

**Fernando Cristiano Fávero**

## **Sensores a Fibras Ópticas Microestruturadas**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física do  
Departamento de Física da PUC-Rio como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutor em Física

Orientador: Prof. Isabel Cristina dos Santos Carvalho

Rio de Janeiro  
Março de 2012



**Fernando Cristiano Fávero**

**Sensores a fibras ópticas microestruturadas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Isabel Cristina dos Santos Carvalho**

Orientadora

Departamento de Física – PUC-Rio

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Christiano José Santiago de Matos**

UPM

**Prof. Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro**

UNICAMP

**Prof. Marcelo Martins Werneck**

UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de março de 2012.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### Fernando Cristiano Fávero

Graduou-se em licenciatura Plena e Bacharelado em Física na Universidade Federal de Santa Catarina em 2005. Realizou Mestrado em Física Aplicada na Universidade Federal de Pernambuco em 2007. Área de atuação é optoeletrônica, sensores a fibras ópticas, e fibras ópticas microestruturadas.

#### Ficha Catalográfica

Fávero, Fernando Cristiano

Sensores a Fibras Ópticas Microestruturadas / Fernando Cristiano Fávero; orientador: Isabel Cristina dos Santos Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2012.

v., 134 f.: il. ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Fibra Óptica. Fibra de Cristal Fotônico. PCF. Fabry-Perot. Sensor. Interferômetro. I. Carvalho, Isabel Cristina dos Santos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 510

## Agradecimentos

Primeiro devo agradecer a minha orientadora Isabel Carvalho, por ter permitido a realização desse trabalho. Ao professor Arthur Braga por dar suporte ao início da tese. A doutora Sully por toda ajuda. Devo agradecer a Doutora Paula pela amizade, apoio e discussões.

Ao Professor Valério Pruneri do Instituto de Ciências Fotônicas (ICFO-Espanha), por permitir a realização do doutorado sanduíche.

Ao doutor Joel Villatoro, por toda ajuda, apoio e discussões que deram grande impulso ao trabalho aqui apresentado. Aos amigos que conheci no tempo que estive no ICFO, que me fizeram sentir confortável e deram todo o apoio e ajuda possível. Aos colegas de laboratório, Vitoria e Guillermo.

Aos funcionários do Departamento de Física PUC-Rio, (Giza, Márcia, Júlio), por permitirem o funcionamento do Departamento.

A todos os amigos que se fizeram presente durante esses quatro anos de doutorado. E todos aqueles que convivi diretamente, Douglas, Clarissa, Maury, Marco, Dias. Ao amigos que conheci do próprio departamento. Aos colegas de laboratório, Alexandre e Leonardo, em especial ao Leonardo pela ajuda nesse trabalho. Agradeço a um grande amigo, que sempre me deu apoio e força, para que eu nunca desanimasse, Douglas Vitoreti. E devo agradecer a uma pessoa em especial, que esteve ao meu lado durante todo esse tempo, me apoiando em todos os momentos de dificuldades, Rhia Weston.

Enfim, devo agradecer a inúmeras pessoas que foram importante durante os quatros anos que me dediquei ao doutorado. Estando essas pessoas perto ou não. Mas que de alguma forma deram alguma contribuição tanto na vida pessoal como na vida profissional. Deixo aqui, para todos, o meu muito obrigado.

Devo agradecer a todos os professores do Departamento, por fazerem um bom trabalho junto a PUC. Tenho que agradecer a minha família, pois ela é a base de toda minha formação. Devo agradecer a Capes e CNPq pelo suporte financeiro

## Resumo

Fávero, Fernando Cristiano; Carvalho, Isabel Cristina dos Santos. **Sensores a Fibras Ópticas Microestruturadas**. Rio de Janeiro, 2012. 134p. Tese de Doutorado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho, demonstramos o uso de fibras de cristais fotônicos (PCF) em diferentes configurações para sensoriamento. Investigamos o uso de fibras PCF com alta birrefringência para sensoriamento de pressão hidrostática e deformação, explorando a baixa dependência térmica. Onde a interferência entre os modos que se propagam em uma fibra birrefringente é analisada. Monitoramos o deslocamento do padrão de interferência do espectro de reflexão, com a variação da pressão ou deformação aplicada à fibra.

Demonstramos uma técnica de criar cavidades Fabry-Perot dentro de uma fibra óptica, bem como uma técnica para controlar seu comprimento, e consequentemente, o período das franjas no padrão de interferência no espectro de reflexão. O interferômetro Fabry-Perot (FPI) investigado, possui um altíssimo contraste nas franjas do padrão de interferência, acima dos 30 dB, sendo no momento, o recorde para o valor do contraste das franjas para FPI sílica-ar. O dispositivo foi investigado quanto à resposta a deformação. Um robusto encapsulamento foi feito, possibilitando investigar a resposta do dispositivo à vibração externa. Um estudo da relação da sensibilidade com o comprimento do FPI é também investigado.

Construímos um outro interferômetro a partir de um pedaço de fibra PCF e de duas regiões de colapso de suas micro-estruturas. Estas regiões permitem a excitação e recombinação dos modos da fibra. Um dos modos que participa da interferência, é o modo de casca da fibra PCF, o qual é sensível a mudança de índice de refração do meio. O dispositivo apresenta contraste acima dos 40 dB, e é investigado quanto à resposta as mudanças de índices de refração do meio externo em contato com a fibra. Com a mesma montagem, funcionalizamos um pedaço de 2,0 cm de PCF para monitoramento de respiração humana. A partir disso, desenvolvemos um dispositivo capaz de monitorar a respiração do ser humano.

## Palavras-chave

Fibra Óptica. Fibra de Cristal Fotônico. PCF. Fabry-Perot. Sensor. Interferômetro.

## Abstract

Fávero, Fernando Cristiano; Carvalho, Isabel Cristina dos Santos.  
**Micro-structured optical fibers sensors..** Rio de Janeiro,  
2012. 134p. PhD Thesis — Department of Physics, Pontificia  
Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, we have demonstrated the use of Photonic Crystal Fiber (PCF), in different configurations, for sensing applications. The high birefringence and low temperature dependence characteristics of the PCF were explored for sensing hydrostatic pressure and deformation in a reflection configuration. Sensing was based on the analysis of the interference patterns between the modes that propagate in the birefringent fiber under the variation of pressure and deformation applied to the fiber. We have also demonstrated a technique to manufacture a Fabry-Perot Interferometer (FPI) cavity within an optical fiber with control of the cavity length and thus the control of the period of the fringes in the interference pattern. The Fabry-Perot Interferometer investigated presented a very high fringe contrast, above 30 dB, and showed a record value of the contrast of the fringes for FPI silica-air. The FPI device integrated within the fiber was tested as a strain sensor and also as a device to monitor vibration. A study of the relative sensitivity of the length of the FPI was also investigated. Another interferometer was built from a piece of standard fiber and a PCF with two regions of collapsed microstructures. These regions allowed the excitation and recombination of the fiber modes. This device was tested as a refractive index sensor, presenting a fringe contrast above 40 dB. An application of this device was the development of a humid sensor to monitor human breathing.

## Keywords

Optical Fiber. Photonic Cristal Fiber. PCF. Fabry-Perot. Sensor. Interferometer.

## Sumário

1	Introdução	<b>15</b>
1.1	Objetivo	15
1.2	Motivação	15
2	Sensores de fibra PCF Birrefringente.	<b>20</b>
2.1	Fibras Birrefringentes	20
2.2	Sensores de Deformação e Pressão de fibra PCF Birrefringente.	23
2.3	Sensor de Pressão Hidrostática	32
2.4	Conclusão	40
3	Sensores de deformação e vibração com uma cavidade Fabry-Perot intrínseca a fibra.	<b>41</b>
3.1	Sensores com interferômetro Fabry-Perot	43
3.2	Efeito Poisson	45
3.3	Fabricação dos interferômetros Fabry-Perot.	49
3.4	Interferômetro Fabry-Perot como sensor de Vibração	56
3.5	Montagem Experimental	57
3.6	Resultados	57
3.7	Conclusão	66
4	Sensor a Fibra PCF de Índice de Refração e Umidade aplicado em monitoramento da respiração humana.	<b>68</b>
4.1	Dispositivo e Princípio de Operação	69
4.2	Sensor de umidade aplicado em monitoramento da respiração humana.	77
4.3	Montagem Experimental: Sensor de umidade aplicado ao monitoramento da respiração humana	78
4.4	Conclusão	87
5	Conclusão e Perspectivas	<b>89</b>
6	Artigos em Congressos	<b>91</b>
7	Publicação em Periódicos Internacionais	<b>110</b>
	Referências Bibliográficas	<b>126</b>

## Lista de figuras

1.1	Seção reta da primeira fibra microestruturada [12].	17
1.2	Estrutura da face da primeira PCF hollow-core. A luz propaga-se dentro do núcleo oco da fibra por Band-Gap fotônico [13].	18
1.3	Estrutura da face de uma fibra microestruturada, onde $d$ é o diâmetro dos buracos e $\Lambda$ é a distância do entres dois buracos medidos a partir do seu centro.	19
2.1	Diferentes geometrias de fibras HiBi	22
2.2	Fibra PM 1550-01: Na figura da esquerda esquema da geometria da fibra, onde $d$ é igual a $2,2 \mu m$ , $D$ é igual a $4,5 \mu m$ , e $\Lambda$ é igual a $4,4 \mu m$ . Na figura da direita imagem de microscópio óptico da seção transversal da fibra de cristal fotônico PM 1550-01. Imagem retirada em <a href="http://www.nktpotonics.com">http://www.nktpotonics.com</a>	24
2.3	Montagem experimental do sensor de deformação. ASE é a fonte óptica, OSA é o analisador de espectro óptico, FOC é o circulador óptico, P é o polarizador óptico em fibra, PC é o controlador de polarização, PCF é a fibra usada no experimento (PM 1550-01). Na figura inserida na parte inferior é mostrado um esquema da emenda da fibra PCF com uma fibra padrão. A localização dos dois blocos de tração é mostrada na figura.	29
2.4	Sinal de reflexão em função comprimento de onda do interferômetro com fibra PCF 1550-01.	30
2.5	Espectros para diferentes deformações aplicadas: $0\mu\epsilon$ , $1533,0\mu\epsilon$ , e $3577,0\mu\epsilon$ respectivamente.	30
2.6	Variação do comprimento de onda pela deformação. Os pontos pretos são dados experimentais, e linha verde é o ajuste linear com $R^2 = 0,9968$ .	31
2.7	Variação do comprimento de onda pela deformação aplicada na fibra teórico, adotando $\Delta p = 0,491$ .	31
2.8	Montagem experimental do sensor de pressão, onde ASE é a fonte óptica, FOC é o circulador óptico, P polarizador a fibra, PC é o controlador de polarização, OSA é o analisador de espectro óptico.	34
2.9	a) Imagem de microscópio óptico da emenda de uma fibra padrão com a fibra PM 1550-01. b) Imagem da ponta colapsada do capilar.	35
2.10	Sinal de reflexão do interferômetro formado pela fibra PCF e capilar com 11,0 cm de fibra PCF.	36
2.11	Sinal de reflexão em função do comprimento de onda para diferentes valores de pressão hidrostática aplicadas ao sensor de pressão com PCF HiBi PM 1550-01.	36
2.12	Deslocamento em comprimento de onda de um mínimo de interferência. Sensibilidade do dispositivo em função da pressão aplicada, $3,32 \text{ nm/MPa}$ . Os pontos pretos são dados experimentais e a linha verde é o ajuste linear apresentando um $R^2 = 0,9998$ .	37



2.13	Valor teórico do deslocamento em comprimento de onda pela pressão hidrostática aplicada na fibra, calculado a partir da Eq.2.20 e adotando $K_p = -1,7 \times 10^{-6} MPa^{-1}$ .	37
2.14	Gráfico da variação do comprimento de onda pela variação da temperatura para PCF HiBi PM 1550.	38
2.15	Gráfico da variação do comprimento de onda pela variação de pressão para diferentes temperaturas. Curva preta, teste de pressão para temperatura de 25 °C. Curva vermelha, teste de pressão para temperatura de 30 °C. Curva azul, teste de pressão para temperatura 50 °C. Curva verde, teste de pressão para temperatura de 70 °C. Curva rosa, teste de pressão para temperatura 90 °C	39
3.1	Esquema de dois FPI diferentes. a) FPI extrínseco e b) FPI intrínseco.	41
3.2	Figuras de duas cavidades Fabry-Perot. Na esquerda temos uma cavidade quase esférica, onde $d \approx r$ e na direita uma cavidade com forma de um elipsóide onde $d < r$ .	47
3.3	Simulação da variação de $\delta r / \delta d$ pelo raio inicial das cavidades FP.	48
3.4	Sistema de interrogação do sensor baseado no interferômetro FP. Montagem experimental para fabricação das cavidades, onde LED é a fonte de luz, OSA o analisador de espectro óptico, FOC circulador óptico em fibra. Fig.A imagem no microscópio óptico da fibra A, e Fig. B imagem no microscópio óptico da fibra B.	50
3.5	Imagem de três cavidades FP. a) cavidade formada com nenhuma pressão aplicada. b) cavidade formada com 1,5 bar de pressão e c) cavidade formada com 4,0 bar de pressão aplicada.	51
3.6	Gráfico do comprimento $2d$ da cavidade em função da pressão aplicada. Onde os círculos pretos são valores para a fibra A e os círculos verdes os valores para a fibra B. As linhas são ajustes lineares.	52
3.7	Gráfico do sinal de reflexão para três diferentes cavidades FP construídas com diferentes pressões. Curva preta apresenta o gráfico para a cavidade com 0 bar, curva verde o gráfico para cavidade de 1,5 bar, curva azul apresenta o gráfico para cavidade de 4,0 bar.	53
3.8	Gráfico do período do padrão de interferência dos FPI pela pressão aplicada, durante a fabricação das cavidades. Os círculos pretos (verdes) são pontos experimentais para a fibra A e B respectivamente. E as linhas são o guia para os olhos.	54
3.9	Gráfico do deslocamento do comprimento de onda pela variação de temperatura, ara o FPI construído com 2,0 bar de pressão aplicada.	55
3.10	Curva do deslocamento do comprimento de onda dos FPI com a deformação aplicada para cavidades com diferentes comprimentos. Círculos pretos $2d = 16,57 \mu m$ , vermelhos $2d = 32,18 \mu m$ e verdes $2d = 55,13 \mu m$ . As retas são ajustes lineares.	55
3.11	Sensibilidade dos FPI em função dos comprimentos das cavidade. Os círculos pretos são os pontos experimentais.	56

- 3.12 Montagem experimental do sensor de vibração. Onde em a) imagem da seção reta da fibra PCF, b) imagem da cavidade com comprimento de  $2d = 28,3 \mu m$ , em c) imagem da cavidade com comprimento de  $2d = 10,0 \mu m$ , e d) elemento sensor. 57
- 3.13 Deslocamento do sinal de reflexão do FPI ( $2d = 10,0 \mu m$ ) em função do comprimento de onda para três diferentes valores de deformação,  $0 \mu\epsilon$ ,  $555,8 \mu\epsilon$ , e  $1111,6 \mu\epsilon$ . 58
- 3.14 Gráfico do deslocamento do sinal de reflexão para dois FPI distintos, para dois tamanhos de cavidade ( $2d$ ). Os círculos verdes mostram o deslocamento do comprimento com a deformação aplicada para o FPI com  $2d = 10,0 \mu m$ , as estrelas pretas mostram o deslocamento do comprimento de onda com a deformação para o FPI com  $2d = 30,0 \mu m$ . As retas são os ajustes lineares. 59
- 3.15 Deslocamento espectral de vibração com o tempo para o teste de vibração com um golpe de martelo. Curva em vermelho mostra o resultado de uma FBG e a curva em preto mostra o resultado para o FPI de comprimento  $2d = 10,0 \mu m$ . 60
- 3.16 Transformada de Fourier para teste de vibração com um golpe. Na parte superior o resultado para o FPI, e na parte inferior o resultado para a FBG. 61
- 3.17 Gráfico do teste de vibração com uma perturbação constante. No gráfico superior temos o resultado para o FPI com comprimento  $2d = 10,0 \mu m$  e no gráfico inferior o resultado para uma FBG com comprimento de onda  $\lambda = 1547,6 nm$  e largura de escrita de  $1,0 cm$  de comprimento. 62
- 3.18 Gráfico da transformada de Fourier para uma vibração constante. Na parte superior transformada de Fourier para o FPI e na parte inferior transformada de Fourier para a FBG. 62
- 3.19 Imagens de três FPI diferentes, onde em a) temos o FPI formado por faces planas, em b) é o FPI com forma de uma esfera, e em c) o FPI com forma de um elipsóide. 64
- 3.20 Sinal da reflexão em função do comprimento de onda para três FPI distintos. Curva vermelha apresenta o sinal da cavidade com forma esférica, curva preta, representa o sinal da cavidade com duas faces planas e a curva verde representa o sinal da cavidade em forma de um elipsóide. 65
- 3.21 Curva teórica da variação do contraste das franjas (FC), com o valor  $k$  obtido a partir da Eq. 3.15. 66
- 4.1 Montagem experimental do sensor de índice de refração. a) dispositivo em fibra, b) imagem da seção reta da fibra LMA10 e c) imagem da região de colapso. 70
- 4.2 Contraste das franjas em função de  $k$ . A imagem superior esquerda, mostra o sinal da reflexão em função do comprimento de onda, para um interferômetro com  $l=12,25 mm$ , onde temos a participação do modo fundamental do núcleo  $HE_{11}$  e do modo de revestimento  $HE_{12}$ . A linha pontilhada é o espectro quando  $I_2 = 0,4I_1$  e a linha verde é quando  $I_2 = 0,96I_1$ . 73

4.3	Deslocamento do padrão de interferência com a mudança do índice de refração do meio externo. Os círculos pretos são dados experimentais, linha verde guia para os olhos. O gráfico inserido é o sinal de reflexão do interferômetro no ar em função do comprimento de onda.	74
4.4	Padrões de interferência em função do comprimento de onda para um sensor de índice de refração com 12,0 mm de comprimento, medindo três diferentes índices de refração, 1,4100; 1,4140 e 1,4180.	74
4.5	Gráfico do deslocamento do espectro pela variação de índice de refração. Pontos pretos são dados experimentais, a linha verde é o ajuste linear : 383,5 nm/RIU.	75
4.6	Deslocamento do sinal de reflexão para um interferômetro com $L = 12,0 \text{ mm}$ , para três valores de índices de refração distintos, em função do comprimento de onda. O gráfico inserido é o sinal de reflexão versus o comprimento de onda mostrando seu ponto de máxima inflexão (P.Q).	76
4.7	Variação da potência de reflexão pela variação de índice refração. Os círculos pretos representam os dados experimentais.	76
4.8	Montagem experimental do sensor de respiração. a) fibra usada no experimento (LMA10) e b) região de colapso da PCF. SIEd é a fonte de banda larga; FOC é o circulador a fibra óptica; detector é o interrogador de rede de Bragg.	79
4.9	Dispositivo sensor de respiração. a) apenas uma região de colapso da PCF, e b) com duas regiões de colapso.	80
4.10	Padrão de interferência da reflexão em função do comprimento de onda para o sensor de respiração com uma região de colapso (linha pontilhada) e com duas regiões de colapso (linha contínua).	80
4.11	Dispositivo sensor de respiração conectorizado com o cabo SC e com a máscara de silicone. Na parte inferior da figura vemos o tubo metálico usado para proteger a fibra, onde notam-se as aberturas laterais para entrada da respiração.	82
4.12	Espectro de reflexão do dispositivo em dois momentos. Na linha verde contínua, o dispositivo encontra-se no ar, e na linha pontilhada preta, o dispositivo está na presença de umidade da respiração.	83
4.13	Deslocamento do padrão de interferência em função do tempo para teste de respiração quando o paciente encontra-se com 82 bpm.	84
4.14	Deslocamento do espectro em função do tempo para diferentes frequências cardíacas. Na parte superior da figura temos o resultado quando o paciente possui 110 bpm, e na parte inferior, temos o resultado do paciente com 135 bpm.	85
4.15	Relação da frequência cardíaca pelo tempo da expiração do paciente.	85
4.16	Deslocamento do sinal do espectro em função do tempo com variações anormais na respiração.	86

- 4.17 Espectro óptico do sinal de reflexão para dispositivo com 12,0 mm de comprimento quando submetido a dobras. O sinal perde intensidade, mas a posição permanece inalterada. Cada linha represente uma dobra efetuada na fibra.

87

## Lista de tabelas

2.1	Comparação dos resultados para sensores de pressão e deformação à fibra óptica. Onde *[11], **[27], ***[32], ****[29].	40
3.1	Valor da extinção das franjas do padrão de interferência para 3 FPI distintos e do parâmetro V.	64
3.2	Comparação dos resultados para testes de deformação e temperatura entres três FPI intrínsecos.	66

*"A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais volta ao seu tamanho original." Albert  
Einstein*