight SMS fiber structure.

Recently, a refractometer based on self-imaging of an SMS fiber structure was also reported [11]; a chemically etched core MMF was used, with different diameters and lengths, in attempts to unfold its influence on the sensitivity to refractive index (RI) measurement. Within the RI range 1.345–1.43, etched core MMF-based SMS fiber structures 50, 80, and 105 μm in diameter were analyzed; numerical results have shown that the sensitivity to external RI increased when the etched MMF core

diameter decreased. However, experimental validation was performed only with etched core MMFs 80 and 105 μm in diameter. On the other hand, Aguilar-Soto et al. [12] used the self-imaging effect of an SMS fiber structure, based on a coreless-MMF with 125 μm in diameter, as a temperature sensor; a typical sensitivity of approximately 13 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ in the temperature range from 25 to 375 $^\circ\text{C}$ was achieved.

This work conveys experimental results based on the multimode interference (MMI) concept, which was intended to measure RI variations of a surrounding medium, in order to ascertain the temperature dependence in a high-sensitivity RI range. The proposed sensing device is based on an SMS fiber structure, i.e., a section of a coreless-MMF spliced between two standard singlemode fibers (SMF-28) and interrogated in transmission. Three MMFs with different diameters were used, viz., 55, 78, and 125 μm , and the influence of diameter upon the sensitivity to RI variations was analyzed. Both numerical simulations and experimental results showed that if the coreless-MMF diameter decreased, the sensitivity to RI would increase; a maximum sensitivity of 2800 nm/RIU (RI units) was attained for the SMS fiber structure with a coreless-MMF of 55 μm . Based on this feature, a coreless-MMF-based fiber device was developed that is highly sensitive to temperature variations for a liquid RI of 1.43 (i.e., a nominal value of 1.44), and a maximum sensitivity of $-1880 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ could be attained. The beam-propagation method (BPM) was employed in modeling light propagation along the SMS fiber structure, and a comparison between experimental data and numerical simulation results is presented.

2. Results

In the present case, the sensing head consists of an SMS fiber structure, i.e., a coreless-MMF section spliced between two SMFs and interrogated in transmission; this is schematically shown in Fig. 1. A broadband source (BBS) in the 1550 nm spectral range was employed, with a bandwidth of 300 nm and an optical spectrum analyzer (OSA) as interrogation unit.

The theoretical basis of the SMS based-fiber structure concept is that when the light field propagating along the input SMF enters the MMF section, several

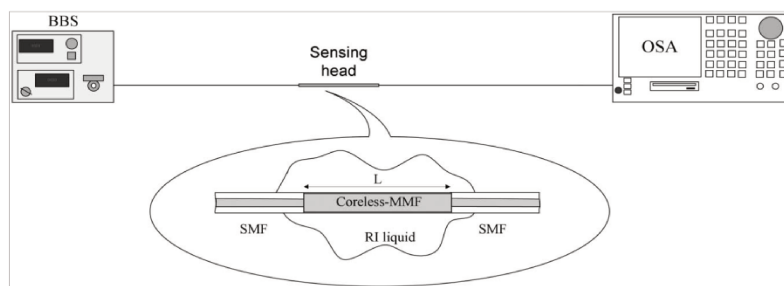


Fig. 1. Experimental setup utilized, and detail of the coreless-MMF-based SMS fiber structure.

modes of MMF are excited; hence, differential phases between the modes will accumulate, while the light beam propagates along the remainder of the MMF section. Although the global field profile changes along the MMF section, it remains symmetrically distributed along the direction of propagation [13]. Therefore, distinct propagation distances correspond to different field profiles at the exit end of an MMF with length L . Furthermore, there are several periodic planes along the direction of propagation where field condensation occurs [14,15]—i.e., self-imaging distance—and the light field at the input of the MMF section is replicated, in both amplitude and phase, on the output of the MMF for a specific wavelength.

The operating mechanism of our sensing head relies on the self-imaging phenomenon that occurs for a specific length of the coreless-MMF used, thus providing a well-defined wavelength peak, which in principle will be sensitive to the cladding (a role played here by the liquid) RI variations. Considering that the thermo-optic coefficient of water is approximately 10^{-4} K^{-1} [16], higher sensitivities to liquid RI may be expected than if refractive index variations were measured in air, where the thermo-optic effect is lower, approximately 10^{-6} K^{-1} [17]. As shown later, the proposed SMS fiber device will be suitable for high-sensitivity measurement of temperature for a liquid RI of 1.43 (i.e., a nominal value of 1.44).

To develop this study further, a 3D simulation based on the beam propagation method (BPM) [18] was taken advantage of to investigate the beam behavior in the coreless-MMF section of an SMS fiber structure in transmission, relying on the self-imaging effect, and when submitted to different external RIs. To investigate the influence of the coreless-MMF diameter in the presence of external RI variation, the fourth self-image length was selected for both numerical and experimental analysis.

The modeling of light propagation was done for a pure silica fiber with a refractive index of 1.444, and

three different diameters, viz., 55, 80, and 125 μm . Singlemode fibers, SMF-28, with core and cladding diameters of 8.2 and 125 μm , respectively, were used for both light input and output of the coreless-MMF section. All fibers were aligned along the same axis and had a circular cross-section. The fourth self-image (and multiples) exhibit minimum losses; our numerical simulations have shown that the optimized MMF length was 11.5, 24.2, and 58.9 mm for the SMS fiber structures with coreless-MMF diameters of 55, 80, and 125 μm , respectively. The intensity distribution of the electric field on the xz plane at the simulated coreless-MMF length of 11.5 mm and diameter of 55 μm is plotted in Figs. 2(a)–2(d), when exposed to external refractive indices of 1.0, 1.3, 1.36, and 1.42, respectively, and for operation at a fixed wavelength of 1550 nm.

Inspection of Fig. 2(a) shows clearly that, when the light field coming from the input SMF enters the coreless-MMF at $z = 0$ mm, interference between the different modes occurs along the MMF section (z direction). One notices four self-image points along the coreless-MMF section; the fourth self-image is located at its exit end, at $z = 11.5$ mm (the modeling was extended to 12.5 mm for a better visualization), thus exhibiting minimum losses. Here, the whole light field condenses into one point, due to constructive interference between the several modes, to be recoupled into the output SMF. When the RI of the surrounding medium took higher values (see Figs. 2(b) to 2(d)), the fourth self-image plane moved forward to higher lengths of the coreless-MMF section. In the situation of a broadband optical field (Fig. 1), this corresponds to a spectral wavelength peak of the sensing structure to shift as well.

Three coreless-MMFs with different diameters were experimentally tested, viz., 55, 78, and 125 μm (SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively). The length of each coreless-MMF section was set in order to provide a well-defined wavelength peak in the operation wavelength range of 1400 to 1700 nm. For each

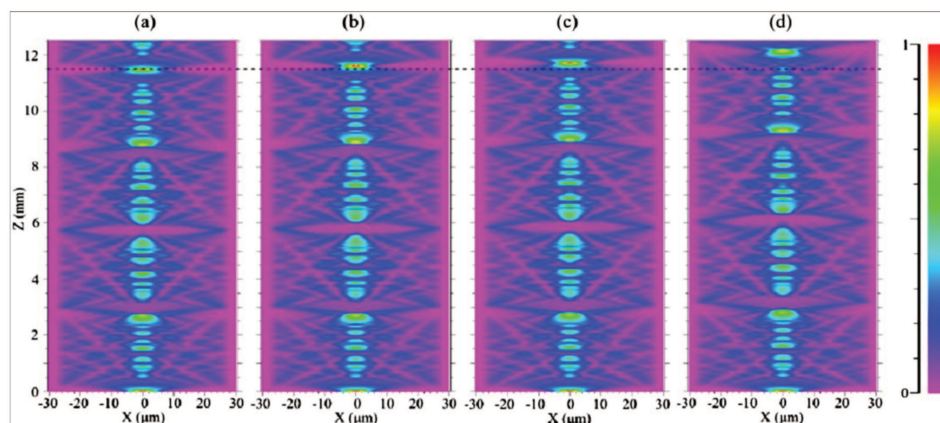


Fig. 2. (Color online) Intensity distribution of electric field at a 1550 nm wavelength on the xz plane, for the SMS fiber structure with a coreless-MMF diameter of 55 μm , when exposed to external refractive indices of (a) 1.0, (b) 1.3, (c) 1.36, and (d) 1.42.

coreless-MMF section, the optimized length found to achieve the fourth self-imaging point was 11.45, 21.37, and 58.23 mm, for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively.

The behavior of each structure to external RI variations was characterized. The sensing device characterization was performed by exposing each SMS fiber structure in contact to liquids having distinct RI in the range 1.30 to 1.43. A series of commercial RI standards from Cargille Laboratories (Cedar Grove, NJ) were accordingly used; such standards were properly corrected for the operation wavelength of 1550 nm and room temperature of 20 °C. The optical spectra of the SMS fiber structures—i.e., SMS₁, SMS₂, and SMS₃, for three different external refractive indices (i.e., 1, 1.33, and 1.4)—are depicted in Fig. 3.

Each sensing structure has a wavelength peak that was used for RI measurements, with a full width half maximum (FWHM) of approximately 48, 33, and 11 nm for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively. As can be observed, the device exhibited a substantial change in the amplitude of the optical signal, as a consequence of the change in the reflection coefficient at the interface coreless-MMF/liquid. Furthermore, wavelength shift occurred because the effective RI of the guided modes at the coreless-MMF changed when the sensing structure was submitted to RI variations of the external medium. The wavelength dependence of each SMS fiber structure on the RI variation of the surrounding medium is shown in Fig. 4, in accordance with the result attained with an etched core MMF fiber [11].

According to Fig. 4, the numerical simulations are in good agreement with the experimental results generated. As predicted, the wavelength shift increases with increasing liquid RI, but the behavior is not linear in the RI range studied. Analysis of

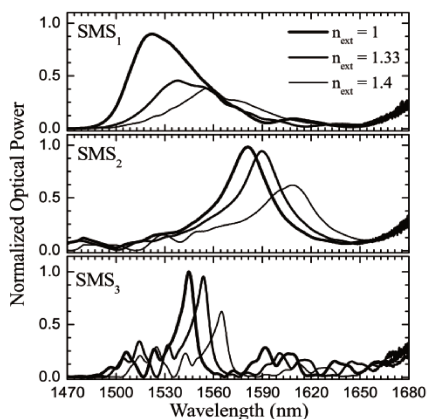


Fig. 3. Experimental spectral response of the SMS fiber structures with different coreless-MMF diameters, viz., 55, 78, and 125 μm (SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively), to distinct refractive indices, viz. 1, 1.33, and 1.4.

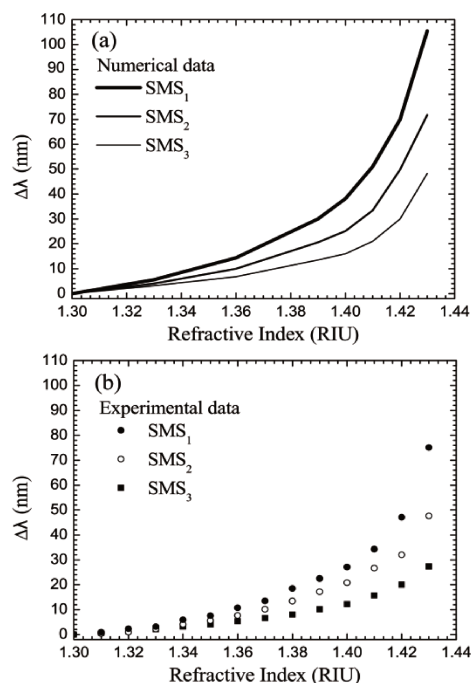


Fig. 4. Wavelength shift of the SMS fiber structures SMS₁, SMS₂, and SMS₃, with RI variations: (a) numerical data and (b) experimental results.

the simulated results (Fig 4[a]) showed that, in the lower RI range 1.30–1.33, estimated sensitivities of 186, 134, and 104 nm/RIU for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively, could be achieved, whereas in the high-sensitivity RI region 1.42–1.43, typical values of 3550, 2190, and 1820 nm/RIU for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively, could also be attained. The fiber structure SMS₁ is more sensitive to RI variations due to its smaller coreless-MMF diameter, since the interaction between the interfered high-order modes and the external medium is increased. In the lower RI range 1.30–1.33, sensitivities of 140, 98, and 79 nm/RIU for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively, could be attained (Fig. 4[b]), while in the RI range 1.42–1.43, typical values of 2800, 1560, and 735 nm/RIU for SMS₁, SMS₂, and SMS₃, respectively, were instead achieved. These results are summarized in Table 1.

Table 1. Sensitivity Coefficients for Refractive Index

	Refractive Index (nm/RIU)			
	RI Range 1.30–1.33		RI Range 1.42–1.43	
	Numerical	Experimental	Numerical	Experimental
SMS ₁	186	140	3550	2800
SMS ₂	134	98	2190	1560
SMS ₃	104	79	1820	735

A previous study using the MMI of a large-core air-dad photonic crystal fiber-based sensing structure has shown the influence of temperature upon the RI variation of water, and a maximum sensitivity of 800 nm/RIU was observed [19]. Using this feature, the proposed SMS fiber structure appears suitable to measure temperature with an enhanced sensitivity in the liquid RI of 1.43. To perform this experiment, the SMS fiber structure with the coreless-MMF diameter of 55 μm (SMS₁) was used to ensure maximum sensitivity. The sensing device was placed in contact with a Cargille RI liquid, with a nominal value of 1.44, to measure temperature variations in the high-sensitivity RI range, viz., 1.42–1.43. At the operation wavelength of 1550 nm and room temperature (20 °C), the nominal value 1.44 is to be corrected to 1.4298, considering a thermo-optic coefficient of -3.95×10^{-4} .

The sensing device was submitted to increasing values of temperature (ΔT) in the range 0–80 °C, at 5 °C steps. Results are depicted in Fig. 5.

Inspection of Fig. 5 indicates that the sensing head produces a nonlinear response to temperature variations, characterized by an ultrahigh sensitivity of $-1880 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ in the temperature range 0–25 °C. These results are over 100 times higher than the typical value of approximately 13 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ achieved in air with a coreless-MMF-based SMS fiber structure [12]. From 25 to 80 °C, a sensitivity of $-360 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ was attained.

In practice, the temperature variation induces coreless-MMF length variation (due to thermal expansion) and refractive index variation of the coreless-MMF (due to silica thermo-optic effect); hence, an optical path length variation occurs, with an associated wavelength scaling for the region measured. Therefore, using a surrounding liquid with the proper RI, a high sensitivity to temperature can be attained, with the possibility to choose the temperature range to be measured only by rescaling the external medium RI. The overall idea is that, when

temperature increases, the RI of the liquid decreases and the sensitivity to temperature decreases as well.

As an example, a sensitivity as low as 188 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ is attained when using the liquid with nominal RI of 1.44, to measure temperature in the range 60–80 °C. Rescaling the liquid RI to a nominal value of, say, 1.46 at 20 °C would permit a high sensitivity to be attained but in the temperature range of 60–80 °C. The numerical simulation unfolds a tendency similar to the experimental results (see Fig. 5). In this case, the RI variation of the fiber due to silica thermo-optic effect was considered; the effect of thermal expansion over the MMF length variation was not taken into account, since it is much smaller than the thermo-optic effect.

Although showing a high sensitivity to RI variations, the proposed SMS fiber structure is always restricted to external RI values below the effective RI of the guided modes. To overcome this limitation, a simple approach is proposed, where a polymer coating with a RI as low as 1.3 is deposited over the coreless-MMF section in order to extend the range of possible RI liquids around the MMF fiber to values above 1.43. The proposed sensing concept for the measurement of external RI changes is based on evanescent wave absorption induced by the measurand. Numerical simulations were performed for the SMS fiber structure characterized by a coreless-MMF diameter of 125 μm and coated with a polymer layer with several thicknesses, viz., 0.5, 0.75, 1.0, and 1.5 μm . The results attained are shown in Fig. 6(a).

Numerical results indicate that polymer thicknesses of 1.0 or 1.5 μm lead to a poor change in intensity, approximately 0.14 and 0.1, respectively; conversely, for polymer thicknesses of 0.5 and 0.75 μm , the intensity change is higher, approximately 0.6 and 0.5, respectively. On the other hand, one observes a decrease of the signal to nearly zero after 1.45 RIU, for polymer thicknesses of 0.5, 1.0, and 1.5 μm , thus leading to an effective measurable RI range around 1.435 and 1.45. This means that, for insufficient polymer thickness, the evanescent wave escapes into the surrounding medium that acts as cladding, whereas for excessive film thickness, the evanescent wave absorption is weak, and thus less sensitive to the surrounding medium. Therefore, the optimized polymer thickness found is 0.75 μm , since it couples a high-intensity change to an effective measurable RI range 1.43–1.48.

The proposed sensing device appears suitable for measurement of external RI for values higher than 1.43, via intensity variations of the signal (as shown in Figure 6(b)). In the past, a pH sensor based on a plastic cladding silica fiber coated with multiple sol-gel layers was proposed [20]. The sensing principle used intensity variations of the signal via evanescent wave absorption in the sensing region of the fiber structure. The optimum thickness of the thin film was found to be approximately 0.6 μm —which is in agreement with our numerical results.

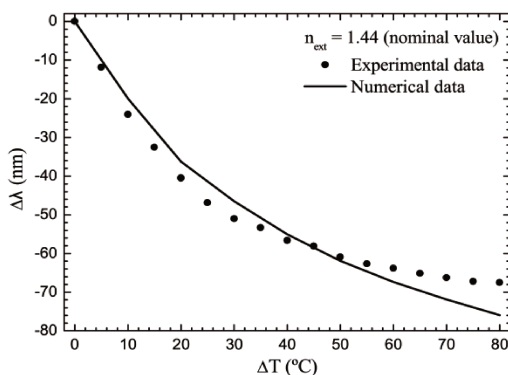


Fig. 5. Experimental and numerical results of wavelength shift of the sensing structure SMS₁ to temperature variations, in the high sensitivity RI range of 1.42–1.43 (using a liquid RI, with a nominal value of 1.44 at 20 °C).

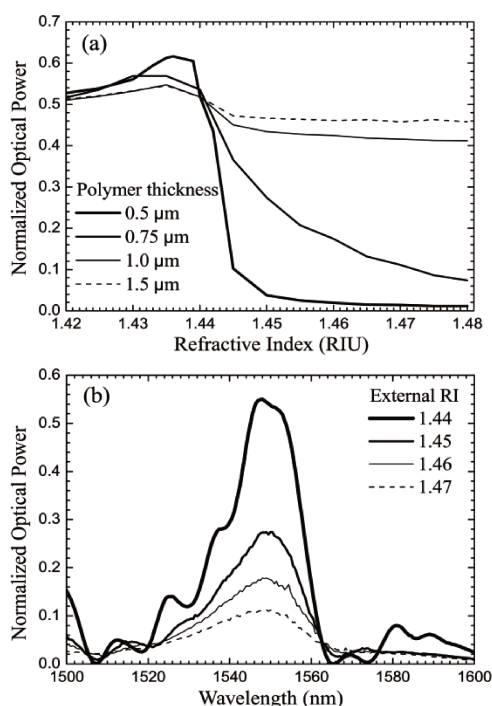


Fig. 6. (a) Intensity variation of the SMS fiber structure with a coreless-MMF diameter of 125 μm , and coated with 0.5, 0.75, 1, and 1.5 μm thick polymer layers, when submitted to external RI in the range 1.42–1.48. (b) Spectral changes of the SMS fiber structure with a coreless-MMF diameter of 125 μm and coated with a 0.75 μm thick polymer layer, when submitted to external RI in the range 1.44–1.47.

3. Conclusions

This paper reports on a highly sensitive temperature sensor, based on multimode interference. The sensing concept relies on the self-imaging effect that occurs in a coreless-MMF-based SMS fiber structure interrogated in transmission, which is intended to measure RI variations of a surrounding medium, in order to ascertain the temperature-dependence in a high sensitivity RI range.

Three MMFs with different diameters were used, viz., 55, 78, and 125 μm , and the influence of diameter on the sensitivity to RI variations was analyzed in the range 1.3–1.43. The sensitivity to external RI variations increased when the coreless-MMF diameter was decreased; a maximum sensitivity of 2800 nm/RIU for the SMS fiber structure with the lowest coreless-MMF diameter (55 μm) was achieved. Using this sensing device, a coreless-MMI-based fiber device could be developed that is highly sensitive to temperature variations in the liquid RI of 1.43 (with a nominal value 1.44); a maximum sensitivity of $-1880 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ was attained. These results are more than 100-fold typical values, approximately 13 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ and 10 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, achieved in

air with a coreless-MMF based-SMS fiber structure and a fiber Bragg grating, respectively.

The beam-propagation method (BPM) was employed in modeling light propagation along the SMS fiber structure, for the sake of comparison of experimental data and numerical simulations; one found a good agreement between them. The proposed SMS fiber structure based on the coreless-MMF unfolded a high potential for measurement of RI and temperature although restricted to external RI values below the effective RI of the guided modes. To overcome this drawback, a simple approach was proposed, based on an SMS fiber structure with a coreless-MMF diameter of 125 μm coated with polymer layer with an RI as low as 1.3, with the purpose of extending the range of possible RI liquids around the MMF fiber to values above 1.43. Numerical simulations indicated that the optimized polymer thickness was 0.75 μm , for an RI range of 1.42–1.48.

Therefore, the proposed sensing device appears suitable for a variety of applications in food and oil research. Either by changing the diameter of the coreless-MMF or coating it with a polymer layer, it will display a high sensitivity to external RI or to temperature, in an extensive RI range, say, 1.3–1.48.

This work was partially supported by a bi-national collaboration project, CAPES-FCT Brazil/Portugal (# 293/11, coordinated by authors C.M.B.C. and P.J.), by FINEP, by project Pró-Defesa CAPES/Ministério da Defesa (ref. 23038.029912/2008-05), and by project MICROPHYTE (ref. PTDC/EBB-EBI/102728/2008), funded by EU and the Portuguese State and coordinated by author F. X. M.; as well as project COST 299, funded by EU. Author S. S. received a Ph.D. fellowship (ref. SFRH/BD/47799/2008), also funded by EU and the Portuguese state and supervised by author F. X. M.

References

1. A. Kumar, R. K. Varshney, C. S. Antony, and P. Sharma, "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures," *Opt. Commun.* 219, 215–219 (2003).
2. Q. Wang and G. Farrell, "Multimode-fiber-based edge filter for optical wavelength measurement application," *Microw. Opt. Technol. Lett.* 48, 900–902 (2006).
3. P. Wang, G. Brambilla, M. Ding, Y. Semenova, Q. Wu, and G. Farrell, "High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on a tapered, multimode fiber interference," *Opt. Lett.* 36, 2233–2235 (2011).
4. A. M. Hatta, Y. Semenova, Q. Wu, and G. Farrell, "Strain sensor based on a pair of single-mode-multimode-single-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme," *Appl. Opt.* 49, 536–541 (2010).
5. S. Silva, O. Frazão, J. Viegas, L. A. Ferreira, F. M. Araújo, F. X. Malcata, and J. L. Santos, "Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode fiber optic structure," *Meas. Sci. Technol.* 22, 085201 (2011).
6. L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *J. Lightwave Technol.* 13, 615–627 (1995).
7. W. S. Mohammed, P. W. E. Smith, and X. Gu, "All-fiber multimode interference bandpass filter," *Opt. Lett.* 31, 2547–2549 (2006).

8. J. E. Antonio-Lopez, A. Castillo-Guzman, D. A. May-Arrijo, R. Selvas-Aguilar, and P. L. Wa, "Tunable multimode-interference bandpass fiber filter," *Opt. Lett.* 35, 324–326 (2010).
9. J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, P. L. Wa, and D. A. May-Arrijo, "Fiber-optic sensor for liquid level measurement," *Opt. Lett.* 36, 3425–3427 (2011).
10. Q. Wu, Y. Semenova, P. Wang, A. M. Hatta, and G. Farrell, "Experimental demonstration of a simple displacement sensor based on a bent single-mode-multimode-single-mode fiber structure," *Meas. Sci. Technol.* 22, 025203 (2011).
11. Q. Wu, Y. Semenova, P. Wang, and G. Farrell, "High sensitivity SMS fiber structure based refractometer—analysis and experiment," *Opt. Express* 19, 7937–7944 (2011).
12. J. G. Aguilar-Soto, J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, and D. A. May-Arrijo, "Fiber optic temperature sensor based on multimode interference effects," *J. Phys.* 274, 012011 (2011).
13. Q. Wang, G. Farrell, and W. Yan, "Investigation on single-mode-multimode-singlemode fiber structure," *J. Lightwave Technol.* 26, 512–519 (2008).
14. W. S. Mohammed, P. W. E. Smith, and X. Gu, "Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference," *J. Lightwave Technol.* 22, 469–477 (2004).
15. A. Mehta, W. Mohammed, and E. G. Johnson, "Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 15, 1129–1131 (2003).
16. G. Abbate, U. Bernini, E. Ragazzino, and F. Somma, "The temperature dependence of the refractive index of water," *J. Phys. D* 16, 1606–1612 (1998).
17. J. C. Owens, "Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition," *Appl. Opt.* 6, 51–59 (1967).
18. K. Kawano and T. Kitoh, *Introduction to Optical Waveguide Analysis* (Wiley, 2001), Chap. 5, pp. 165–230.
19. S. Silva, J. L. Santos, F. X. Malcata, J. Kobelke, K. Schuster, and O. Frazão, "Optical refractometer based on large-core, air-clad photonic crystal fibers," *Opt. Lett.* 36, 852–854, (2011).
20. S. T. Lee, J. Gin, V. P. N. Nampoori, C. P. G. Vallabhan, N. V. Unnikrishnan, and P. Radhakrishnan, "A sensitive fibre optic pH sensor using multiple sol-gel coatings," *J. Opt. A* 3, 355–359 (2001).

Curvature and Temperature Discrimination Using Multimode Interference Fiber Optic Structures—A Proof of Concept

Susana Silva, Edwin G. P. Pachon, Marcos A. R. Franco, Pedro Jorge, J. L. Santos, F. Xavier Malcata, Cristiano M. B. Cordeiro, and Orlando Frazão

Abstract—Singlemode-multimode-singlemode fiber structures (SMS) based on distinct sections of a pure silica multimode fiber (coreless-MMF) with diameters of 125 and 55 μm , were reported for the measurement of curvature and temperature. The sensing concept relies on the multimode interference that occurs in the coreless-MMF section and, in accordance with the length of the MMF section used, two fiber devices were developed: one based on a bandpass filter (self-image effect) and the other on a band-rejection filter. Maximum sensitivities of 64.7 nm/m and 13.08 pm/°C could be attained, for curvature and temperature, respectively, using the band-rejection filter with 55 μm -MMF diameter. A proof of concept was also explored for the simultaneous measurement of curvature and temperature by means of the matrix method.

Index Terms—Curvature, multimode interference, optical fiber sensors, SMS fiber structure, self-imaging, simultaneous measurement, temperature.

I. INTRODUCTION

MULTIMODE INTERFERENCE (MMI) is a well-established concept in integrated optics and recently in optical fibers [1], [2]. MMI-based fiber devices have been explored for several applications using either the self-imaging phenomena or the band-rejection filtering [2], [3]. MMI devices usually rely on a singlemode-multimode-singlemode (SMS)

fiber configuration where a step-index multimode fiber (MMF) is used. To obtain a bandpass filter, a specific MMF length corresponding to the self-imaging phenomena is required [1]. In other hand, a band-rejection filter is achieved in the operation wavelength of 1550 nm with ca. 40 mm-long MMF section [2]. Recently, it was demonstrated that controlling the process of the taper fabrication in the MMF region it is possible to attain a bandpass filter in the desired operation wavelength [4].

MMI fiber devices have been developed mainly for fiber laser applications [5] or sensing elements like strain [6], temperature [7], curvature [8], refractive index [9] and simultaneous measurement of strain and temperature [10], [11]. Recently, a curvature SMS sensor with residual sensitivity to temperature and strain was also proposed [12].

This work presents a detailed study of SMS fiber structures based on a coreless-MMF for the simultaneous measurement of curvature and temperature. Two different fiber structures were developed as bandpass filter (self-image concept) and band-rejection filter. Also, MMFs with 125 and 55 μm diameter were used for each device. Finally, a matrix equation is proposed for simultaneous measurement of the physical parameters analyzed.

II. EXPERIMENTAL RESULTS

The sensing head consists of a SMS fiber structure, i.e., a coreless-MMF section (pure silica rod) spliced between two SMFs and interrogated in transmission, as it is schematically shown in Fig. 1. A broadband source (BBS) in the 1550 nm spectral range and 300 nm bandwidth was used, and an optical spectrum analyzer (OSA) as the interrogation unit. The principle underlying the SMS fiber structure concept is based on the premise that when the light field coming from the input SMF enters the coreless-MMF, interference between the different modes occurs along the MMF section.

The light is coupled into the output SMF—and it will depend on the amplitudes and relative phases of the several modes at the exit end of the coreless-MMF. Therefore, the coupling efficiency, for a given length L of the MMF section, is strongly wavelength-dependent. In this work, the operating mechanism of the sensing head relies on either constructive or destructive interference at the output end of the coreless-MMF section, which occurs for a specific length of the MMF used. The result is a bandpass (BP) or a band-rejection (BR) filter with unique spectral characteristics that, in principle, will have different

Manuscript received June 20, 2012; revised August 31, 2012; accepted September 30, 2012. Date of publication October 05, 2012; date of current version December 05, 2012. This work was supported in part by a bi-national collaboration project, CAPES-FCT Brazil/Portugal (# 293/11, coordinated by authors C. M. B. Cordeiro and P. Jorge), in part by FINEP, in part by project Pró-Defesa CAPES/Ministério da Defesa (ref. 23038.029912/2008-05), and in part by project MICROPHYTE (ref. PTDC/EBB-EBI/102728/2008), funded by EU and the Portuguese State and coordinated by author F. X. Malcata. The work of S. Silva was supported in part by a Ph.D. fellowship (ref. SFRH/BD/47799/2008), also funded by EU and the Portuguese State and supervised by author F. X. Malcata.

S. Silva, P. Jorge, J. L. Santos and O. Frazão are with INESC Porto and Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal (e-mail: sfsilva@inescporto.pt).

E. G. P. Pachon and C. M. B. Cordeiro are with Instituto de Física “Gleb Wataghin,” Universidade Estadual de Campinas—UNICAMP, 13085-859 Campinas, São Paulo, Brazil.

M. A. R. Franco is with Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos—São Paulo 12237-970, Brazil.

F. X. Malcata is with Instituto Superior da Maia (ISMAI), Avenida Carlos Oliveira Campos, 4475-690 Avioso S. Pedro, Portugal, and also with ITQB—Instituto de Tecnologia Química e Biológica, Universidade Nova de Lisboa, Avenida da República, 2780-157 Oeiras, Portugal (e-mail: fmalcata@ismai.pt).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JLT.2012.2222865

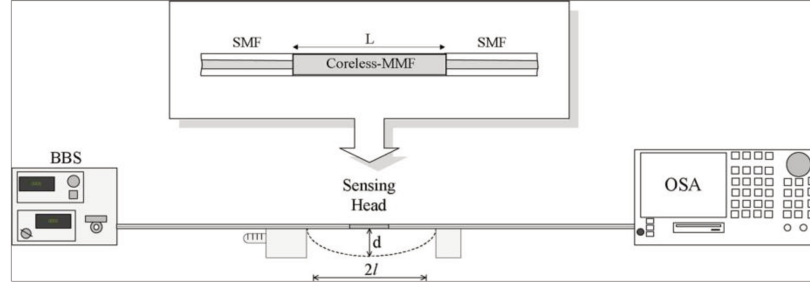


Fig. 1. Experimental setup and detail of the coreless-MMF based-SMS fiber structure.

TABLE I
OPTIMIZED LENGTH OF THE CORELESS-MMF SECTIONS

	Coreless-MMF length (mm)	
	Bandpass filter	Band-rejection filter
SMS ₁₂₅	58.23	14
SMS ₅₅	11.45	26.4

sensitivities to curvature. For each sensing device, two coreless-MMFs with different diameters were used, namely 125 and 55 μm (SMS₁₂₅ and SMS₅₅, respectively). Splices between the SMF and the 55 μm -coreless-MMF were performed manually with a fiber fusion splicing machine. Due to the smaller diameter of this fiber, perfect alignment in the splicing process could not be guaranteed; a maximum misalignment of $\sim 5 \mu\text{m}$ for SMS₅₅ was estimated. When the 125 μm -coreless-MMF was used, automatic splice could be performed (SM-MM program). The length of each coreless-MMF section was set in order to provide a bandpass or a band-rejection peak in the operation wavelength range of 1400–1700 nm. The optimized length found, for each coreless-MMF section of each sensing head, is summarized in Table I as follows:

In the case of the bandpass filter based-sensors, the first self-image length was selected for experimental analysis. Previous studies have shown that the first self-image (and multiples) exhibits minimum losses and therefore maximum amplitudes of the spectral signals may be achieved [3]–[9].

Taking the case of the bandpass filter (self-imaging effect), a 3D-simulation based on the BPM method [13] was used to investigate the beam behavior in the coreless-MMF section of an SMS fiber structure in transmission. The modeling of light propagation was done for a pure silica rod with a refractive index (RI) of 1.444, external RI of 1.0, and two different diameters, viz. 55 and 125 μm . SMFs with core and cladding diameters of 8.2 and 125 μm , respectively, were used for both light input and output of the coreless-MMF section. All fibers were aligned along the same axis and possessed a circular cross-section. The number of propagating modes in each MMF was also estimated [14]: values of ~ 7000 and ~ 35000 were found for the 55 and 125 μm -diameter coreless-MMFs, respectively. The intensity distribution of the electric field on the xz plane at

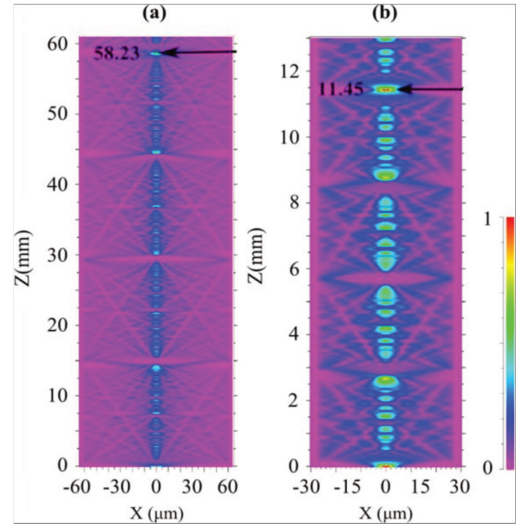


Fig. 2. Intensity distribution of the electric field on the xz plane at 1550 nm-wavelength, for the bandpass filters with (a) 125 μm and (b) 55 μm coreless-MMF diameters.

1550 nm-wavelength, for the simulated bandpass filters with diameters of 55 and 125 μm are plotted in Fig. 2(a) and (b), respectively.

The numerical simulations have shown that the optimized MMF length was 11.5 and 58.9 mm, for the fiber structures with coreless-MMF diameters of 55 and 125 μm , respectively, which is in agreement with the experimental values presented in Table I.

A. Bandpass Filter Based-SMS Fiber Sensor

Bandpass filtering arises from the self-imaging effect which occurs when the light field at the input of the coreless-MMF section is replicated on its output, in both amplitude and phase, for a specific wavelength. At the exit end of the coreless-MMF, all the light field condensates into one point, due to constructive interference between the several modes, to be recoupled into the output SMF, and thus providing a well defined bandpass wavelength peak. Fig. 3 presents the first self-image spectral response

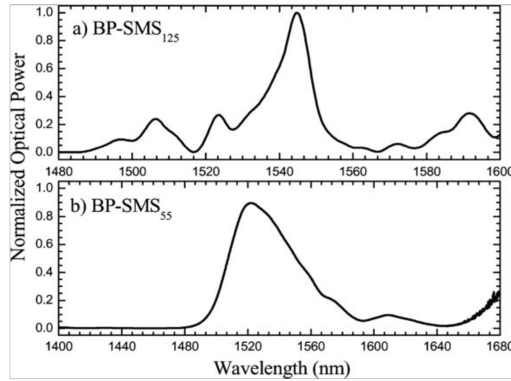


Fig. 3. Spectral responses of the bandpass filters with coreless-MMF diameters of (a) 125 and (b) 55 μm ($\bullet$ BP-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BP-SMS₅₅, respectively).

of the bandpass filters with coreless-MMF diameters of a) 125 and b) 55 μm ($\bullet$ BP-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BP-SMS₅₅, respectively).

The sensing structures, $\bullet$ BP-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BP-SMS₅₅, have a wavelength peak centered at 1544.8 and 1522.4 nm, respectively. The behavior of each resonance when subjected to curvature was characterized by fixing each SMS fiber structure at two points, 250 mm distant from each other; one of these points is a translation stage that allows the fiber to bend (see Fig. 1). The bending displacement, d , was applied to each SMS via sequential 40 μm -displacements.

Hence, the curvature ($1/R$) of the fiber structure changed by $2d/(d^2 + l^2)$, where l is the half distance between the two fixed points. The obtained results are depicted in Fig. 4. Results show that both sensors have linear responses in the curvature range studied (1.28 – 1.52) m^{-1} . Also, sensitivities to curvature of (11.3 ± 0.2) nm·m and (38.1 ± 0.7) nm·m, for $\bullet$ BP-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BP-SMS₅₅, respectively, could be achieved. Typically, the field profile of an SMS fiber structure is symmetrically distributed along the direction of propagation of the coreless-MMF. Although, when curvature is applied, this symmetry is broken. Fig. 5 shows an example of the loss of symmetry when curvature is applied to $\bullet$ BP-SMS₅₅.

B. Band-Rejection Filter Based-SMS Fiber Sensor

Multimode interference characterizes by the field profile variation along the MMF section, although remaining symmetrically distributed along the direction of propagation.

The band-rejection filter appears in a specific operation wavelength when interference between specific modes is destructive in the core region. This effect may be observed with different lengths of the coreless-MMF. The result is the amplitude decrease of the spectral signal in such way that a band-rejection based-spectral response is observed. Fig. 6 shows the optical spectra of the band-rejection filters with coreless-MMF diameters of a) 125 and b) 55 μm ($\bullet$ BR-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BR-SMS₅₅, respectively).

Each sensing structure presents a wavelength band-rejection centered at 1540.2 and 1576.7 nm, for $\bullet$ BR-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BR-SMS₅₅, respectively. These fiber structures were also

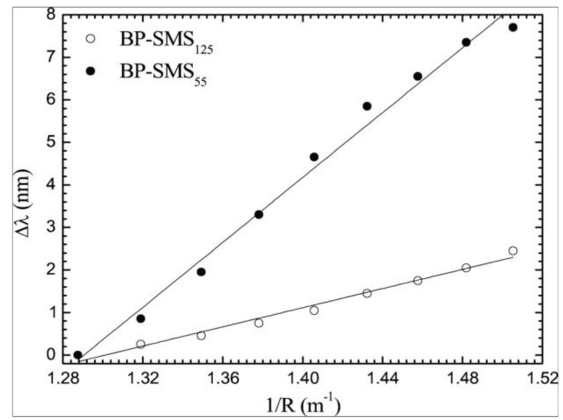


Fig. 4. Curvature response of the bandpass filters, ($\bullet$) $\bullet$ BP-SMS₁₂₅ and ($\bullet$) $\bullet$ BP-SMS₅₅.

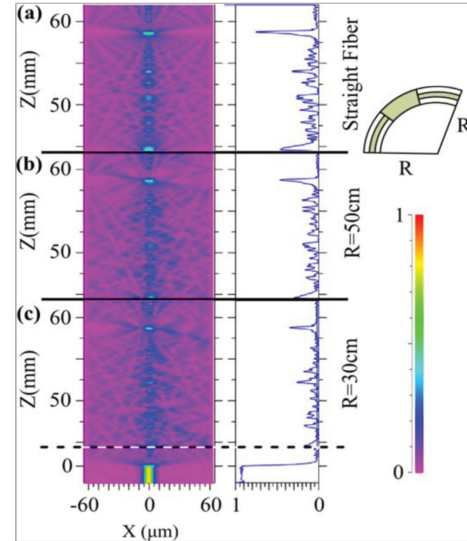


Fig. 5. Intensity distribution of the BP-SMS₅₅ electric field on the xz plane at 1550 nm-wavelength, and for different curvatures applied: (a) straight fiber, (b) $R = 50$ cm and (c) $R = 30$ cm.

characterized in terms of curvature. Each sensing device was fixed at two points, 250 mm distant from each other. The bending displacement, d , was applied by means of the translation stage via sequential 25 μm -displacements. The sensitivities to curvature are presented in Fig. 7.

One can observe that both sensors have linear responses in the curvature range studied (1.28 – 1.52) m^{-1} , and sensitivities of (-12.1 ± 0.1) nm·m and (-64.7 ± 0.5) nm·m, for $\bullet$ BR-SMS₁₂₅ and $\bullet$ BR-SMS₅₅, respectively, could be attained. Table II summarizes the attained results.

Similar to the bandpass filter, interference between higher-order modes is more affected by bending of the MMF section, while lower-order modes are focused within a smaller area near

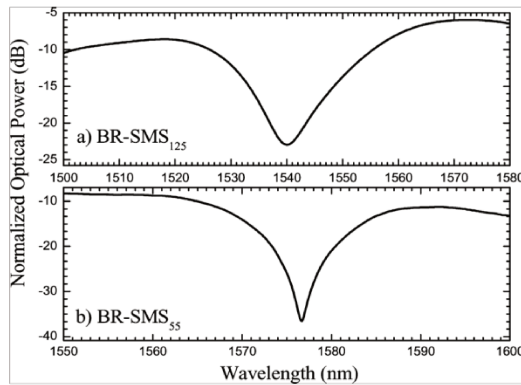


Fig. 6. Spectral responses of the band-rejection filters with coreless-MMF diameters of (a) 125 and (b) 55 μm (BR-SMS₁₂₅ and BR-SMS₅₅, respectively).

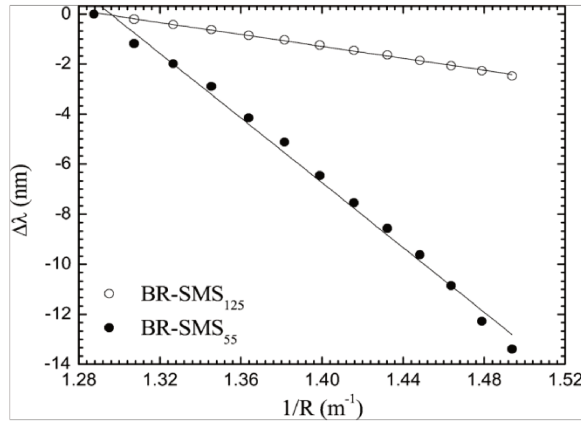


Fig. 7. Curvature response of the band-rejection filters, (○) BR-SMS₁₂₅ and (●) BR-SMS₅₅.

TABLE II
CURVATURE SENSITIVITIES OF THE SMS FIBER STRUCTURES

	Sensitivity to curvature (nm.m)	
	Bandpass filter	Band-rejection filter
SMS ₁₂₅	11.3	-12.1
SMS ₅₅	38.1	-64.7

the fiber core and are consequently less affected by the bending disturbance. Therefore, both filter types will present sensitivity increase to curvature with the decrease of the coreless-MMF diameter.

C. Temperature Measurement

The response of the BP- and BR-SMS sensing heads to temperature variations was also characterized, as shown in Figs. 8 and 9, respectively. Each structure was placed in a tube furnace, and submitted to increasing values of temperature in the range 0–80°C, with 5°C steps.

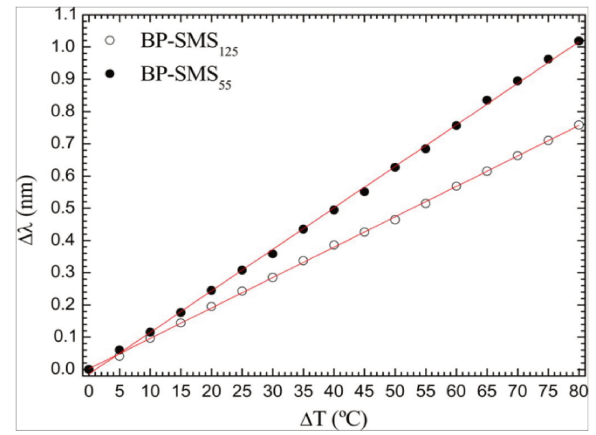


Fig. 8. Wavelength shift versus temperature variation for the bandpass filter.

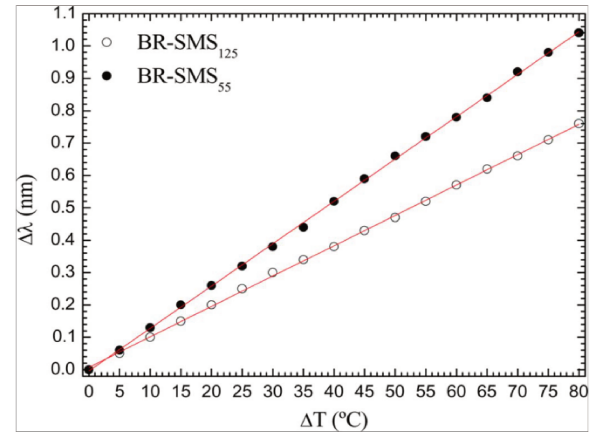


Fig. 9. Wavelength shift versus temperature variation for the band-rejection filter.

TABLE III
TEMPERATURE SENSITIVITIES OF THE SMS FIBER STRUCTURES

	Sensitivity to temperature (pm/°C)	
	Bandpass filter	Band-rejection filter
SMS ₁₂₅	9.44	9.38
SMS ₅₅	12.88	13.08

The SMS fiber-based filters with the same diameter have similar sensitivities to temperature. This was somewhat expected since the temperature variation does not change the SMF-silica rod launching conditions; the results are determined by the temperature dependence of the refractive index and the thermal expansion of the silica fiber material. In both cases, one can observe that the sensing structures with a 55 μm -coreless-MMF are more sensitive to temperature; this happens because the multimode interference is more affected by the thermal expansion in the MMF with a smaller diameter. Table III summarizes the temperature sensitivity values attained for the SMS fiber structures.

TABLE IV
MATRIX EQUATIONS GIVEN BY THE COMBINATION OF BR AND BP-SMS FIBER STRUCTURES

		BP-SMS	
		55 μm	125 μm
BR-SMS	55 μm	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \kappa_{C(BR-SMS_{55})} & -\kappa_{C(BP-SMS_{55})} \\ -\kappa_{T(BR-SMS_{55})} & \kappa_{T(BP-SMS_{55})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{55}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{55}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \kappa_{C(BR-SMS_{125})} & -\kappa_{C(BP-SMS_{125})} \\ -\kappa_{T(BR-SMS_{125})} & \kappa_{T(BP-SMS_{125})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{125}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{125}} \end{bmatrix}$
	125 μm	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \kappa_{C(BR-SMS_{125})} & -\kappa_{C(BP-SMS_{125})} \\ -\kappa_{T(BR-SMS_{125})} & \kappa_{T(BP-SMS_{125})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{125}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{125}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \kappa_{C(BR-SMS_{55})} & -\kappa_{C(BP-SMS_{55})} \\ -\kappa_{T(BR-SMS_{55})} & \kappa_{T(BP-SMS_{55})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{55}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{55}} \end{bmatrix}$

TABLE V
MATRIX EQUATIONS WITH THE OBTAINED CURVATURE AND TEMPERATURE COEFFICIENTS, AND GIVEN BY THE COMBINATION OF BR AND BP-SMS FIBER STRUCTURES

		BP-SMS	
		55 μm	125 μm
BR-SMS	55 μm	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -64.7 & -38.1 \\ -13.08 \times 10^{-3} & 12.88 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{55}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{55}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -64.7 & -11.3 \\ -13.08 \times 10^{-3} & 9.44 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{125}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{125}} \end{bmatrix}$
	125 μm	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -12.1 & -38.1 \\ -9.38 \times 10^{-3} & 12.88 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{55}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{125}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} -12.1 & -11.3 \\ -9.38 \times 10^{-3} & 9.44 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{BP-SMS_{125}} \\ \Delta\lambda_{BR-SMS_{125}} \end{bmatrix}$

D. Concept for Simultaneous Measurement of Temperature and Curvature

In this section a proof of concept is explored for the simultaneous measurement of temperature and curvature. The objective is to use the matrix method in order to identify the best pair of SMS fiber sensors able to perform the simultaneous measurement of both physical parameters. The wavelength shifts induced by changes in curvature and temperature are given in the matrix form by:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{i,j} \\ \Delta\lambda_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{Ti,j} & \kappa_{Ci,j} \\ \kappa_{Ti,j} & \kappa_{Ci,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} \quad (1)$$

The measurand values can be calculated by inverting the matrix (1) as follows:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \kappa_{Ci,j} & -\kappa_{Ci,j} \\ -\kappa_{Ti,j} & \kappa_{Ti,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{i,j} \\ \Delta\lambda_{i,j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $\kappa_{Ci,j}$ and $\kappa_{Ti,j}$ are the curvature and temperature coefficients, $i, j = (\text{BP-SMS or BR-SMS})$, (55 or 125 μm) and D ($\text{nm}^2 \cdot \text{m}^\circ\text{C}$) is the matrix determinant. In this case, four matrix solutions are possible as shown in Tables IV and V.

The determinant (D) of each matrix was calculated in order to determine the best solution for simultaneous measurement of curvature and temperature. In order to have a sensing head with proper discrimination performance, the determinant should be as high as possible [15]. The obtained results are presented in Table VI as follows:

TABLE VI
MATRIX DETERMINANTS OBTAINED BY THE COMBINATION OF BR AND BP-SMS FIBER STRUCTURES

		Matrix determinant ($\text{nm}^2 \cdot \text{m}^\circ\text{C}$)	
		BP-SMS	
		55 μm	125 μm
BR-SMS	55 μm	-1.33	-0.76
	125 μm	-0.51	-0.22

Therefore, the best value attained ($-1.33 \text{ nm}^2 \cdot \text{m}^\circ\text{C}$) corresponds to the sensing head composed by a **BR-SMS**₅₅ and **BP-SMS**₅₅ in series.

III. CONCLUSION

This work presented an SMS fiber structure based on a sections of pure silica MMF for the simultaneous measurement of curvature and temperature as proof concept. Two fiber devices were developed according with the MMF length used: one based on bandpass filtering (self-image effect) and the other on a band-rejection filter. Also, two coreless-MMFs with different diameters were used for each device, viz. 125 and 55 μm , and its influence to curvature and temperature variations was analyzed. Experimental results indicated that the sensing structures using the coreless-MMF with 55 μm diameter had highest sensitivity to both physical parameters. In practice, maximum sensitivities of 38.1 and -64.7 nm-m were attained, for the bandpass (**BP-SMS**₅₅) and band-rejection (**BR-SMS**₅₅) fiber devices, respectively. The temperature sensitivity of each SMS

fiber device was also analyzed. The obtained results were explored for simultaneous measurement of temperature and curvature. Using the matrix method it was shown that **BR**–SMS₅₅ and **BP**–SMS₅ in series is the best combination for multiparameter measurement.

REFERENCES

- [1] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 13, pp. 615–627, 1995.
- [2] O. Frazão, S. Silva, J. Viegas, L. A. Ferreira, F. M. Araújo, and J. L. Santos, "Optical fiber refractometry based on multimode interference," *Appl. Opt.*, vol. 50, pp. E184–188, 2011.
- [3] W. S. Mohammed, P. W. E. Smith, and X. Gu, "All-fiber multimode interference bandpass filter," *Opt. Lett.*, vol. 31, pp. 2547–2549, 2006.
- [4] C. R. Biazoli, S. Silva, M. A. R. Franco, O. Frazão, and C. M. B. Cordeiro, "Multimode interference tapered fiber refractive index sensors," *Appl. Opt.*, submitted.
- [5] A. Castillo-Guzman, J. E. Antonio-Lopez, R. Selvas-Aguilar, D. A. May-Arrioja, J. Estudillo-Ayala, and P. L. Wa, "Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect," *Opt. Exp.*, vol. 18, pp. 591–597, 2010.
- [6] E. Li, "Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, pp. 1266–1268, 2007.
- [7] R. X. Gao, Q. Wang, F. Zhao, B. Meng, and S. L. Qu, "Optimal design and fabrication of SMS fiber temperature sensor for liquid," *Opt. Commun.*, vol. 283, pp. 3149–3152, 2010.
- [8] Y. Gong, T. Zhao, Y. Rao, and Y. Wu, "All-fiber curvature sensor based on multimode interference," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, pp. 679–681, 2011.
- [9] S. Silva, E. G. P. Pachon, M. A. R. Franco, J. G. Hayashi, F. X. Malcata, O. Frazão, P. Jorge, and C. M. B. Cordeiro, "Ultra-high temperature-sensitivity sensor based on multimode interference," *Appl. Opt.*, vol. 51, pp. 3236–3242, 2012.
- [10] Q. Wu, Y. Semenova, A. M. Hatta, P. Wang, and G. Farrell, "Single-mode-multimode-singlemode fiber structures for simultaneous measurement of strain and temperature," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, pp. 2181–2185, 2011.
- [11] L. Coelho, J. Kobelke, K. Schuster, and O. Frazão, "Multimode interference in outer cladding large-core air-clad photonic crystal fiber," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, pp. 1009–1011, 2012.
- [12] S. Silva, O. Frazão, J. Viegas, L. A. Ferreira, F. M. Araújo, F. X. Malcata, and J. L. Santos, "Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode fiber optic structure," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, p. 085201, 2011.
- [13] W. Jin, W. C. Michie, G. Thursby, M. Konstantaki, and B. Culshaw, "Simultaneous measurement of strain and temperature: Error analysis," *Opt. Eng.*, vol. 36, pp. 598–609, 1997.
- [14] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides*. New York: Elsevier, 2006.
- [15] K. Kawano and T. Kitoh, *Introduction to Optical Waveguide Analysis*. New York: Wiley, 2001, ch. 5, pp. 165–230.

Susana Silva received the degree in applied physics (optics and electronics) and the M.Sc. in optoelectronics and lasers from the University of Porto, Porto, Portugal, in 2004 and 2007, respectively, where she is currently working towards the Ph.D. degree in physics.

She is currently with INESC Porto in the Optoelectronics and Electronic Systems Unit. She has published more than 20 papers in international journals and more than 30 papers in national and international conferences. Her research interests include fiber-optic sensing, Bragg grating technology and biosensing.

Ms. Silva is a member of European Optical Society (EOS).

Edwin G. P. Pachon received the degree in physics (condensed matter) from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia in 2010. He is currently working towards the M.Sc. degree in physics at the Universidade Estadual de Campinas, Brazil.

He is currently with IFGW, Departamento de Eletrônica Quântica, in the Laboratório de Fibras Especiais e Matérias Fotônicas. His research interest includes fiber-optic sensing.

Marcos A. R. Franco received the B.S. degree in physics from the Pontifical Catholic University, São Paulo, Brazil, in 1983, the M.Sc. degree in physics from the University of São Paulo, São Paulo, in 1991, and the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of São Paulo, in 1999.

He is currently a Researcher at the Institute of Advanced Studies (IEAv), São José dos Campos-SP, and a Professor at the Institute of Technology of Aeronautics (ITA), São José dos Campos-SP, in the postgraduate program in Science and Space Technologies. He is the head of the Computational Electromagnetic Laboratory at IEAv. His main research interests include the applied electromagnetic, computational modeling of electromagnetic devices, optical fibers, fiber optic sensors, photonic crystal fibers, microstructured optical fibers and integrated optics.

Pedro Jorge received the degree in applied physics from the University of Minho, 4710-057 Braga, Portugal, in 1996, the M.Sc. degree in optoelectronics and lasers from the University of Porto, Portugal, in 2000, and in 2006 concluded his Ph.D. program at Porto University in collaboration with the Department of Physics and Optical Sciences at the University of Charlotte, NC.

Since 1997 he has been involved in several research and technology transfer projects related to optical fibre sensing technology, developing new sensing configurations and interrogation techniques for optical sensors, both as a researcher and more recently as project leader and manager. He is currently a Senior researcher at INESC Porto where he leads the Biochemical Sensors team exploring the potential of optical fibre and integrated optics technologies in environmental and medical applications. He has more than 100 publications in the fields of sensors in national and international conferences and peer reviewed journals and also holds two patents.

J. L. Santos received the degree in applied physics (optics and electronics) and the Ph.D. degree in multiplexing and signal processing in fiber-optic sensors from the University of Porto, Porto, Portugal, in 1983 and 1993, and research performed partially at the Department of Physics, University of Canterbury, Kent, U.K.

He is a Full Professor with the Department of Physics, University of Porto, and he was for 15 years the Manager of the Optoelectronics and Electronic Systems Unit, INESC Porto. His main research interests are in the optical fiber sensing field and in optical fiber technology. Dr. Santos is also a member of the Optical Society of America (OSA), The International Society for Optical Engineers (SPIE), and the Planetary Society.

F. Xavier Malcata received the Licenciatura degree in chemical engineering from the University of Porto, Porto, Portugal, in 1988, and the Ph.D. degree in chemical engineering from the University of Wisconsin, Madison, in 1992.

He was Dean of the College of Biotechnology, Portuguese Catholic University, for 11 years, and is currently a Full Professor at the Instituto Superior da Maia, Maia, Portugal. His research interest include various aspects of bioreactor and bioprocess engineering, including analytical devices for monitoring. More recently, the R&D group under his leadership has been investing in microalga-mediated biotechnology, including alternative vectors for production of clean fuels.

Cristiano M. B. Cordeiro received the Ph.D. from the State University of Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil.

He is Assistant Professor with UNICAMP and postdoc from University of Bath, England. Dr. Cordeiro is head of the Specialty Optical Fiber & Photonics Materials Laboratory (LaFE) at UNICAMP. The main research areas of the laboratory are the development and application of silica photonic crystal fibers, microstructured polymer optical fibers and micro/nanofibers. Topics of interest also include the waveguide structural and material post-processing for exploring new fiber functionalities. Applications related with optical devices and sensors, telecommunications and nanophotonics are under investigation.

Orlando Frazão received the degree in physics engineering (optoelectronics and electronics) from the University of Aveiro, Aveiro, Portugal, and the Ph.D. degree in physics from the University of Porto, Porto, Portugal, in 2009.

From 1997 to 1998, he was with the Institute of Telecommunications, Aveiro. Presently, he is a Senior Researcher at the Optoelectronics and Electronic Systems Unit, INESC Porto. He has published about 250 papers, mainly in international journals and conference proceedings, and his present research interests included optical fiber sensors and optical communications.

Dr. Frazão is a member of the Optical Society of America (OSA) and The International Society for Optical Engineers (SPIE).

Artigo OFS

Spectral bandwidth analysis of high sensitivity refractive index sensor based on multimode interference fiber device

Edwin G. P. Pachon^a, Marcos A. R. Franco^{b,c} and Cristiano M. B. Cordeiro^a

^a Instituto de Física "Gleb Wataghin" – IFGW, UNICAMP, Campinas, SP, Brazil

^b Instituto de Estudos Avançados – IEAv, São José dos Campos, SP, Brazil

^c Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, SP, Brazil

ABSTRACT

Fiber optic structures based on multimode interference were investigated to the refractive index (RI) sensing. The proposed device is a singlemode-multimode-singlemode (SMS) structure, where the multimode section is a coreless fiber (MMF). The numerical analyses were carried out by beam propagation and modal expansion methods. Ultra-high sensitivity was obtained: 827 nm/RIU over a RI range of 1.30–1.44 and a maximum sensitivity of 3500 nm/RIU for RI~1.43, considering $\Delta_{RI} = 0.01$. The dependence of spectral bandwidth was investigated taking into account the multimode fiber diameter and the coupling efficiency between modes at the input junction singlemode-multimode.

Keywords: Multimode interference, Refractive Index Sensor, Refractive Index Measurement, Fiber Optic Sensors

1. INTRODUCTION

Multimode interference (MMI) devices based on all-fiber have been used to build sensors for many physical parameters such as: temperature, pressure, strain, and refractive index [1]–[12]. Basically an all-fiber MMI device consists of a join of three optical segments: a step-index multimode fiber (MMF) spliced between two single-mode fibers (SMF), forming a SMS structure [1], [4], and [7]. The light coming from the input SMF excites several modes of the MMF section and, thus, causing interference among them along the fiber. The MMF length (L_{MMF}) is determined so that the interference pattern rebuilds the optical intensity and phase of the launch signal at start of the multimode region. The self-image occurs successive times along the MMF. If MMF section has these optimized lengths the self-image at output SMF provides a bandpass spectral peak. The lengths where the self-images occur depend on the: wavelength, MMF diameter, and the refractive index (RI) of the external medium at the MMF coreless region.

In this work, we present a SMS structure based on a pure silica coreless MMF section, with reduced diameter to improve the sensitivity of a refractometric sensor. The designs were numerically investigated by vectorial wide-angle beam propagation (BeamProp - Rsoft) and full vectorial modal expansion (FIMMPROP - Photon Design) softwares. Three SMS structures were considered allowing reaching an ultra-high sensitivity to RI variation. The influence of dimensional parameters of the MMF section over the RI sensor sensitivity and over the spectral transmission bandwidth is studied taking into account the number of excited modes at MMF and the coupling efficiency between the fundamental mode at the SMF and the modes at the MMF. In both input and output tips it was used a standard singlemode optical fiber (SMF-28) and between then a spliced coreless MMF section. Three MMF diameters were numerically considered: 125 μm , 78 μm , and 55 μm . The Figure 1(a) presents the typical geometric models of the SMS structures considering the three MMF diameters.

2. RESULTS

Figures 2(a)–(c) present the interferometric pattern in the xz plane for the SMS structure with MMF diameters (Φ_{MMF}) of 55 μm , 78 μm , and 125 μm , respectively. For an external medium with refractive index $n_{\text{liq}}=1.0$ the length of first self-image is 11,373 μm , 22,801 μm , and 58,412 μm for Φ_{MMF} of 55 μm , 78 μm , and 125 μm , respectively. The Figure 2(d) presents the normalized spectral transmission to the most sensible SMS structure, with $\Phi_{MMF} = 55 \mu\text{m}$, as function of external RI. Figure 2(e) present the wavelength shifts at the maximal transmission peak as a function of the RI. The curve to $\Phi_{MMF}=55 \mu\text{m}$ presents a better sensitivity with an average of 827 nm/RIU over a RI range of 1.30–1.44 [4]. To put this result in perspective we compare it with the result recently presented in [9], that uses a SMS structure with a tapered multimode section. The average sensitivity in our case is 1010 nm/RIU, two times higher than that obtained in [9] (~487 nm/RIU) to RI range of 1.33 to 1.44. A maximum sensitivity of 3500 nm/RIU is achieved for RI ~ 1.43, 80%

OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, edited by
Yanbiao Liao, Wei Jin, David D. Sampson, Ryozi Yamauchi, Youngjoo Chung, Kentaro Nakamura, Yunjiang Rao,
Proc. of SPIE Vol. 8421, 84217Q · © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786/12/\$18 · doi: 10.1117/12.969928

Proc. of SPIE Vol. 8421 84217Q-1

Downloaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 12/11/2012 Terms of Use: <http://spiedigitallibrary.org/terms>

higher than the obtained in [9] (~ 1913 nm/RIU). The indexes in which the sensor exhibits maximum resolution are at indexes that are closed to the index of the coreless MMF section.

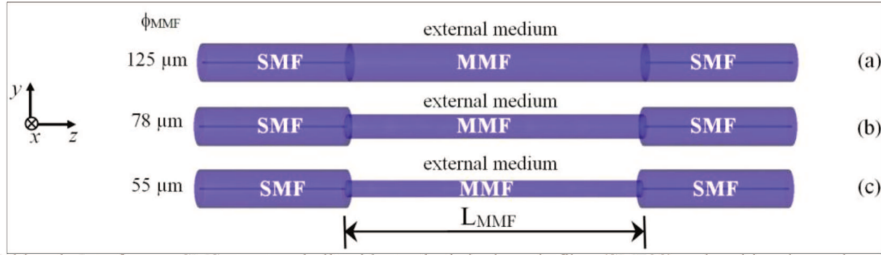


Figure 1. Multimode Interference SMS structure built with standard singlemode fiber (SMF28) and multimode coreless fiber (MMF). SMS structures with MMF diameters of 125 μm , 78 μm , and 55 μm .

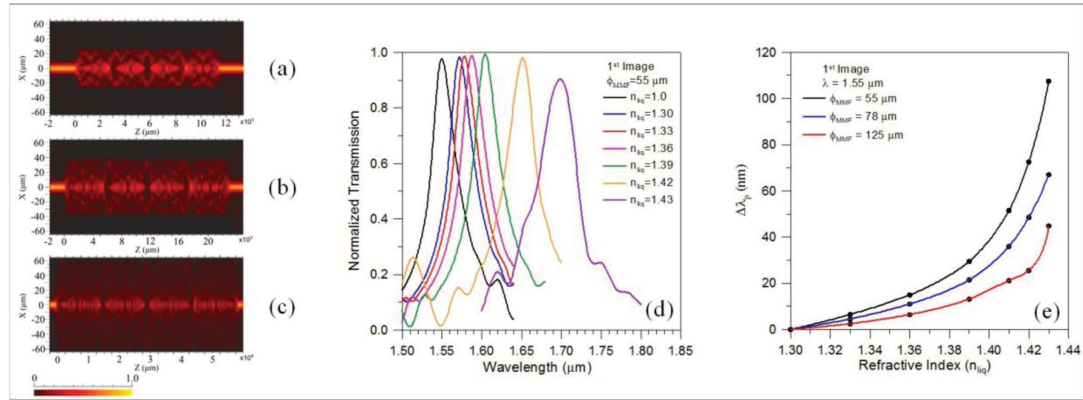


Figure 2. (a)-(c) Intensity distribution of optical power on the xz plane (transmission on z direction) at 1550 nm wavelength. (a) SMS structure with MMF diameter of 55 μm . (b) SMS structure with $\phi_{\text{MMF}} = 78$ μm . (c) SMS structure with $\phi_{\text{MMF}} = 125$ μm . (d) Spectral normalized transmission of SMS structure ($\phi_{\text{MMF}} = 55$ μm) to some different refractive indexes of the external medium. (e) Shifting of the maximum transmission wavelength peak (λ_p) as function of the RI change considering three diameters of MMF section.

The Figure 3(a) shows an example of modal coupling efficiency between the fundamental mode at SMF and the modes at MMF, as function of MMF diameter. The first six MMF radial modes are shown in Figure 3(b). The radial modes have higher coupling efficiency with SMF mode than the azimuthal modes, which has at least two orders of magnitude less efficiency. According to Figure 3(a), for $\phi_{\text{MMF}} = 55$ μm the maximum coupling occurs to the second MMF mode - and the shape of the coupling efficiency curve is sharp involving just few modes. For ϕ_{MMF} equal to 78 μm or 125 μm , on the other hand, the coupling curve is smoother and involves more higher order modes.

The spectral transmission width increases as the core size of the MMF decreases or the external refractive index get closer to the fiber (silica) index - as some higher order modes are expected to be cutoff. The effect is more obvious for thinner fibers (55 μm) and higher refractive index ($n > 1.40$) external medium. Figure 4(b) show examples of spectral transmissions curves of SMS with $\phi_{\text{MMF}} = 55, 78$ and 125 μm , and $n_{\text{liq}} = 1.0$, where it is possible to observe the variation of bandwidth with the fiber diameter. The bandwidth also changes for different periodic self-images, reducing for high-order self-images (Figure 4(c)). A SMS device with high image resolution and good contrast is characterized by a narrow-peak (low bandwidth) and low ripple [13]. The bandwidth depends of the number of excited modes at MMF and the coupling efficiency curve between SMF-MMF modes (Figure 3(a)). If the coupling occurs just for few and lower order MMF modes, than the bandwidth is large. Otherwise, if many modes at MMF are excited the bandwidth becomes narrow.

Investigating the spectral transmission of SMS with $\phi_{\text{MMF}} = 125$ μm and $n_{\text{liq}} = 1.0$, it was possible to observe the narrowing of the bandwidth when numerically more radial modes are considered at MMF. Assuming only three, five,

seven or ten radial modes, leads to decreasing values of FWHM to: 71, 27, 15, and 10 nm, respectively. To obtain the correct spectral transmission supported by the SMS it is necessary to use at least ten radial modes.

Despite the excellent sensitivity obtained to SMS with $\Phi_{\text{MMF}} = 55 \mu\text{m}$, the FWHM is about 50 nm for the first self-image, and the resolution of a MMI sensor is inversely dependent of the transmission FWHM. Reducing the transmission bandwidth of the first self-image, allows to obtain more compact sensors with better resolution. To decrease the bandwidth is necessary to increase the coupling efficiency between modes at the junction SMF-MMF.

The Figure 5(a) presents the coupling efficiency of a SMS structure with $\Phi_{\text{MMF}} = 55 \mu\text{m}$, in which the standard SMF was replaced for other single mode fibers with different numerical aperture (NA). Increasing the NA increases the acceptance angle and, in consequence, more higher modes are excited at the SMF-MMF interface. The Figure 5(b) shows the SMS spectral transmission considering four values of SMF numerical aperture: 0.1000, 0.1224, 0.1400, and 0.2400. The value NA=0.1224 corresponds to the standard SMF-28, used in all previous results in this work. The SMF with NA=0.2400 allows to obtain a FWHM of only 17.8 nm, a reduction of 64% in the FWHM.

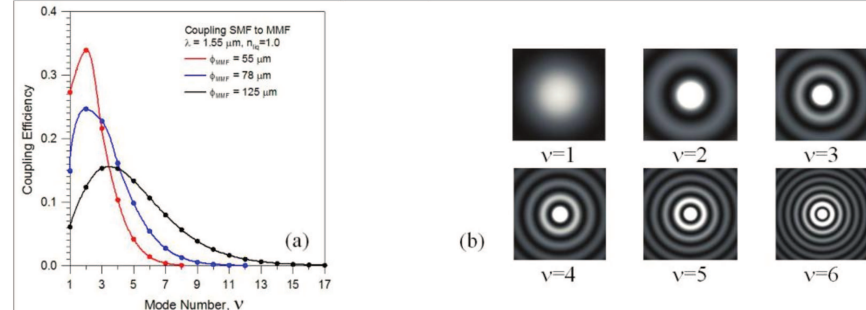


Figure 3. (a) Coupling efficiency between fundamental mode at singlemode fiber and fundamental and high order radial modes at multimode fiber. (b) Power distribution of the five first modes at MMF.

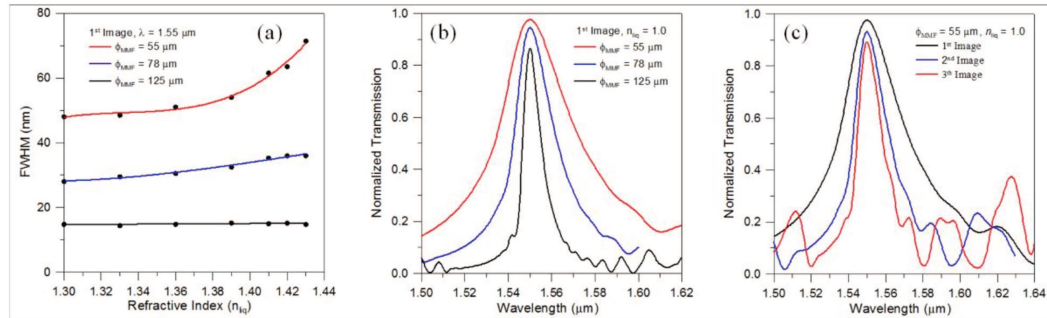


Figure 4. (a) Spectral transmission of the first image in SMSs structures with three different MMF diameters (55 μm , 78 μm , and 125 μm) considering $n_{\text{liq}} = 1.0$. (b) Full width half maximum (FWHM) of spectral transmission as function of the external medium refractive index. (c) Spectral transmission of the SMS with $\Phi_{\text{MMF}} = 55 \mu\text{m}$ and $n_{\text{liq}} = 1.0$, for the three first images formed at the MMF section.

3. CONCLUSION

This paper presents an interferometric device based on SMS structures and its application to RI sensing. The sensitivity was numerically evaluated to three diameters of MMF section, resulting in an ultra-high sensitivity for RI changes. The better result was obtained to $\Phi_{\text{MMF}} = 55 \mu\text{m}$ allowing to reach an average sensitivity of $\sim 827 \text{ nm/RIU}$ over a RI range of 1.30–1.44 and a maximum sensitivity of $\sim 3500 \text{ nm/RIU}$ for RI ~ 1.43 , considering $\Delta_{\text{RI}} = 0.01$. To the best of our knowledge, this resolution is the highest reported to date for an all-fiber SMS based RI sensor.

The bandwidth of spectral transmission were investigated as function of RI change, MMF diameter, and number of MMF excited modes. It was observed a correspondence between the spectral bandwidth of SMS transmission and the maximum number of the MMF supported modes and also with the modal coupling efficiency at SMF-MMF interface. The analysis indicates that the adequate choice of MMF dimensions allows to improve the SMS resolution to obtain a narrow spectral transmission suitable for high resolution and high sensitivity sensor.

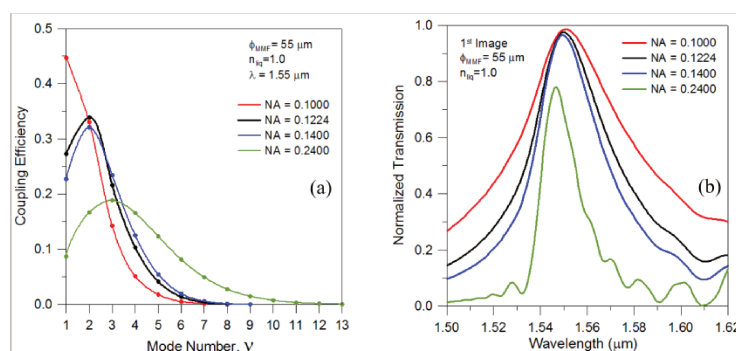


Figure 5. Spectral transmission of SMS structures with $\phi_{\text{MMF}} = 55 \mu\text{m}$, considering different number of excited MMF modes.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by project Pró-Defesa CAPES/Ministério da Defesa (ref. 23038.029912/2008-05), Finep (ref. 0.1.06.1177.00, 0.1.05.0770.00, 1986/09, and 1894/10), CNPq and FAPESP by project INCT Fotonicom.

REFERENCES

- [1] Aguilar-Soto, J. G., Antonio-Lopez, J. E, Sanchez-Mondragon, J J, and May-Arriola, D. A., " Fiber Optic Temperature Sensor Based on Multimode Interference Effects," Proceedings of XVII Reunión Iberoamericana de Óptica & X Encuentro de Óptica, Láseres y Aplicaciones, Journal of Physics: Conference Series 274, pp. 1-4, (2011).
- [2] Linh Viet Nguyen, Dusun Hwang, Sucbei Moon, Dae Seung Moon, and Youngjoo Chung, " High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch," Optics Express, vol. 16, No. 15, pp. 11369-11375, (2008).
- [3] Hatta, A.M., Rajan, G., Semenova, Y. and Farrell, G., " SMS fibre structure for temperature measurement using a simple intensity-based interrogation system," Electronics Lett., vol. 45, No. 21, (2009).
- [4] Silva, S., Pachon, E. G. P., Franco, M. A. R., Hayashi, J. G., Malcata, F. X., Frazão, O., Jorge P., Cordeiro, C. M. B., " Ultra-High Sensitivity-Temperature Fiber Sensor Based on Multimode Interference," Applied Optics (accepted to publication).
- [5] Wang, P., Brambilla, G., Ding M., Semenova, Y., Wu, Q., and Farrell, G. "Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing," J. Opt. Soc. Am. B / Vol. 28, No. 5, pp. 1180-1186, (2011).
- [6] Wu, Q., Semenova, Y., Wang P., and Farrell G., "High sensitivity SMS fiber structure based refractometer – analysis and experiment," Optics Express, vol. 19, No. 9, pp. 7937-7944, (2011).
- [7] Jin, Y. X., Chan, C. C., Zhao, Y., Dong, X. Y., " Refractive index measurement by using multimode interference," Proceedings of 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE vol. 7753, 77535F, (2011).
- [8] Zhang, C., Li, E., Peng L.V., Wang, W., " A wavelength encoded optical fiber sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber," Proceedings of International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications, Proc. SPIE SPIE Vol. 7157, 71570H, (2009).
- [9] Wang, P., Brambilla, G., Ding, M., Semenova, Y., Wu, Q., and Farrell, G., "High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on a tapered, multimode fiber interference", Opt. Lett., 36, 2233–2235 (2011).
- [10] Mehta, A., Mohammed, W., and Johnson, E. G., "Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor", IEEE Photon. Technol. Lett., 15, 1129–1131 (2003).
- [11] Hatta, A. M., Semenova, Y., Wu, Q., and Farrell, G., "Strain sensor based on a pair of single-mode-multimode-single-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme", Appl. Opt., 49, 536–541 (2010).
- [12] Silva, S., Frazão, O., Viegas, J., Ferreira, L. A., Araújo, F. M., Malcata, F. X., and Santos, J. L., "Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode fiber optic structure", Meas. Sci. Technol., 22, 085201 (2011).
- [13] Soldano, L. B., Pennings, E. C. M., "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," J. Lightwave Technol., vol.13, No. 4, pp. 615-627, (1995).

Bibliografia

1. MOHAMMED, W. S.; MEHTA, A.; JOHNSON, E. G. Wavelength Tunable Fiber Lens Based on Multimode Interference. **Journal of Lighthwave Technology**, 22, n. 2, February 2004. 469-477.
2. WANG, Q.; FARRELL, G.; YAN, W. Investigation on Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structure. **Journal of Lighthwave Technology**, 26, n. 5, 1 March 2008.
3. ANTONIO-LOPEZ, J. E. et al. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter. **Optics Letters**, 35, n. 3, 1 February 2010. 324-326.
4. CASTILLO-GUZMAN, A. et al. Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect. **Optics Express**, 18, n. 2, 18 January 2010. 591-597.
5. SOLDANO, L. B.; PENNINGS, E. C. M. Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications. **Journal of Lighthwave Technology**, 13, n. 4, April 1995. 615-627.
6. FRAZÃO, O. et al. Optical fiber refractometry based on multimode interference. **Applied Optics**, 50, n. 25, 1 September 2011. E184-E188.
7. MEHTA, A.; MOHAMMED, W.; JOHNSON, E. G. Multimode Interference-Based Fiber-Optic Displacement Sensor. **IEEE Photonics Technology Letters**, 15, n. 8, August 2003. 1129-1131.
8. LI, E.; WANG, X.; ZHANG, C. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes. **Applied Physics Letters**, 89, 2006.
9. ANTONIO-LOPEZ, J. E. et al. Fiber-optic sensor for liquid level measurement. **Optics Letters**, 36, n. 17, 1 September 2011. 3425-3427.
10. ULRICH, R. Ligth-Propagation And Imaging In Planar Optical Waveguides. **Nouv. Rev. Optique**, 6, n. 5, 1975. 253-262.
11. ULRICH, R. Image Formation by Phase Coincidences in Optical Waveguides. **Optics Communications**, 13, n. 3, March 1975. 259-264.
12. ZHANG, C. et al. A wavelength encoded optical fiber sensor based on multimode

- interference in a coreless silica fiber**. 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications. [S.l.]: SPIE. 2009.
13. SHAO, L.-Y. et al. Highly sensitivity bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating. **Optics Communications**, 283, 2010. 2690-2694.
 14. ULRICH, R. Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides. **Applied Physics Letters**, v. 27, n. 6, p. 337-339, September 1975.
 15. SOLDANO, L. B. et al. **High-Performance Monomode Planar Couplers Using a Short Multi-mode Interference Section**. Proc. European Conf. Opt. Commun. (ECOC). Paris: [s.n.]. 1991. p. 225-228.
 16. BRYNGDAHL, O. Image formation using self-imaging techniques. **Journal of Optical Society of America**, 63, n. 4, 1973. 416-419.
 17. MARCUSE, D. **Theory of Dielectric Optical Waveguides**. New York: Academic Press, 1974.
 18. KATSUNARI, O. **Fundamentals of Optical Waveguides**. London: Elsevier, 2006.
 19. MANSURIPUR, M. The Talbot Effect. In: _____ **Classical Optics and it's Applications**. 2. ed. United Kingdom: Cambridge Unniversity Press, 2009. Cap. 26, p. 367-378.
 20. WANG, Q.; FARRELL, G. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design. **Optics Letters**, 31, n. 3, 1 February 2006. 317-319.
 21. RSOF DESIGN GROUP. BeamProp 8.1. Ossining: [s.n.], 2008. Cap. 2, p. 13-24.
 22. GHATAK, A. Introduction to fiber optics. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998. Cap. 8,9, p. 132-178.
 23. E., A.-L. J. et al. **Novel Multimode Interference Liquid Level Sensors**. 2nd Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications. [S.l.]: SPIE. 2010.
 24. DONLAGIC, D.; ZAVRSNIK, M. Fiber-optic microbend sensor structure. **Optics Letters**, 22, n. 11, 1 June 1997. 837-839.

25. WU, Q. et al. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer - analysis and experiment. **Optics Express**, 19, n. 9, 25 April 2011. 7937-7944.
26. CHONG, J. H. et al. Measurement of refractive index sensitivity using long-period grating refractive refractometer. **Optics Communications**, 2004. 65-69.
27. SILVA, R. M. et al. Simultaneous measurement of curvature and strain using a suspended multicore fiber. **Optics Letters**, 1 October 2011. 3939-3941.
28. GONG, Y.; ZHAO, T.; RAO, Y.-J. W. Y. All-Fiber Curvature Sensor Based on Multimode Interference. **IEEE Photonics Technology Letters**, 23, n. 11, 1 June 2011. 679-681.
29. SILVA, S. et al. Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference. **Applied optics**, 10 May 2012. 2542-2548.
30. JIN, Y. X. et al. **Refractive index measurement by using multimode interference**. 21st International Conference on Optical Fibers Sensors. [S.l.]: SPIE. 2011.
31. AGUILAR-SOTO, J. G. et al. **Fiber Optic Temperature Sensor Based on Multimode Interference Effects**. XVII Reunion Iberoamericana de Óptica & X Encuentro de Óptica, Láseres y Aplicaciones. [S.l.]: IOP Publishing. 2011. p. 1-4.
32. SILVA, S. et al. Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode / multimode fiber optic structure. **Measurement Science and Technology**, 22, 2011. 1-6.
33. GAO, R. X. et al. Optimal design and fabrication of SMS fiber temperature sensor for liquid. **Optics Communications**, 283, 2010. 3149-3152.
34. LI, E. **Design and test of multimode interference based optical fiber temperature sensors**. 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications. [S.l.]: SPIE. 2009.
35. LI, E.; PENG, G.-D. Wavelength-encoded fiber-optic temperature sensor with ultra-high sensitivity. **Optics Communications**, 281, 2008. 5768-5770.
36. PACHON, E. G. P.; FRANCO, A. R.; CORDEIRO, C. M. B. **Spectral bandwidth**

analysis of high sensitivity refractive index sensor based on multimode interference fiber device. OFS. Beijing: [s.n.]. 2012. p. 1-4.

37. WANG, P. et al. High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on tapered, multimode fiber interference. **Opt. Letters**, v. 36, p. 2233-2235, 2011.
38. WANG, P. et al. Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing. **Journal Optics Society American B**, v. 28, n. 5, p. 1180-1186, May 2011.
39. BIAZOLI, C. et al. Multimode interference tapered fiber refractive index sensors. **Applied Optics**, v. 51, n. 24, p. 5941-5945, Agosto 2012.
40. WU, Q. et al. Fiber refractometer based on a fiber Bragg grating and single-mode-multimode-single-mode fiber structure. **Optics Letters**, 36, n. 12, 15 June 2011. 2197-2199.
41. MOHAMMED, W. S.; SMITH, W. E. All-fiber multimode interference bandpass filter. **Optics Letters**, 31, n. 17, 1 September 2006. 2547-2549.
42. TRIPATHI, S. M. et al. Strain and temperature sensing characteristic of single-mode-multimode-single-mode structures. **Journal of lighthwave technology**, 27, n. 13, 1 July 2009. 2348-2355.
43. HATTA, A. M. et al. Analysis of temperature dependence for ratiometric wavelength measurement system using SMS fiber structure based edge filters. **Optics Communications**, 283, 2010. 1291-1295.
44. LIU, Y.; WEI, L. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers. **Applied Optics**, 46, n. 13, 1 May 2007. 2516-2519.
45. WU, Q. et al. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing. **IEEE photonics technology letters**, 23, n. 2, 15 January 2011. 130-132.
46. DONLAGIC, D.; CULSHAW, B. Microbend Sensor Structure For Use in Distributed and Quasi-Distributed Sensor Systems Based on Selective Launching and Filtering of

the Modes in Graded Index Multimode Fiber. **Journal of Technology**, 17, n. 10, October 1999. 1856-1868.

47. DONLAGIC, D.; CULSHAW, B. Propagation of the Fundamental Mode in Curved Graded Index Multimode Fiber and Its Application in Sensor Systems. **Journal of Lighthwave Technology**, 18, n. 3, March 2000. 334-342.

48. WANG, P. et al. A simple ultrasensitive displacement sensor based on a high bend loss single-mode fibre and a ratiometric measurement system. **Journal of Optics**, 13, 2011. 1-5.

49. WU, Q. et al. Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structures for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature. **Microwave And Optical Technology Letters**, 53, n. 9, September 2011. 2181-2185.