UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

ANDRÉ ORLANDI DE OLIVEIRA

Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm

São Carlos
2012

ANDRÉ ORLANDI DE OLIVEIRA

Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Física Aplicada
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Unidade que aloja o Programa)

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pelo serviço de Biblioteca e Informação do IFSC/USP

Oliveira, André Orlandi

Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm/ André Orlandi de Oliveira; orientador Sérgio Carlos Zilio – versão corrigida -- São Carlos, 2012. 89 p.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada) -- Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

1. Sensor de temperatura e deformação. 2. Redes de Bragg. 3. Fibra óptica. I. Zilio, Sérgio Carlos , orient. II. Título.

*Aos meus pais, irmãos e namorada,
pelo companheirismo, amor e paciência proporcionados ao longo desses anos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Wilson e Fernanda, por todo o apoio proporcionado, sempre priorizando a minha educação, o que me possibilitou mais essa conquista. Agradeço também aos meus irmãos, Larissa e Lucas, pela empolgação e incentivo aos meus trabalhos.

De maneira especial, agradeço à minha companheira, Raissa, pelo amor, cumplicidade, apoio, encorajamento e, principalmente, pelo imenso carinho que foi crucial em muitos momentos difíceis dessa trajetória.

Agradeço também à minha família, por sempre me incentivarem e, especialmente, aos meus avós, Osmar e Maricelma, pelas caronas providenciais, que eu sempre insistia em fazer parecer serem pura coincidência.

Ao Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio, pela oportunidade proporcionada antes de meu ingresso na graduação, e depois, pela orientação, pelas idéias durante o trabalho e pelo apoio na difícil etapa final do trabalho.

Ao Prof. Dr. Lino Misoguti, pela orientação durante a Iniciação Científica, pela prontidão em ajudar ao longo de todo o projeto, e também à precisão de seus alinhamentos ópticos, fazendo o sistema sempre responder da melhor maneira possível.

Ao Prof. Dr. Cleber Renato Mendonça, pelas conversas não apenas científicas, buscando o nosso crescimento pessoal além do crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. José Fabian Schneider que, desde o início de minha graduação, me ensinou muito sobre o profissionalismo em pesquisa.

Ao meu grande amigo Emerson Cristiano Barbano, pelo companheirismo ao longo de todo esse tempo, pela amizade sincera e impagável e pela paciência que sempre teve quando apresentava meus problemas nas mais diversas situações. Também ao Rafael, pelas incessantes risadas e ao Bruno, pela contribuição em partes anteriores a esse trabalho.

Aos meus amigos do grupo de Fotônica: Anderson, Gustavo (Jordan), Juliana, Jonathas, Marcelo, Ruben, Vinicius, Regina, Renato, Luís Gustavo (Nó), Bruno (Magda), Jader, Carlos Renato, Otuka, Gabriel (Lost), Paulo Henrique (PH), Rafael (SUS), Daniel Corrêa e Leonardo (Tchê).

Ao Marcos (Marcão) e ao André Romero, pela prontidão em suas assistências técnicas.

Aos funcionários da biblioteca, especialmente à Sra. Maria Cristina, e da seção de pós-graduação do IFSC, pelo auxílio nas mais diversas tarefas, atenção e simpatia.

À CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

Finalmente, agradeço a Deus, por me guardar sob suas mãos durante todo o meu trajeto, guiando-me às escolhas certas que culminaram no sucesso de mais essa etapa em minha vida.

“A maravilhosa disposição e harmonia do universo só pode ter tido origem segundo o plano de um Ser que tudo sabe e tudo pode. Isso fica sendo a minha última e mais elevada descoberta.”

Isaac Newton

RESUMO

OLIVEIRA, A.O. *Sistema para medida simultânea de temperatura e deformação com redes de Bragg em 800 nm*. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Ao longo dos últimos anos, redes de Bragg em fibras ópticas (FBG, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) vêm sendo frequentemente utilizadas como sensores de deformação e de temperatura. O problema da indistinguibilidade entre esses dois parâmetros físicos, presente durante medidas realizadas por esse tipo de sensor, tem sido bem resolvido com o uso de duas FBGs com comprimentos de onda distintos. Muito embora esse artifício tenha apresentado bons resultados, ele também oferece algumas desvantagens, sendo uma delas a necessidade de duas fontes de luz para diferentes comprimentos de onda. Em virtude disto, este trabalho apresenta um sistema capaz de realizar medidas de temperatura e deformação, simultaneamente, utilizando apenas uma fonte de luz. O método baseia-se na inscrição de duas redes de Bragg com comprimentos de onda próximos (no caso, 810 e 860 nm) na mesma posição da fibra óptica. Apesar de a separação entre os comprimentos de onda das FBGs ser aparentemente pequena (cerca de 50 nm), o sistema respondeu precisamente a variações de deformação e temperatura. Dessa forma, a utilização de apenas uma fonte de luz no sistema é corretamente justificada, uma vez que, com essa alteração, o custo do sistema é substancialmente reduzido. Ademais, o uso de comprimentos de onda em torno de 800 nm também barateia o sistema, pois os CCDs usados neste intervalo espectral são menos onerosos do que aqueles tradicionalmente usados em comprimentos de onda de comunicações ópticas (1,55 μm).

Palavras-chave: Sensor de temperatura e deformação. Redes de Bragg. Fibras ópticas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, A.O. *Simultaneous measurement of temperature and strain using fiber Bragg gratings written at 800 nm*. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

In recent years, fiber Bragg gratings (FBGs) have been frequently used as strain and temperature sensors. Several studies have tackled the problem of distinguishing between these two physical parameters using a dual-wavelength sensor. Although these sensors have shown good results, they have a few drawbacks, one of them being the need for two light sources with different wavelengths. We present an approach for simultaneous strain and temperature sensing which uses only one light source. The method relies on writing FBGs with nearby wavelengths (for instance, at 810 and 860 nm) at the same section of the fiber. Even though the Bragg wavelengths are separated by just a few nanometers (about 50 nm), it is possible to accurately measure variations in strain and temperature. One of the major advantages of this approach is the use of a unique light source, what reduces substantially the system cost. Another advantage is the lower cost of array detectors at 800 nm when compared to those of telecom wavelengths (1,55 μm).

Keywords: Temperature and strain sensor. Fiber Bragg gratings. Optical fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pequenas reflexões de Fresnel acarretadas pela variação de índice de refração entre dois meios dielétricos	28
Figura 2 - Duas reflexões consecutivas	29
Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma rede de Bragg.....	30
Figura 4 - Defeito GeO de sílica dopada com germânio, no qual os átomos adjacentes ao germânio são átomos de sílica ou de próprio germânio. Este defeito pode absorver um fóton e formar o defeito GeE ³	31
Figura 5 - Formação de centros de cor GeE', responsáveis pelo aumento da fotossensibilidade da fibra óptica na região do UV.....	32
Figura 6 - (a) Esquema de várias redes de Bragg inscritas numa única fibra óptica e (b) o espectro refletido por elas	33
Figura 7 - Rede de Bragg inclinada em fibra óptica.....	34
Figura 8 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg inclinada.....	35
Figura 9 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg com gorjeio	36
Figura 10 - Espectros de reflexão e transmissão de uma rede de Bragg de comprimento de onda centrado em 800 nm.....	38
Figura 11 - Espectros de transmissão e reflexão de uma rede de Bragg de tipo II ²	39
Figura 12 - Espectro de transmissão de uma LPG ⁵	40
Figura 13 - Representação gráfica da incerteza no espaço dos comprimentos de Bragg.....	44
Figura 14 - Representação gráfica da incerteza no espaço dos comprimentos de Bragg.....	45
Figura 15 - Esquema do sistema de gravação de redes de Bragg em fibra óptica pela técnica de máscara de fase.....	48
Figura 16 - Esquema do sistema de gravação de redes de Bragg em fibra óptica pela técnica de máscara de fase.....	49
Figura 17 - Esquema da incidência de luz sobre a fibra óptica para a fabricação de redes de Bragg pela técnica de espelho de Lloyd	50
Figura 18 - Esquema da fabricação de redes de Bragg pela técnica de ponto-a-ponto	51
Figura 19 - (a) As franjas de interferência responsáveis pela inscrição da rede de Bragg são incididas inclinadas em relação ao eixo óptico da fibra óptica. (b) Método para inscrição de redes de Bragg inclinadas	53

Figura 20 - Método utilizado para gravação de redes de Bragg chirpada em fibra ópticas; a fibra é dobrada fazendo com que o espaçamento das franjas de interferência incidentes aumente continuamente	54
Figura 21 - Fibra óptica encurvada a um raio R no plano das franjas de interferência, fazendo com que o período da rede varie continuamente ao longo do comprimento S da fibra óptica	54
Figura 22 - Sistema para gravação de redes de Bragg chirpada por interferência de feixes usando lentes cilíndricas em cada braço do interferômetro	55
Figura 23 - Princípio de funcionamento de um OSA.....	58
Figura 24 - Princípio de funcionamento de um laser de diodo sintonizável.....	59
Figura 25 - Diagrama de blocos representando um sensor de temperatura e deformação baseado em FBGs usando um laser sintonizável como fonte de luz.....	60
Figura 26 - (a) Sensor de deformação de uma única FBG com demodulador FFP. (b) Sensor de deformação de várias FBGs como demodulador FFP de escaneamento ⁴¹	61
Figura 27 - Princípio de funcionamento de um espectrômetro	63
Figura 28 - Sensoriamento de temperatura e deformação através de uma FBG acoplada a uma fonte de luz ELED e um espectrômetro como interrogador.....	64
Figura 29 - (a) Curva típica de uma rede de Bragg sendo medida por um espectrômetro convencional. (b) Resposta do espectrômetro.....	64
Figura 30 - Representação esquemática do sistema de gravação de redes de Bragg - técnica de inscrição baseada em espelho de Lloyd	68
Figura 31 - Sistema utilizado para a gravação das redes de Bragg em fibras ópticas	69
Figura 32 - Montagem experimental do sistema de gravação de redes de Bragg. a) Laser 532 nm da empresa COHERENT, lente focalizadora e cristal de geração de segundo harmônico (BBO); b) zoom do cristal de geração utilizado para geração de segundo harmônico; e c) sistema de alinhamento da fibra óptica com o laser UV.....	70
Figura 33 - Espectro de absorvância da pré-forma utilizada para a fabricação das fibras ópticas. Curva sólida - pré-forma de sílica dopada com germânio. O pequeno pico ao redor de 270 nm é devido ao instrumento de medida e não se refere à amostra. Curva tracejada - pré-forma sem dopagem ⁴⁴	71
Figura 34 - Espectro de reflexão das redes de Bragg centradas respectivamente em 810 e 860 nm.....	72
Figura 35 - Sistema de interrogação; a) fonte de alimentação; b) espectrômetro HR4000; c) divisor de feixes; d) diodo super luminescente; e e) conectores para interrogação simultânea de duas fibras ópticas	73

Figura 36 - Esquemático do sistema para determinação dos coeficientes $K_{\epsilon 1}$ e $K_{\epsilon 2}$	75
Figura 37 - Esquemático do sistema para determinação dos coeficientes K_{T1} e K_{T2}	75
Figura 38 - Comportamento do comprimento de onda induzida nos comprimentos de onda das redes de Bragg pela variação da deformação da fibra óptica à temperatura constante de 21,6 °C	78
Figura 39 - Comportamento do comprimento de onda induzida nos comprimentos de onda das redes de Bragg pela variação de temperatura na fibra óptica	79
Figura 40 - Espectro de emissão de uma lâmpada de Neon de calibração	81

SUMÁRIO

1	Introdução.....	23
2	Redes de Bragg	27
2.1	Teoria sobre redes de Bragg em fibras ópticas	27
2.2	Fotossensibilidade de fibras ópticas	30
2.3	Hidrogenação	32
2.4	Tipos de redes de Bragg	32
2.5	Redes de Bragg tradicionais	33
2.6	Redes de Bragg Inclínadas.....	34
2.6.1	Redes de Bragg com Gorjeio.....	35
2.6.2	Redes de Bragg de Tipo I, Tipo II e Tipo IIA	37
2.6.3	Redes de período longo (LPG).....	39
2.7	Sensores de temperatura e deformação baseados em redes de Bragg	40
2.8	Relação entre erros na determinação de variações de temperatura e deformação através de medidas do comprimento de Bragg.....	43
3	Técnicas de fabricação	47
3.1	Máscara de fase	47
3.2	Espelho de Lloyd.....	49
3.3	Ponto-a-ponto	51
3.4	Fabricação de redes de Bragg especiais	52
3.4.1	Redes de Bragg inclinadas	52
3.4.2	Redes de Bragg chirpadas	53
4	Técnicas de interrogação	57
4.1	Optical Spectrum Analyser (OSA)	57
4.2	Laser de diodo sintonizável	58
4.3	Fabry-Perot sintonizável	60
4.4	Espectrômetro	62
4.4.1	Método do centróide	64
5	Materiais e métodos	67
5.1	Gravação de redes de Bragg	67
5.1.1	Fibra óptica	67

5.1.2	Sistema de gravação.....	67
5.2	Interrogação.....	73
5.3	Calibração do sistema para medidas de deformação e temperatura	74
6	Resultados.....	77
6.1	Determinação dos coeficientes da matriz K.....	77
6.2	Análise de erros na determinação de variações de temperatura e deformação	80
7	Conclusões	83
	Referências.....	85

1 Introdução

Nas últimas décadas, o uso de fibras ópticas vem aumentando em diversos campos do setor tecnológico. Esse aumento foi observado principalmente na área de telecomunicações devido às diversas vantagens das fibras ópticas, como dimensões reduzidas, imunidade às interferências eletromagnéticas externas, baixa reatividade do material que as compõe, altas taxas de modulação, entre outras. Com o avanço do uso de fibras ópticas, novas tecnologias começaram a ser estudadas e empregadas, como é o caso das redes de Bragg.

Redes de Bragg em fibras ópticas (FBGs, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) foram descobertas no Canadá em 1978 por Ken Hill e colaboradores.¹⁻⁴ Eles notaram que, ao expor fibra de sílica dopada com germânio à luz de laser de argônio, era induzida uma variação periódica no índice de refração do seu núcleo, gerado pela interferência do feixe de entrada com a reflexão de Fresnel da extremidade oposta da fibra.³ Esse padrão periódico causava reflexão de parte da luz incidente, sendo que a quantidade de luz refletida pela fibra aumentava significativamente com o tempo de exposição. Hill e colaboradores perceberam que esse seria um filtro espectral tipo guia de onda de alta qualidade, de comprimento de onda ajustável e com baixa perda por espalhamento, hoje conhecido por rede de Bragg.

As FBGs também se mostraram bastante adequadas como sensores de diversos tipos, uma vez que são de fácil manuseio, podem ser colocadas em lugares de difícil acesso e são facilmente multiplexáveis.^{2,5-6} Por essas e outras vantagens, muitos autores têm estudado sensores baseados em redes de Bragg, particularmente para medida de deformação e de temperatura⁷⁻⁹. Entretanto, nessa área de aplicação, sensores com redes de Bragg apresentam um problema que tem sido abordado exaustivamente nos últimos anos.¹⁰⁻¹⁷ Por serem as medidas de ambos os parâmetros, temperatura e deformação, baseadas no efeito de alteração do índice de refração e também de dilatação do núcleo da fibra, torna-se difícil a distinção entre reações dos sensores causadas por deformações na fibra óptica ou por variações de temperatura.

Para solucionar esse problema, vários autores têm se baseado numa característica importante das redes de Bragg. Assim como o índice de refração de um vidro apresenta diferentes valores para cada comprimento de onda da luz propagante, variações de temperatura e de deformação medidas pelos sensores a FBGs também dependem do comprimento de onda de Bragg das redes. Por conta disso, muitos investigadores têm

contornado esse problema da indistinguibilidade desenvolvendo diferentes métodos para a medida simultânea de temperatura e deformação de uma fibra óptica. Como exemplo dessa abordagem, Brady e colaboradores¹⁰ sugeriram a utilização das reflexões de primeira e segunda ordem de uma rede de Bragg, cujos comprimentos de onda são 1561 nm e 789 nm, para a determinação dos coeficientes térmicos e de deformação dependentes do comprimento de onda. De acordo com os autores, obteve-se êxito na aplicação do método, apresentando precisão de $\pm 17,4 \mu\text{-strain}$ e $\pm 1,72 \text{ }^\circ\text{C}$ nas medidas de deformação e temperatura, respectivamente.

Outra maneira de separar os efeitos causados por variações de temperatura e deformação é utilizando duas redes de Bragg idênticas, mas em fibras ópticas separadas. Uma das FBGs é utilizada como sensor de deformações, enquanto a outra é denominada sensor de referência. Essa FBG de referência é mantida livre de deformações e é utilizada para medir a temperatura à qual o sensor de deformações está submetido.^{7,18} Então, ela é colocada sob as mesmas condições ambientais que o sensor de deformação, de maneira que a incerteza na medida de deformação devido a variações de temperatura seja compensada em primeira ordem pela subtração da, agora conhecida, variação térmica no comprimento de onda da FBG do sensor de deformação.

Alternativamente, redes de longo período (LPG, do inglês *Long Period Grating*) também podem ser utilizadas para a separação de efeitos térmicos sobre sensores de deformação baseados em redes de Bragg.¹⁷ Isto porque redes daquele tipo apresentam respostas a excitações térmicas consideravelmente maiores que FBGs, além de resposta menor, quando submetida a deformações.⁸ Dessa forma, ao utilizar simultaneamente uma rede LPG e uma FBG numa mesma fibra óptica, é possível discriminar respostas do sensor devido a variações térmicas e de deformações. No entanto, como o comprimento de uma LPG é muito maior que o de uma FBG, poderá surgir uma deformação não uniforme sobre elas. Além disso, a largura de banda de uma LPG é relativamente grande, o que poderia limitar a precisão do sensor e também a quantidade de sensores multiplexados.

Em 1994, Xu e colaboradores¹⁶ sugeriram um método para discriminar a resposta de sensores a variações de temperatura e deformação utilizando duas FBGs de comprimentos de onda diferentes (850 e 1300 nm). Este método segue a mesma teoria que as técnicas anteriores, de que a amplitude da variação do comprimento de Bragg das FBGs, por causa de variações de temperatura e deformação, depende do comprimento de Bragg das redes. O diferencial desta técnica é que as FBGs são inscritas superpostas, ou seja, na mesma posição longitudinal da fibra óptica. Isto possibilita que ambas as redes estejam instantaneamente sob

as mesmas condições ambientais, reduzindo a incerteza da medida. Com este estudo, os autores conseguiram discriminar deformação e variações na temperatura com precisão de 10 μ strain e 5 °C, respectivamente. No entanto, para a interrogação desses sensores, é necessário o uso de duas fontes de luz centradas em comprimentos de onda diferentes, uma em 850 e outra em 1300 nm. Além disso, pela grande separação entre os comprimentos de onda, foi necessário o uso de um OSA (do inglês *Optical Spectrum Analyzers*), o que encarece o sistema. Portanto, apesar de serem interessantes as soluções apontadas para esse problema pelos autores citados, sua aplicação se torna, muitas vezes, inviável pelo alto custo dos equipamentos necessários.

Na tentativa de contornar essa dificuldade, este trabalho busca, principalmente, desenvolver uma técnica de interrogação de sensores de temperatura e deformação eficiente, precisa e de custo reduzido. Seguindo o mesmo raciocínio que Xu e seus colaboradores, propõe-se o uso de duas redes de Bragg superpostas.¹⁶ Como já mencionado, Xu utilizou duas FBGs com comprimentos de Bragg em 850 e 1300 nm e, com isso, precisava de duas fontes de luz banda larga e um OSA para o funcionamento de seu sensor. Para que o atual sensor fosse portátil, no lugar das duas fontes de luz, usamos uma fonte de banda larga centrada em 850 nm. As FBGs foram inscritas com comprimento de Bragg em 810 e 860 nm, sendo possível o monitoramento de ambas as FBGs com apenas essa fonte de luz. Com essa alteração, além da redução do número de fontes de luz, também foi possível empregar um espectrômetro portátil de baixo custo para efetuar as medidas. Como equipamentos dessa natureza são mais baratos que aqueles como OSA, principalmente pelo fato de operarem em torno de 800 nm, o preço final do sistema é bem reduzido.

2 Redes de Bragg

2.1 Teoria sobre redes de Bragg em fibras ópticas

Redes de Bragg em fibras ópticas podem ser definidas como filtros de bandas estreitas do espectro eletromagnético. Fundamentalmente, seu funcionamento é baseado na lei de reflexão de Fresnel, uma vez que são constituídas de pequenas alterações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra, causando pequenas reflexões da luz que atravessa essa estrutura. Sabe-se que quando uma onda eletromagnética é refratada pela interface entre dois meios materiais dielétricos de índices de refração diferentes, parte dessa onda é refletida e a outra parte é transmitida.¹⁹ A quantidade de luz refletida depende da direção de incidência e da diferença dos índices de refração. Considerando, sem perda de generalidade, o caso particular em que a incidência dessa frente de onda é normal à interface entre os meios, o coeficiente de reflexão de Fresnel, r_F , é dado por

$$r_F = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (1)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios em questão. Considerando pequenas variações no índice de refração, pode-se dizer que

$$n_2 = n_1 + \delta n \quad (2)$$

Dessa maneira, e sabendo que a refletância é dada por $R_F = r_F^2$, pode-se reescrever a Equação (1), transformando-a em

$$R_F = \frac{(\delta n)^2}{(2n_1 + \delta n)^2} = \frac{1}{\left(\frac{2n_1}{\delta n} + 1\right)^2} \quad (3)$$

Desse resultado, observam-se dois fatos importantes. Primeiramente, quanto maior a variação do índice de refração na interface, δn , maior sua refletância. Por causa disso, diversos estudos foram realizados em busca do acréscimo dessa diferença,²⁰⁻²³ sendo um deles

apresentado na seção 2.3. Outro ponto importante é que esse coeficiente independe do sinal da diferença dos índices de refração, ou seja, sendo ela positiva ou negativa, a refletância segue o mesmo comportamento. Isso significa que para uma modulação periódica do índice de refração, ao aumentar e diminuir periodicamente seu valor, geram-se várias interfaces como essa, fazendo com que a quantidade de luz refletida através dessa estrutura seja alta.²⁴ A Figura 1 é uma representação esquemática de certa quantidade de luz sofrendo diversas reflexões ao atravessar a estrutura descrita.

Figura 1 - Pequenas reflexões de Fresnel acarretadas pela variação de índice de refração entre dois meios dielétricos

Consideremos, agora, duas reflexões consecutivas, como mostra a Figura 2. Pela teoria de interferência de dois feixes coerentes, para que a interferência de um determinado comprimento de onda, λ_B , seja construtiva, a diferença de caminho óptico entre os dois feixes, Δ , deve ser da forma

$$\Delta = m\lambda_B \quad (4)$$

onde m é a ordem da franja de interferência.

Figura 2 - Duas reflexões consecutivas

Além disso, como se trata de duas reflexões consecutivas, a diferença de caminhos ópticos entre os feixes depende da separação espacial das interfaces, definida como Λ , e do índice de refração efetivo do núcleo da fibra, n_{eff} . Como a luz que é refletida pela segunda interface viaja duas vezes a distância Λ , o comprimento de onda refletido pela combinação das duas interfaces, cuja interferência é construtiva, é dado por,

$$\lambda_B = \frac{2 n_{eff} \Lambda}{m} \quad (5)$$

O mesmo raciocínio pode ser empregado para milhares de interfaces. Como resultado, teremos uma modulação periódica do índice de refração que reflete uma faixa bem definida do espectro eletromagnético. A essa estrutura é dado o nome de rede de Bragg, com comprimento de onda centrado em λ_B . Para ilustrar o funcionamento de uma FBG, a Figura 3 esquematiza os espectros de luz incidente, refletido e transmitido por uma rede de Bragg em fibra óptica. Ao se incidir luz de banda larga sobre a FBG, parte do espectro será refletida por ela, dependendo da qualidade da rede, ou seja, da refletância que é limitada pela diferença entre os índices de refração da interface, pela qualidade da modulação periódica e pelo comprimento da rede. A outra parte remanescente do espectro incidente é transmitida.

Figura 3 - Esquema de funcionamento de uma rede de Bragg

2.2 Fotossensibilidade de fibras ópticas

A fotossensibilidade em fibras ópticas se deve a um efeito fotorrefrativo que foi primeiramente observado, em 1978, por Hill e colaboradores¹ em fibras de sílica dopadas com germânio. Na ocasião, que já intitulamos na seção 1 como a descoberta das redes de Bragg, Hill e colaboradores observaram que a quantidade de luz refletida pela fibra óptica era proporcional ao tempo de exposição à luz de laser em 488 nm. Já naquela época, este efeito foi entendido como sendo consequência da inscrição de uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Hoje, sabemos que essas são realmente as causas desse efeito. Em 1981, Lam e Garside²⁵ mostraram que a magnitude da mudança fotoinduzida do índice de refração dependia quadraticamente da potência do laser de argônio (488 nm). Apesar de ser ainda um assunto recém-descoberto naquela época, pouco se estudou a respeito da fotossensibilidade de fibras ópticas por um longo tempo. A falta de interesse a respeito desse assunto levou à crença que apenas as fibras utilizadas nos experimentos de Lam e Garside apresentavam tal fenômeno. No entanto, em 1987, estudos produzidos por Stone²⁶ chegaram a outra conclusão - ele observou que a fotossensibilidade também era característica de outras fibras, sendo todas elas com alta dopagem de germânio.

Atualmente, sabemos que fibras ópticas dopadas com germânio apresentam alta variação no seu índice de refração quando expostas à radiação UV. Isto é principalmente

observado para comprimentos de onda próximos ao pico de absorção de defeitos que surgem durante a incorporação de átomos de germânio (Ge) na estrutura vítrea. Nesse tipo de fibra óptica, estes defeitos são provocados quando um átomo de germânio (Ge) se liga a outro da mesma natureza, ou mesmo quando se liga a um de silício (Si), formando as moléculas Ge_2O_6 ou $\text{GeO}_3\text{-SiO}_3$, respectivamente (Figura 4). Como esta ligação apresenta um pico de absorção centrado em 240 nm^{27} , ao ser exposta à radiação com este comprimento de onda, ela é quebrada, criando um centro de cor GeE' . Um elétron é liberado para a banda de condução, permanecendo livre para se mover na matriz vítrea até ser reintegrado a ela. Acredita-se que a deficiência de elétron criada, causa a reconfiguração da molécula, como também mostra a Figura 4, alterando a densidade do material e também seu coeficiente de absorção.³ Esse modelo foi proposto por Hand e Russel²⁸ e indica que a alteração no índice de refração é causada por mudanças na relação de Kramers-Kronig.

Figura 4 - Defeito GeO de sílica dopada com germânio, no qual os átomos adjacentes ao germânio são átomos de sílica ou de próprio germânio. Este defeito pode absorver um fóton e formar o defeito GeE' .³

Apesar da fotossensibilidade natural dessas fibras ópticas dopadas com germânio já ser suficiente para inscrição de redes de Bragg nas fibras, surgiram técnicas capazes de aumentar a eficiência desse processo. Um dos mais notáveis métodos usados para esse fim é conhecido por hidrogenação, apresentado na seção a seguir.

2.3 Hidrogenação

Hidrogenação é um método simples e eficaz desenvolvido para aumentar a fotossensibilidade na região UV de fibras ópticas de sílica dopadas com germânio. A técnica consiste em submeter as fibras à alta pressão de hidrogênio, que se difunde pelo núcleo das fibras, aumentando sua fotossensibilidade. Isto permite mudanças permanentes no seu índice de refração quando expostas ao UV. O processo pode ser explicado de forma análoga àquela usada na seção 2.1.

Ao irradiar-se com luz UV a fibra óptica carregada com hidrogênio, além de romper ligações do tipo Si/Ge–O, o contido na fibra é dissociado, formando Hidrogênio molecular. Sob essas circunstâncias, o Hidrogênio molecular se liga ao Oxigênio dissociado, dando origem a centros GeE' (Figura 5), responsáveis pela modulação de índice de refração. Além disso, centros com deficiência de Oxigênio, existentes na estrutura, absorvem em torno de 240 nm, formando centros GeE'.²

Figura 5 - Formação de centros de cor GeE', responsáveis pelo aumento da fotossensibilidade da fibra óptica na região do UV

Para garantir que a fibra óptica seja completamente carregada com hidrogênio, Lemarie e colaboradores²⁹ indicam a imersão da fibra à pressão de 200 bar (~200 kgf/cm²) por duas semanas à temperatura de 21°C.

2.4 Tipos de redes de Bragg

Muito se tem estudado a respeito de redes de Bragg em fibras ópticas e novas tecnologias têm sido desenvolvidas e, com elas, surgiram também novos tipos de FBGs. Atualmente no mercado existem as redes de Bragg tradicionais, conhecidas como refletoras, as inclinadas e as com gorjeio. Cada uma dessas FBGs é diferenciada ora pelo seu passo (periodicidade espacial da modulação de índice de refração), ora pela sua inclinação (ângulo

entre os planos das redes e o eixo da fibra óptica). O tipo mais comum das redes de Bragg é a refletora, aquela que o passo é constante ao longo da fibra e que sua inclinação é de 90 graus. As FBGs inclinadas possuem o plano das inscrições fazendo um ângulo menor que 90 graus em relação ao eixo da fibra, enquanto que as redes com gorjeio apresentam passos, ou modulação do índice de refração, variáveis ao longo da fibra. Nas seções subsequentes são brevemente descritos os tipos mais comuns de redes de Bragg em fibra óptica.

2.5 Redes de Bragg tradicionais

Este é o mais simples e mais usado tipo de redes de Bragg. Fibras ópticas com estas redes são muito utilizadas como filtros de banda estreita de transmissão ou reflexão. As redes de Bragg refletoras, como são conhecidas, são excelentes para o uso em algumas das já citadas aplicações como sensores de temperatura e deformação, filtros de banda passante e sintonizadores para lasers de diodo. Outra propriedade marcante destas FBGs é que cada uma possui uma assinatura própria caracterizada pelo seu comprimento de onda de Bragg. Isso proporciona a inscrição de várias FBGs numa mesma fibra óptica, o que torna possível analisá-las individualmente apenas sabendo a faixa de comprimento de onda que cada uma reflete (Figura 6).

Figura 6 - (a) Esquema de várias redes de Bragg inscritas numa única fibra óptica e (b) o espectro refletido por elas

2.6 Redes de Bragg Inclinadas

Como o próprio nome sugere, as redes de Bragg inclinadas têm suas marcações formando ângulo menor que 90 graus com o eixo da fibra óptica. Neste tipo de FBG, a luz guiada pelo núcleo da fibra óptica é acoplada para modos assimétricos contra-propagantes da casca, causando o aparecimento de vales em seu espectro de transmissão. Evidentemente, a eficiência do acoplamento e a largura de banda da luz dependem diretamente da inclinação da rede e da intensidade de modulação do índice de refração do núcleo.³⁰

Figura 7 - Rede de Bragg inclinada em fibra óptica

Para o cálculo da inclinação da rede, utiliza-se a condição de Bragg (conservação de momentum e energia) e para explicar o comportamento dessas FBGs, lembramos que o comprimento de onda refletido por uma rede de Bragg, λ_B , pode ser expresso por seu vetor de onda, k_B . Consideremos, então, que o vetor de onda dessa luz, k_i , incida sobre a FBG com ângulo θ em relação ao eixo da fibra óptica (Figura 8). Por conservação de energia, o módulo do vetor de onda espalhado deve ser igual ao do vetor de onda incidente, ou seja, $|\mathbf{k}_i| = |\mathbf{k}_e| = k$. Por geometria simples, vemos que o ângulo do vetor de onda espalhado em relação ao eixo da fibra é 2θ . Aplicando a lei dos cossenos ao diagrama dos momentos temos -

$$|\vec{k}_i|^2 + |\vec{k}_e|^2 - 2|\vec{k}_i||\vec{k}_e|\cos(\pi - 2\theta) = |\vec{K}|^2 \quad (6)$$

ou seja,

$$\cos(\theta) = \frac{|\vec{K}|}{2k} \quad (7)$$

Mas $k = 2\pi n / \lambda$, o que resulta em -

$$\cos(\theta) = \frac{|\vec{K}|\lambda_B}{4\pi n_{eff}} \quad (8)$$

A Equação (8) mostra que o ângulo do vetor de onda espalhado depende somente do comprimento de onda de Bragg e do índice de refração efetivo do núcleo da fibra. Pela Equação (7), podemos ver ainda que, além de diferentes comprimentos de onda serem espalhados a ângulos distintos, diferentes modos também são espalhados a ângulos levemente distintos devido às diferentes constantes de propagação. Com base nisto, redes de Bragg inclinadas podem agir como espectrômetros e também como discriminadoras de modos.²⁻³

Figura 8 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg inclinada

2.6.1 Redes de Bragg com Gorjeio

Redes de Bragg com gorjeio apresentam variação no período da rede ao longo da fibra. Como o comprimento de onda refletido pela FBG depende de sua frequência espacial, os comprimentos de onda de um espectro banda larga são refletidos em diferentes partes da FBG. Por esse motivo, são muito aplicadas em telecomunicações, por exemplo, como compensadores de dispersão.

Este tipo de FBG pode ser confeccionado variando axialmente tanto o período da rede, Λ , quanto o índice de refração do núcleo da fibra, ou até mesmo ambos.² Consideremos que o comprimento de onda de Bragg dado pela Equação (5), para $m = 1$, possua a dependência em z (eixo axial da fibra óptica) segundo a expressão -

$$\lambda_B(z) = 2 n_{eff}(z) \Lambda(z) \quad (9)$$

Para simplificar, consideremos, sem perda de generalidade, a dependência do período da rede com z como sendo linear, ou seja,

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z \quad (10)$$

onde Λ_0 é o período inicial e Λ_1 é o coeficiente angular que rege o crescimento do período da rede em função de z . Para o melhor entendimento do funcionamento dessa rede de Bragg, consideremos que ela seja composta por várias redes de Bragg do tipo comum, isto é, que refletem um único comprimento de onda, e que elas sejam dispostas em ordem crescente de comprimento de onda refletido, como mostra a Figura 9(a). Conforme se evolui em z , o período das diferentes redes aumenta, alterando o comprimento de onda de Bragg de cada uma delas, ficando este um pouco maior. Agora, suponhamos que ao invés de as FBGs serem separadas espacialmente, elas sejam dispostas de forma que sua frequência espacial seja crescente continuamente em z , como na Equação (10) e conforme é exemplificado pela Figura 9(b). Teremos, dessa forma, uma rede de Bragg cujo período espacial cresce linearmente ao longo do eixo axial, caracterizando uma rede de Bragg com gorjeio.

Como exemplo, suponhamos uma rede de Bragg com gorjeio com $\Lambda_1 = 2 \text{ nm/cm}$, de tamanho total 2 cm e com comprimento de onda inicial de 1500 nm. No início, $z = 0$, sua reflexão é em 1500 nm. Ao aumentar z , o comprimento de onda passa a aumentar também, chegando ao final do seu comprimento, $z = 2 \text{ cm}$, refletindo em 1504 nm.

Figura 9 - Esquema do funcionamento de uma rede de Bragg com gorjeio

Como já mencionado no início desta seção, uma das principais aplicações das redes de Bragg com gorjeio é como compensadores de dispersão da luz. Sabemos que esse efeito é observado em meios cujo índice de refração depende do comprimento de onda, como é o caso

do vidro do núcleo das fibras ópticas. Dado isso, a velocidade de propagação de cada comprimento de onda é diferente, fazendo com que um feixe de luz banda larga seja alargado temporalmente. Para compensar esse efeito, redes de Bragg com gorjeio podem ser inscritas na fibra óptica de modo que os comprimentos de onda que propagam mais rapidamente sejam refletidos numa posição espacial mais afastada que os que propagam mais lentamente, fazendo com que todo o espectro de luz atinja o sensor de interesse simultaneamente, como exemplificado na Figura 9(b).

2.6.2 Redes de Bragg de Tipo I, Tipo II e Tipo IIA

Existem três diferentes tipos de redes de Bragg que podem ser geradas em fibras ópticas fotossensíveis - tipo I, tipo II e tipo IIA. Essas redes de Bragg se diferenciam basicamente pela forma que são fabricadas, considerando potência e comprimento de onda do laser, e tipo de energia do laser (CW ou pulsado). Os três tipos são discutidos brevemente nesta seção.

Redes de Bragg de tipo I são as mais comumente utilizadas. Elas se caracterizam por serem inscritas em fibras ópticas fotossensíveis convencionais (telecomunicações) por processos cuja intensidade incidente sobre a fibra é considerada moderada. Uma das características fundamentais de redes de Bragg de tipo I é a complementariedade de seus espectros de reflexão e de transmissão (Figura 10), característica essa que evidencia baixas perdas de luz ao longo da fibra por processos como absorção ou reflexão pela casca. Apesar de se comportarem muito bem na faixa de temperatura de -40 a 80 °C, elas podem ser apagadas quando expostas a temperaturas acima de 200 °C.²

Figura 10 - Espectros de reflexão e transmissão de uma rede de Bragg de comprimento de onda centrado em 800 nm

As redes de Bragg de tipo IIA não diferem das de tipo I quanto à complementariedade dos espectros de transmissão e de reflexão, o que torna esses dois tipos indistinguíveis em uma situação estática. A diferença entre elas surge na sua fabricação e na temperatura em que as redes de Bragg de tipo IIA são apagadas. A fabricação dessas redes segue o mesmo processo que as de tipo I, mas com um longo tempo de exposição da fibra à radiação. Isso faz com que a alteração de índice de refração do núcleo da fibra seja por meio da compactação da matriz vítrea, diferentemente das de tipo I. A vantagem das FBGs de tipo IIA em relação às de tipo I é que podem ser submetidas a temperaturas de até 500 °C sem sofrerem alterações em sua estrutura, podendo ser aplicadas em sensores que precisem suportar tais aquecimentos.²

Outro tipo de redes de Bragg, conhecido por tipo II, é aquele cuja fabricação é feita por meio de pulsos únicos de laser. Essas redes são inscritas a partir de danos físicos gerados no núcleo da fibra, causados pela alta energia do pulso, de aproximadamente 30 mJ.³¹ Para sua fabricação, pulsos de laser são incididos sobre a fibra separados espacialmente por um período da rede, de maneira a formarem o padrão periódico que as gera. Esse tipo de FBG possui espectros de reflexão e transmissão irregulares devido ao processo de fabricação (Figura 11), mas suportam temperaturas de até 700 °C.

Figura 11 - Espectros de transmissão e reflexão de uma rede de Bragg de tipo II²

2.6.3 Redes de período longo (LPG)

As redes de período longo (LPG, do inglês *Long Period Gratings*) são uma forma especial das redes de Bragg.² Devido à sua baixa perda de inserção e baixa reflexão, as LPGs vêm sendo utilizadas em grande escala como filtros de rejeição de banda e filtros equalizadores de ganho.³²⁻³³ A longa periodicidade da modulação do núcleo da fibra óptica faz com que a luz guiada no modo fundamental do núcleo seja acoplada aos modos propagantes da casca, onde sofre perdas devido à absorção e ao espalhamento.² A condição de casamento de fase entre o modo guiado e os modos propagantes da casca é dada por -

$$\beta_{01} - \beta_{cl}^n = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (11)$$

onde Λ é a periodicidade da rede, β_{01} e β_{cl}^n são as constantes de propagação do modo fundamental e do n -ésimo modo da casca acoplado, respectivamente.³² Quando a condição de casamento de fase é satisfeita, os comprimentos de onda de pico de atenuação no espectro de transmissão, ou seja, os comprimentos de onda que atendem à ressonância entre o modo do núcleo e o modo m da casca são dados por -

$$\lambda_m = (n_{01} - n_{cl}^m)\Lambda \quad (12)$$

onde n_{01} e n_{cl}^m são os índices de refração correspondentes a esses modos, respectivamente.³² À medida que a radiação se propaga ao longo da fibra óptica, os modos da casca decaem rapidamente devido a perdas pela casca.² Conforme a Equação (12), como cada modo da casca experimenta um diferente índice de refração efetivo, pode haver vários comprimentos de onda satisfazendo a condição de casamento de fase, fazendo com que haja mais que um único vale no espectro de transmissão (Figura 12). Dessa forma, modulações do núcleo e alterações nas propriedades de guiamento da casca modificam a resposta espectral das LPGs. Isso faz com que seja possível a produção de sensores que interajam com o meio externo às fibras, como, por exemplo, sensores de temperatura e deformação.

Figura 12 - Espectro de transmissão de uma LPG⁵

2.7 Sensores de temperatura e deformação baseados em redes de Bragg

Perturbações externas que induzem variações no índice de refração ou no período de uma FBG alteram seu comprimento de onda de Bragg. Isso ocorre porque, como pode ser visto na Equação (5), o comprimento de onda que caracteriza a rede de Bragg depende de ambos os parâmetros, n_{eff} e Λ . Dessa forma, parâmetros físicos como temperatura, que altera majoritariamente o índice de refração, mas que também tem influência sobre o período da

rede, e deformação, que altera principalmente o período da rede, podem ser medidos utilizando-se redes de Bragg.⁵

Este tipo de sensor de temperatura e deformação tem sido bastante explorado em diversas aplicações, como é o caso em que se deseja monitorar regiões a longas distâncias, lugares de difícil acesso, entre outros. No entanto, apesar de muito promissora, esta técnica de interrogação enfrenta o problema de difícil distinção entre respostas do sensor a variações de temperatura ou de deformação. Isso porque, como já citado, a interrogação das duas grandezas depende da evolução do comprimento de onda de Bragg, que pode sofrer alterações por perturbações tanto no índice de refração do núcleo, quanto no período espacial da rede, causando incerteza na medida.

Para superar essa limitação, muitos estudos têm sido desenvolvidos.^{10-17;34-35} Como exemplo, vamos considerar o caso mais simples em que variações de temperatura e deformações numa FBG induzem um desvio linear em seu comprimento de onda de Bragg, λ_B . Podemos expressar esse desvio, então, como uma combinação linear das contribuições geradas pela dependência de λ_B com a temperatura, T , e com deformações na fibra, Δl . Isto é, diferenciando a Equação(9), esse desvio pode ser expresso por -

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (13)$$

O primeiro termo da Equação(13) representa o efeito gerado por deformações na fibra óptica e pode ser expresso por -^{30; 36}

$$\Delta\lambda_{B,\epsilon} = \lambda_B (1 - p_e) \Delta\epsilon \quad (14)$$

onde p_e é a constante efetiva de deformação óptica definida como

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (15)$$

onde p_{11} e p_{12} são componentes do tensor de deformação óptica, n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e ν é a razão de Poisson. O outro termo da Equação (13) representa o efeito térmico na fibra óptica que³⁰, analogamente à deformação, pode ser escrito como

$$\Delta\lambda_{B,T} = \lambda_B (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (16)$$

onde $\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica e $\zeta = (1/n)(\partial n/\partial T)$ é o coeficiente termo-óptico da fibra. Para uma fibra óptica típica, os coeficientes apresentados acima são $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$, $n = 1.482$, $\alpha = 5.5E-7$, $\zeta = 8.6E-6$.³⁰ Nitidamente, a maior contribuição no desvio do comprimento de Bragg quando se submete a FBG a variações de temperatura é devido a alterações no índice de refração, uma vez que $\zeta \gg \alpha$.

Juntando as Equações (14) e (16) e substituindo-as na Equação (13), temos -

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\varepsilon + \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (17)$$

A Equação (17) descreve o comportamento do desvio do comprimento de onda de Bragg para variações de temperatura e deformação na fibra. Para simplificar, podemos reescrevê-la como

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon\Delta\varepsilon + K_T\Delta T \quad (18)$$

onde

$$K_\varepsilon = \lambda_B(1 - p_e) \quad (19)$$

e

$$K_T = \lambda_B(\alpha + \zeta). \quad (20)$$

Pelas equações (19) e (20), notamos que os coeficientes K_ε e K_T dependem tanto das características da fibra óptica utilizada quanto do comprimento de onda de Bragg da FBG. Ou seja, para uma mesma fibra óptica, se duas FBGs de comprimento de Bragg diferentes são submetidas às mesmas variações de temperatura e deformação, os desvios de seus λ_B serão distintos. Usando essa informação, Xu et al.¹⁶ apresentaram uma maneira de solucionar o problema de indistinguibilidade do sensor entre variações de temperatura e deformação. Duas redes de Bragg são inscritas numa mesma região de uma fibra óptica, ou seja, superpostas, mas cada uma possuindo diferentes comprimentos de onda de Bragg (850 e 1300 nm). Quando submetidas às mesmas condições externas, as duas redes de Bragg apresentam diferentes coeficientes angulares, K_ε e K_T , relacionados a cada um dos parâmetros. Escrevendo a Equação (18) para as duas FBGs e denotando por 1 e 2 os coeficientes relacionados às FBGs de comprimento de Bragg 850 e 1300 nm, respectivamente, temos -

$$\Delta\lambda_1 = K_{\varepsilon 1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (21)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{\varepsilon 2}\Delta\varepsilon + K_{T2}\Delta T. \quad (22)$$

Essas equações relacionam o desvio do comprimento de Bragg de cada FBG originado por variações de temperatura e por diferentes deformações às que a fibra é submetida. Para simplificar os cálculos, podemos reescrever as Equações (21) e (22) na forma de matrizes, resultando em -

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (23)$$

Essa é uma relação direta entre o desvio nos comprimentos de onda de Bragg das duas FBGs e as variações de temperatura e deformação na fibra óptica. No entanto, essa relação contempla um resultado direto de sua aplicação quando se procura obter desvios em λ devido a variações dos parâmetros físicos. Para que seja possível o inverso, isto é, obter o resultado direto de variações de temperatura e deformação na fibra fornecias pelo desvio de λ_1 e λ_2 , devemos inverter a Equação (23). Fazendo isso, Equação (23) se torna

$$\begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \frac{1}{(K_{\varepsilon 1}K_{T2} - K_{\varepsilon 2}K_{T1})} \begin{pmatrix} K_{T2} & -K_{T1} \\ -K_{\varepsilon 2} & K_{\varepsilon 1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Esta é uma das maneiras encontradas para se produzir um sensor de temperatura e deformação baseado em redes de Bragg que não esteja submetido ao problema da indistinguibilidade entre esses parâmetros. Para isso, basta apenas determinar os coeficientes $K_{\varepsilon i}$ e $K_{T,i}$, para $i = 1,2$, e o problema é completamente resolvido.

2.8 Relação entre erros na determinação de variações de temperatura e deformação através de medidas do comprimento de Bragg

Os erros nas medidas de temperatura e deformação pela utilização de sensores a redes de Bragg são dados pelos erros na determinação da variação do comprimento de Bragg dessas FBGs.¹⁰ Supondo que os coeficientes $K_{\varepsilon i}$ e $K_{T,i}$, para $i = 1,2$, apresentados na seção anterior, sejam conhecidos para os comprimentos de Bragg das duas FBGs, λ_1 e λ_2 , qualquer erro inserido na medida do comprimento de onda das FBGs será propagado para a determinação de deformação e de temperatura, como mostrado pelo método a seguir.

Sejam a e b os erros na determinação dos comprimentos de Bragg, λ_1 e λ_2 , respectivamente, e consideremos que não haja correlação entre eles. No espaço dos comprimentos de onda, a incerteza nessa medida é descrita por uma elipse, como mostra a Figura 13. Pela linearidade entre os parâmetros, essa incerteza também será uma elipse no espaço deformação-temperatura, como pode ser visto pela Figura 14.

Figura 13 - Representação gráfica da incerteza no espaço dos comprimentos de Bragg

Sem perda de generalidade, aplica-se uma translação no espaço dos comprimentos de onda de forma que λ_1 e λ_2 estejam na origem do sistema de coordenadas. Dessa forma, os erros na medida dos comprimentos de onda de Bragg podem ser dados pela Equação (25).

$$\frac{\delta\lambda_1^2}{a^2} + \frac{\delta\lambda_2^2}{b^2} = 1 \quad (25)$$

Na forma matricial,

$$(\delta\lambda_1 \quad \delta\lambda_2) \begin{pmatrix} 1/a^2 & 0 \\ 0 & 1/b^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\lambda_1 \\ \delta\lambda_2 \end{pmatrix} = 1 \quad (26)$$

A Equação (23) representa a relação entre medidas de variação dos comprimentos de Bragg das redes com variações de temperatura e deformação. Equivalentemente, estendendo a relação na Equação (23) para os erros nas medidas,

$$\begin{pmatrix} \delta\lambda_1 \\ \delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\varepsilon \\ \delta T \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$(\delta\lambda_1 \quad \delta\lambda_2) = (\delta\varepsilon \quad \delta T) \begin{pmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{\varepsilon 2} \\ K_{T1} & K_{T2} \end{pmatrix}$$

Substituindo a Equação (23) na Equação (26), teremos -

$$\left(\frac{K_{T1}^2}{a^2} + \frac{K_{T2}^2}{b^2} \right) \delta T^2 + 2 \left(\frac{K_{\varepsilon 1} K_{T1}}{a^2} + \frac{K_{\varepsilon 2} K_{T2}}{b^2} \right) \delta\varepsilon \delta T + \left(\frac{K_{\varepsilon 1}^2}{a^2} + \frac{K_{\varepsilon 2}^2}{b^2} \right) \delta\varepsilon^2 = 1 \quad (28)$$

Figura 14 - Representação gráfica da incerteza no espaço dos comprimentos de Bragg

Esta equação corresponde a uma elipse cujos eixos, maior e menor, não são necessariamente paralelos aos eixos de deformação e temperatura. Dado que a incerteza nas medidas de deformação e temperatura é descrita por uma elipse, o máximo erro de cada uma delas ocorre quando as seguintes condições são satisfeitas -

$$\left. \frac{d(\delta\epsilon)}{d(\delta T)} \right|_{\delta\epsilon_{\text{máx}}} = 0 \quad (29)$$

$$\left. \frac{d(\delta T)}{d(\delta\epsilon)} \right|_{\delta T_{\text{máx}}} = 0 \quad (30)$$

Dessa forma, os erros máximos na medida de deformação e temperatura produzidos pela incerteza na determinação do comprimento de onda de Bragg do sensor são dados pelas seguintes expressões -

$$\delta\epsilon_{\text{máx}} = \pm \left[\left(\frac{K_{\epsilon 1}^2}{a^2} + \frac{K_{\epsilon 2}^2}{b^2} \right) - \frac{\left(\frac{K_{\epsilon 1} K_{T 1}}{a^2} + \frac{K_{\epsilon 2} K_{T 2}}{b^2} \right)^2}{\left(\frac{K_{T 1}^2}{a^2} + \frac{K_{T 2}^2}{b^2} \right)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$\delta T_{\text{máx}} = \pm \left[\left(\frac{K_{T 1}^2}{a^2} + \frac{K_{T 2}^2}{b^2} \right) - \frac{\left(\frac{K_{\epsilon 1} K_{T 1}}{a^2} + \frac{K_{\epsilon 2} K_{T 2}}{b^2} \right)^2}{\left(\frac{K_{\epsilon 1}^2}{a^2} + \frac{K_{\epsilon 2}^2}{b^2} \right)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (32)$$

3 Técnicas de fabricação

Redes de Bragg podem ser inscritas em fibras ópticas por dois tipos de processo - holográficos e não-interferométricos. O primeiro tipo se baseia na interferência de dois feixes de laser UV sobre a fibra óptica, gerando, desta forma, uma modificação periódica do seu índice de refração. O outro tipo corresponde à exposição periódica da fibra a fontes de luz pulsadas ou à utilização de máscaras que modulam periodicamente a amplitude da luz incidente. Existem diversas técnicas de fabricação de redes de Bragg, no entanto, nesta seção, serão discutidas apenas as consideradas mais importantes.

3.1 Máscara de fase

Esta é uma das técnicas mais eficientes de gravação de redes de Bragg em fibras ópticas. O sistema é composto apenas pelo laser UV, responsável pela alteração do índice de refração do núcleo da fibra, e pela máscara de fase, que modula espacialmente o feixe de laser. Esta máscara é um elemento óptico difrativo que pode ser produzida por dois métodos distintos, holograficamente ou por litografia de feixe de elétrons.³⁰ A produção por holografia é vantajosa com respeito à litografia pela sua isenção a erros de pontos, uma das desvantagens da litografia.³⁷ Por outro lado, padrões mais elaborados podem ser criados pelo uso da litografia.

A máscara de fase é fabricada sobre uma superfície plana, geralmente feita de sílica fundida de alta qualidade por ser um material transparente à radiação UV. O perfil da máscara é unidimensional e projetado para que a ordem zero do laser UV difratado apresente pouca potência (tipicamente, menos que 3% do laser de entrada) e que as ordens ± 1 sejam maximizadas.³⁰ Considerando incidência normal sobre a máscara de fase (Figura 16), o período do padrão de interferência sobre a fibra, Λ_g , gerado pelos feixes de ordens ± 1 difratados pela máscara é a metade do período da modulação espacial do elemento difrativo, Λ_{mf} .³

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (33)$$

Figura 15 - Esquema do sistema de gravação de redes de Bragg em fibra óptica pela técnica de máscara de fase

Segundo a Equação (5), temos que, para uma rede de Bragg produzida pela técnica de máscara de fase, o comprimento de onda de Bragg de ordem N resultante é expresso por

$$\lambda_{\text{Bragg}} = \frac{n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{mf}}}{N} \quad (34)$$

A vantagem de se inscrever redes de Bragg em fibras ópticas utilizando máscaras de fase é a simplicidade do processo. Como usualmente a fibra é colocada logo após a máscara de fase, o alinhamento se torna simples e o sistema, inerente a vibrações mecânicas, reduzindo os problemas relacionados à estabilidade.³⁰ A desvantagem é a necessidade da fabricação de uma nova máscara de fase a cada novo comprimento de onda de Bragg. Para suprimir essa desvantagem, foi elaborada uma nova maneira de se inscrever redes de Bragg em fibras ópticas utilizando máscara de fase, chamada técnica de máscara de fase interferométrica.

Neste caso, a máscara de fase é empregada em conjunto com um par de espelhos, de modo a possibilitar a sintonização do comprimento de onda de Bragg das redes gravadas. Como pode ser visto na Figura 16, o laser UV é difratado pela máscara de fase e sua ordem zero é bloqueada por um obstáculo no meio do sistema. Os feixes de ordens ± 1 são refletidos pelo par de espelhos, de modo a produzirem o padrão de interferência sobre a fibra óptica. Um dos espelhos possui a liberdade de ser rotacionado, o que altera o caminho óptico do feixe refletido por ele, possibilitando a sintonia do comprimento de onda de Bragg inscrito na fibra.

Figura 16 - Esquema do sistema de gravação de redes de Bragg em fibra óptica pela técnica de máscara de fase

Segundo a Ref. (3), para uma máscara de fase fabricada para a inscrição de comprimento de onda de Bragg em 1550 nm (ângulo de difração das ordens ± 1 de aproximadamente 10°), uma rotação de 5° de um dos espelhos implica uma mudança de aproximadamente 800 nm no comprimento de onda de Bragg.

3.2 Espelho de Lloyd

Esta técnica de produção de redes de Bragg, apesar de menos estável que a que utiliza máscara de fase, apresenta versatilidade quanto à escolha do comprimento de onda de Bragg da rede a ser gravada. Para a fabricação das FBGs, a fibra óptica é fixada, encostada perpendicularmente a um espelho, e incide-se um feixe de laser UV sobre o conjunto a um ângulo α em relação ao espelho, como mostra a Figura 17. Metade deste feixe incide diretamente na fibra e o restante é refletido pelo espelho. Por causa da diferença de caminhos ópticos entre as duas partes dos feixes, é gerado um padrão de interferência sobre a fibra óptica responsável pela inscrição da estrutura periódica correspondente à rede de Bragg.

O comprimento de onda de Bragg, λ_B , é sintonizado a partir do ângulo de incidência, α , pela expressão

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{LASER}}{\sin \alpha} \quad (35)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e λ_{LASER} é o comprimento de onda do laser incidente.

Figura 17 - Esquema da incidência de luz sobre a fibra óptica para a fabricação de redes de Bragg pela técnica de espelho de Lloyd

Esta técnica de gravação de redes de Bragg é vantajosa devido à facilidade de sintonizar o comprimento de onda de Bragg a ser inscrito, apenas variando o ângulo α . Contudo, como metade do feixe incidente é refletida no espelho para gerar o padrão de interferência, a extensão da fibra irradiada será de apenas metade da largura do feixe, gerando redes de Bragg de menores comprimentos. Além disso, efeitos de difração da borda do espelho podem causar deformação das franjas próximas a ela. Por fim, essa técnica de gravação requer que a fibra seja posta precisamente ortogonal ao plano do espelho, o que dificulta o processo de gravação.³

3.3 Ponto-a-ponto

A inscrição de redes de Bragg utilizando o método ponto-a-ponto é um dos não-interferométricos. Nesse processo, expõe-se a fibra óptica a pulsos de laser com alta potência e alta taxa de repetição, sendo que cada pulso produz uma pequena alteração no seu índice de refração devido a processos de absorção multifotônica. A fibra é transladada com velocidade constante ao longo do seu eixo e perpendicularmente ao plano de incidência do laser. Dessa forma, o período da FBG é sintonizado pela velocidade de translação da fibra, segundo a expressão -

$$\lambda_{Bragg} = \frac{2 n_{eff} v}{m f} \quad (36)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra, v é a velocidade de translação da fibra, m é a ordem de difração da rede e f é a frequência de repetição da laser. Um esquema da fabricação de redes de Bragg em fibras ópticas pela técnica de ponto-a-ponto é demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema da fabricação de redes de Bragg pela técnica de ponto-a-ponto

Há duas notáveis vantagens desta técnica de gravação em relação às outras - a primeira é a rapidez do processo, menos de 60 s por inscrição de uma rede;³⁸ e a outra é a possibilidade de inscrição de redes de Bragg na fibra sem a necessidade de desencapá-la, podendo manter a fibra na sua forma original de fabricação. No entanto, como o método exige muita precisão na translação da fibra, sua execução pode ser inviabilizada dependendo do equipamento disponível. Por este motivo, este procedimento é mais utilizado em gravações de LPGs, ocasião em que o processo pode ser executado com menos exatidão.³⁹

3.4 Fabricação de redes de Bragg especiais

Como já discutido no Capítulo 2, existem outros tipos de redes de Bragg além daquela considerada comum. Nesta seção introduzimos alguns métodos para a fabricação destas diferentes FBGs.

3.4.1 Redes de Bragg inclinadas

As redes de Bragg inclinadas podem ser facilmente fabricadas por meio de técnicas interferométricas. Neste caso, ao invés de manter a fibra ortogonal ao plano de propagação do modo do laser, ela é posta inclinada (Figura 19(a)). Isto requer que a área de interferência dos feixes seja grande para que boa parte da fibra seja iluminada. Esse pode ser um problema para a inscrição das redes já que a lente cilíndrica focaliza o feixe no plano da figura, a não ser que a intensidade do feixe fora do foco da lente seja alta.³ Uma solução para esse problema é inclinar a fibra no plano de propagação do laser, como na Figura 19.b. Neste caso, o determinante para a execução da técnica será a profundidade de interferência das franjas de interferência, D , expressa por³

$$D \leq \frac{W}{\tan \theta_m} \quad (37)$$

onde W é a largura do feixe de laser incidente e θ_m é o ângulo de difração da ordem m .

Figura 19 - (a) As franjas de interferência responsáveis pela inscrição da rede de Bragg são incididas inclinadas em relação ao eixo óptico da fibra óptica. (b) Método para inscrição de redes de Bragg inclinadas

3.4.2 Redes de Bragg chirpadas

Existem diferentes métodos para a produção de redes de Bragg com gorjeio. Um dos mais simples é dobrar a fibra de modo que o espaçamento das franjas de interferência projetadas sobre ela aumente continuamente, como mostra a Figura 20. Para melhor visualizar o processo, consideremos a fibra óptica encurvada com raio de curvatura R (Figura 21). Por geometria simples podemos obter que o período da rede de Bragg depende do arco S , medido da origem O ao ponto de interesse, do raio de curvatura da fibra e do espaçamento das franjas, Λ_g , conforme a expressão³

$$\Lambda_s = \frac{\Lambda_g}{\cos(S/R)} \quad (38)$$

Figura 20 - Método utilizado para gravação de redes de Bragg chirpada em fibra ópticas; a fibra é dobrada fazendo com que o espaçamento das franjas de interferência incidentes aumente continuamente

Figura 21 - Fibra óptica encurvada a um raio R no plano das franjas de interferência, fazendo com que o período da rede varie continuamente ao longo do comprimento S da fibra óptica

Outro método mais flexível e controlado para obtenção dessas redes é o interferômetro apresentado por Bennion et al.⁴⁰ Ele é composto por dois braços que possuem

uma lente cada, de focos f_1 e f_2 , sendo que os feixes refratados por essas lentes interferem entre si sobre a fibra (Figura 22). Para o cálculo da evolução do período da rede com z , adota-se como origem da coordenada z o ponto onde os eixos ópticos das respectivas lentes se cruzam sobre a fibra. O espaçamento das franjas $\Lambda(z)$ ao longo do eixo da fibra é dado por²

$$\Lambda(z) = \frac{\lambda_{UV}}{\frac{d_1 \cos(\theta_1) + z}{\sqrt{d_1^2 + 2d_1 z \cos(\theta_1) + z^2}} + \frac{d_2 \cos(\theta_2) - z}{\sqrt{d_2^2 + 2d_2 z \cos(\theta_2) + z^2}}} \quad (39)$$

onde d_1 e d_2 são as distâncias entre os pontos focais de cada lente e o ponto $z = 0$, θ_1 e θ_2 são os ângulos que os eixos ópticos das lentes 1 e 2, respectivamente, fazem com a fibra óptica.

Figura 22 - Sistema para gravação de redes de Bragg chirpada por interferência de feixes usando lentes cilíndricas em cada braço do interferômetro

4 Técnicas de interrogação

4.1 Optical Spectrum Analyser (OSA)

Analísadores de espectro óptico (OSAs, do inglês *Optical Spectrum Analyzers*) são conhecidos pela sua capacidade de seleção de frequência (ou comprimento de onda) na leitura do espectro de incidência e por identificarem picos de intensidade do sinal. Além disso, uma de suas principais funcionalidades é a medida da potência do sinal luminoso em função do comprimento de onda. Essas funcionalidades são muito importantes no âmbito das redes de Bragg como, por exemplo, em sua fabricação, em que é necessário identificar o comprimento de onda de Bragg gravado, quantidade de luz refletida pela rede e largura do espectro refletido.

A Figura 23(a) ilustra o conceito básico do funcionamento de um OSA baseado na dispersão da luz por um prisma. O sinal luminoso a ser analisado atravessa o prisma e é dispersado por ele, decompondo o espectro de acordo com seus diferentes comprimentos de onda. Então uma fenda de largura ajustável é utilizada para selecionar apenas a região de interesse do espectro, que, por sua vez, é focado sobre um fotodetector. Isso possibilita ao OSA a medida da potência do sinal luminoso versus o comprimento de onda. No entanto, o uso de prisma não é o mais comum, uma vez que são pouco eficientes, pois há grande perda de luz na reflexão em suas faces, além de necessitarem de um considerável espaço para a dispersão da luz. Por isso o uso de redes de difração se tornou muito mais comum para essa aplicação. Além de aumentar a eficiência de transmissão de luz ao longo do equipamento, o feixe difratado é refletido na direção contrária, melhorando a engenharia do equipamento.

Figura 23 - Princípio de funcionamento de um OSA

4.2 Laser de diodo sintonizável

Há alguns anos, trabalhos realizados com lasers sintonizáveis eram exclusividade de laboratórios que usavam espectroscopia para o estudo de átomos e moléculas. Principalmente pelo surgimento do laser de diodo extra-cavidade, (ECDL, do inglês *External-cavity diode*

laser), essa realidade tem se modificado, proporcionando a abrangência da aplicação desse equipamento em muitas outras áreas de estudos, em especial no sensoriamento remoto de grandezas físicas como deformação, temperatura e pressão.

Os primeiros ECDLs possuíam comprimento de onda central em 670 nm e eram capazes de sintonizar o comprimento de onda em uma janela de 12 nm, varrendo-a a uma velocidade de 6nm/s. Entretanto, ao longo dos anos esse dispositivo foi sendo aprimorado e, atualmente, pode ser sintonizado em comprimentos de onda na região entre 400 e 1620 nm, varrendo o espectro à velocidade de 100 nm/s.

Conforme mostra a Figura 24, em uma das faces de um *chip* de diodo laser é depositado um filme de alta refletividade, enquanto que a outra possui um filme antirreflexo de modo a torná-lo no meio ativo do ECDL. Uma lente é utilizada para colimar o feixe proveniente do diodo laser, de forma que esse feixe atinja uma rede de difração para seleção do comprimento de onda a ser emitido pelo ECDL. Um espelho ajustável é colocado numa posição em que o feixe difratado pela rede sofra retro reflexão e propague na direção de saída do equipamento. Desta forma, o espectro de saída do laser possui uma pequena largura de banda, dependente da resolução da rede de difração utilizada.

Figura 24 - Princípio de funcionamento de um laser de diodo sintonizável

A Figura 25 representa, em diagrama de blocos, um sensor de temperatura e deformação baseado em FBGs empregando um laser de diodo sintonizável como fonte de luz. O laser de

diodo sintonizável é ajustado para varrer a região do espectro de luz em que as redes de Bragg foram inscritas e monitora a variação do comprimento de onda ao longo do tempo.

Figura 25 - Diagrama de blocos representando um sensor de temperatura e deformação baseado em FBGs usando um laser sintonizável como fonte de luz

4.3 Fabry-Perot sintonizável

Uma das técnicas utilizadas para análise de variações do comprimento de onda de redes de Bragg é o filtro de Fabry-Perot sintonizável. Este método se divide em duas maneiras diferentes de interrogação - sistema operando em malha fechada, tendo por característica principal a de aplicação a uma única FBG; e o modo de varredura, o qual se aplica a mais de uma FBG simultaneamente.⁴¹

O primeiro modo, o de malha fechada, é apresentado esquematicamente na Figura 26(a). Uma fonte de luz banda larga incide sobre a FBG que reflete em seu comprimento de onda de Bragg. A luz refletida passa por um filtro de fibra de Fabry-Perot (FFP, do inglês *Fiber Fabry-Perot*) sintonizável, com largura de banda próxima à da FBG. Ao seu sistema, é introduzido um sinal de *dither* de frequência f_d , que faz com que o comprimento da cavidade ressonante se altere, modificando, consequentemente, a banda de passagem do FFP. Esse processo é realizado até que haja coincidência entre os espectros do FFP e da FBG, anulando a amplitude do sinal fundamental. Ocorrendo variações no comprimento de Bragg da rede em questão, o sistema altera o espectro do FFP para que siga a variação da FBG. Com isso, é gerado um sinal de erro que contém a informação sobre o deslocamento do comprimento de Bragg. Por seu funcionamento ser desta forma, sua aplicação é limitada a apenas uma única FBG, o que impossibilita sua implementação em

projetos mais elaborados onde se necessita do monitoramento de diversas redes de Bragg simultaneamente.⁴²

Figura 26 - (a) Sensor de deformação de uma única FBG com demodulador FFP. (b) Sensor de deformação de várias FBGs como demodulador FFP de escaneamento⁴¹

Entretanto, pode-se estender o uso desse método de interrogação utilizando o modo de varredura (Figura 26(b)). Para isso, substitui-se o sinal aplicado ao FFP, que passa a ter forma triangular com *dither*, sendo que o sinal de *dither* é senoidal e de baixa amplitude. A variação da deformação aplicada nessa forma triangular ao PZT que controla o comprimento da cavidade garante que a banda de passagem do FFP coincida com o espectro de reflexão de cada FBG, trabalhando o sistema da mesma forma que descrito anteriormente, mas agora para várias FBGs.

A vantagem do sistema é a rápida varredura do espectro, mesmo ao trabalhar com várias FBGs, além da sua alta resolução. As desvantagens são a necessidade de alta estabilidade térmica devida à sensibilidade do sistema, em adição ao seu alto custo.

4.4 Espectrômetro

Um dos equipamentos mais versáteis e de baixo custo para interrogação de sensores a redes de Bragg é o espectrômetro. Seu principal uso é em medidas de propriedades da luz em regiões específicas do espectro eletromagnético, cuja medida mais utilizada é a intensidade da luz incidente em função do comprimento de onda. O princípio de funcionamento desse equipamento é baseado na teoria de difração da luz. A fonte de luz a ser analisada incide sobre um componente óptico utilizado para a decomposição de seu espectro nos diferentes comprimentos de onda. Para essa função são utilizados elementos ópticos difrativos, como redes de difração e prismas. A Figura 27 representa, esquematicamente, o funcionamento de um espectrômetro reflexivo, cujo elemento difrativo é uma rede de difração.

Após ser guiado por uma fibra óptica, o feixe de luz a ser analisado atravessa uma fenda de largura reduzida. Em seguida, uma lente esférica é responsável por colimar o feixe de modo que ele atinja a maior área possível da rede de difração. Esta rede decompõe espectralmente o feixe, fazendo com que cada comprimento de onda seja refletido a um ângulo bem definido dependente do comprimento de onda. Da óptica geométrica, sabemos que feixes de luz de mesmo ângulo de incidência, quando refratados por uma lente esférica, são focalizados no mesmo ponto do espaço. Dessa forma, como os ângulos dos feixes difratados pela rede de difração são distintos para cada comprimento de onda, cada parte do espectro, ao ser refratada por uma segunda lente esférica, será focalizada num ponto específico do espaço.

Assim, calculando exatamente a posição de foco de para cada comprimento de onda, é possível caracterizar a intensidade de luz incidente em função do comprimento de onda monitorando cada um desses pontos.

Para isso, pequenos fotodetectores, conhecidos por CCDs (do inglês *Charge-Coupled Devices*), são espalhados em uma linha, de tal maneira a formarem um *array* de uma única dimensão. Cada uma dessas CCDs é responsável pela leitura de parte do espectro incidente, cuja largura de banda detectada é determinada pela resolução da rede, pela área fotodetectora

dos elementos e pela quantidade existente deles. Cada CCD converte o sinal luminoso, correspondente à potência de luz incidente em cada faixa comprimento de onda, em sinal de corrente elétrica que é transmitido a um computador, que o decodifica na forma de matriz, cujos elementos são chamados de *pixels*. Cada pixel é monitorado individualmente no tempo, o que torna possível a análise do espectro em tempo real.

Figura 27 - Princípio de funcionamento de um espectrômetro

Como já mencionado, no âmbito do sensoriamento de temperatura e deformação utilizando FBGs, espectrômetros sensíveis na região do infravermelho apresentam a vantagem de possuir um custo mais baixo que outros equipamentos para a mesma região do espectro. Além disso, suas dimensões reduzidas também possibilitam o desenvolvimento de equipamentos portáteis, muito úteis em diversas aplicações desse tipo de sensor. No entanto, dependendo de seu modelo e sua aplicação, a resolução do equipamento pode não ser suficiente, fazendo com seja necessário o uso de outros tipos de aparelhos. A Figura 28 exibe um exemplo de um sistema de interrogação utilizando um espectrômetro.

Figura 28 - Sensoriamento de temperatura e deformação através de uma FBG acoplada a uma fonte de luz ELED e um espectrômetro como interrogador

4.4.1 Método do centróide

Um problema enfrentado na utilização de espectrômetros do tipo descrito na seção 4.4 é que o espectro é medido de forma discreta. Para ilustrar melhor o problema, consideremos uma curva espectral de reflexão típica de uma rede de Bragg sendo medida por um espectrômetro, como mostra a Figura 29(a). A resposta lida pelo espectrômetro será da forma exibida na Figura 29(b). Nesse caso, pela varredura do espectro ser discreta, o pico da curva não coincidiu com nenhum dos detectores disponíveis, ficando indeterminado.

Figura 29 - (a) Curva típica de uma rede de Bragg sendo medida por um espectrômetro convencional. (b) Resposta do espectrômetro

Para solucionar esse problema, várias maneiras foram encontradas, como, por exemplo, traçar o polinômio que melhor se ajusta aos pontos experimentais e encontrar seu valor máximo. Outra solução é conhecida por método do centróide.⁴²⁻⁴³ O método consiste em aplicar uma média ponderada que contabiliza a intensidade medida pelos fotodetectores, $u(\lambda_i)$, e seus respectivos comprimentos de onda, λ_i , calculando o valor do comprimento de onda, λ_{max} , correspondente ao máximo de potência, expresso por

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_i \lambda_i u(\lambda_i)}{\sum_i u(\lambda_i)} \quad (40)$$

Este método, apesar de simples, se mostrou bastante preciso na determinação de picos de funções quando utilizado em simulações numéricas.⁴²

5 Materiais e métodos

5.1 Gravação de redes de Bragg

Como discutido no Capítulo 3, umas das mais simples e práticas técnicas de gravação de redes de Bragg se baseia no espelho de Lloyd. Este método de inscrição, além de apresentar a vantagem de fácil alinhamento do sistema óptico, a sintonização do comprimento de onda de Bragg a ser inscrito na fibra também é prática. Por essas vantagens, utilizou-se esse método de inscrição para a produção das redes de Bragg apresentadas neste trabalho.

5.1.1 Fibra óptica

Neste trabalho, foram utilizadas fibras ópticas monomodo de sílica dopada com germânio, fabricadas pela empresa FiberCore. Para aumentar a eficiência do processo de fabricação das redes de Bragg, assim como descrito na seção 2.3, aplicou-se a técnica de hidrogenação. As fibras foram mantidas sob pressão de 100 kgF/cm² de gás hidrogênio por cerca de duas semanas, para garantir a distribuição uniforme do gás em seu núcleo, como indicam estudos reportados na Ref. (3).

5.1.2 Sistema de gravação

O sistema de gravação, que pode ser visto na Figura 31 e com mais detalhes na Figura 32, é composto por um laser de Nd -YAG (1064 nm) com cristal intracavidade responsável pela geração do segundo harmônico dessa radiação, laser em 532 nm. Da mesma forma, para a geração de laser ultravioleta (UV), o laser 532 nm é focalizado por uma lente esférica de 15 cm de distância focal sobre um cristal não-linear β -BaB₂O₄ (BBO). Ao atravessar o cristal, por este apresentar propriedades não-lineares, luz ultravioleta (UV) de

comprimento de onda 266 nm é gerada com polarização perpendicular à da radiação fundamental. Apesar de este cristal apresentar boa eficiência na geração de segundo harmônico, a quantidade remanescente da luz fundamental ainda é considerável. É interessante que ainda haja um pouco de radiação em 532 nm, uma vez que auxilia e facilita o alinhamento do sistema para a inscrição das redes de Bragg.

O laser UV gerado, então, incide a um ângulo α sobre uma lente cilíndrica, cuja função é focalizar a luz sobre a fibra, para que o processo de gravação seja mais eficiente. Para a produção do padrão de interferência responsável pela modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, assim como discutido na seção 3.2, parte da luz deve incidir sobre a fibra óptica e parte sobre o espelho de Lloyd. A expressão que relaciona o comprimento de onda de Bragg da rede inscrita com o ângulo de incidência do laser, α , dado pela Equação (35), é, já substituídos os valores para cada constante -

$$\lambda_B(nm) = \frac{1,45 \cdot 266}{\text{sen}\alpha} \quad (41)$$

Figura 30 - Representação esquemática do sistema de gravação de redes de Bragg - técnica de inscrição baseada em espelho de Lloyd

Figura 31 - Sistema utilizado para a gravação das redes de Bragg em fibras ópticas

Figura 32 - Montagem experimental do sistema de gravação de redes de Bragg. a) Laser 532 nm da empresa COHERENT, lente focalizadora e cristal de geração de segundo harmônico (BBO); b) zoom do cristal de geração utilizado para geração de segundo harmônico; e c) sistema de alinhamento da fibra óptica com o laser UV

Estudos mostram que o pico de absorção da fibra óptica de sílica dopada com germânio é centrado em 244 nm, conforme mostra a Figura 33.⁴⁴⁻⁴⁵ Nesse comprimento de onda, o processo de gravação de redes de Bragg se torna muito eficiente, sendo as redes produzidas com alta refletância e em tempo reduzido de fabricação. No entanto, nas dependências do

laboratório de pesquisa em que foi desenvolvido este trabalho, não havia laser de emissão em 244 nm. Por isso, apesar de não estar no pico de absorção, utilizou-se laser de emissão em 266 nm para a fabricação das redes de Bragg.

Figura 33 - Espectro de absorvância da pré-forma utilizada para a fabricação das fibras ópticas. Curva sólida - pré-forma de sílica dopada com germânio. O pequeno pico ao redor de 270 nm é devido ao instrumento de medida e não se refere à amostra. Curva tracejada - pré-forma sem dopagem⁴⁴

O monitoramento do espectro de reflexão produzido pelas redes de Bragg inscritas na fibra óptica é feito pelo espectrômetro modelo HR4000 da empresa OceanOptics®. Luz proveniente de uma fonte de diodo super luminescente de emissão banda larga (800 - 880 nm) é acoplada a um divisor de feixes. A uma das extremidades opostas é conectada a fibra óptica com a rede de Bragg sob fabricação. Como se optou por monitorar o espectro de reflexão das FBGs, a luz refletida pelas redes retorna pela fibra óptica e é novamente acoplada ao divisor de feixes. Na extremidade oposta, é acoplado o espectrômetro responsável pela leitura do espectro de reflexão. Para o monitoramento visual do processo é utilizado o software *SpectraSuite* fornecido pelo fabricante do espectrômetro.

Para a produção do sensor de temperatura e deformação estudado neste trabalho, duas redes de Bragg de comprimentos de onda 810 e 860 nm foram inscritas superpostas numa

região de cerca de 1 mm de comprimento da fibra óptica. Isto porque, como o método de sensoriamento depende da resposta de ambas as redes, elas devem medir a mesma porção da amostra. A potência do laser incidente sobre a fibra foi de 12 mW e o tempo de gravação foi de 4 minutos para cada rede. Para a produção das redes de Bragg superpostas, primeiramente inscreveu-se a rede de comprimento de onda centrado em 810 nm. Após o tempo necessário para sua produção, o laser foi desligado. Reajustou-se o ângulo α de modo que a rede inscrita fosse centrada em 860 nm e o processo de gravação foi repetido. O espectro de reflexão das redes de Bragg pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Espectro de reflexão das redes de Bragg centradas respectivamente em 810 e 860 nm

As redes de Bragg exibidas na Figura 34 compõem o sensor de temperatura e deformação utilizado neste trabalho. As redes possuem 1 nm de largura à meia altura e suas refletâncias são de aproximadamente 60%. Neste tipo de sensor, a resposta é baseada na variação do comprimento de onda de cada uma das redes de Bragg. Por esse motivo, é importante que a largura de banda das FBGs seja estreita, o que possibilita a melhor detecção de variações nos parâmetros físicos medidos.

5.2 Interrogação

Na seção 3 foi discutido a respeito do monitoramento das redes de Bragg sob processo de gravação. Esse monitoramento é efetuado com a incidência de luz advinda de um diodo super luminescente de banda espectral na faixa de 800-880 nm. Parte do espectro, definida pelas redes de Bragg inscritas, é refletida e medida pelo espectrômetro HR4000 da OceanOptics[®]. Para a interrogação do sensor de temperatura e deformação, diferentemente do processo de gravação, os dados adquiridos pelo equipamento são interpretados pelo software desenvolvido em linguagem LabView pelo Grupo de Fotônica – IFSC/USP.

Figura 35 - Sistema de interrogação; a) fonte de alimentação; b) espectrômetro HR4000; c) divisor de feixes; d) diodo super luminescente; e e) conectores para interrogação simultânea de duas fibras ópticas

Na seção 2.7 foi discutido como a resposta do sensor de temperatura e deformação depende da variação do comprimento de onda de Bragg das redes centradas em 810 e 860 nm. Por isso, para que se obtenha uma resposta precisa, é necessário que a determinação dos picos das bandas refletidas pelas redes seja também precisa. Como discutido na seção 4.4.1, Vesnin e colaboradores⁴² mostraram em seus estudos que o método do centróide se apresenta como uma eficiente ferramenta matemática na determinação de picos, capaz de discriminar comprimento de onda com resolução de 0,8 pm, o que corresponde a deformações de 1,2 $\mu\text{m/m}$ e temperatura de 0,13 $^{\circ}\text{C}$.

5.3 Calibração do sistema para medidas de deformação e temperatura

Previamente foi discutido que a medida de temperatura e deformação utilizando o sensor proposto por este trabalho, que é baseado em redes de Bragg, depende da determinação de variações do comprimento de onda de Bragg das redes que o compõem. Não obstante, a determinação dessas variações deve ser precisa, de maneira a obter rápidas respostas de alterações nos parâmetros físicos. Além disso, para que seja possível distinguir entre variações de temperatura e deformação, é necessário que se utilize duas redes de Bragg, uma vez que a variação do comprimento de onda de uma rede de Bragg depende linearmente tanto de variações no índice de refração efetivo da fibra óptica, n_{eff} , quanto em seu período espacial, Λ , como discutido na seção 2.7.

Para que seja possível, então, distinguir entre variações de temperatura e deformação, deve-se conhecer o comportamento de cada uma das redes de Bragg que compõem o sensor em função de ambos os parâmetros físicos. Por causa disso, essas medidas foram realizadas separadamente para cada uma das FBGs, de modo a evitar erros em sua determinação. Além disso, durante as medidas do comportamento quanto a variações de temperatura, a fibra óptica foi mantida relaxada, para que deformações imprevistas não influenciassem na medida. Pelo mesmo raciocínio, para as medidas da variação do comprimento de onda das FBGs em função de deformações, a fibra óptica foi mantida à temperatura constante. Esses cuidados foram tomados para não haver confusão dos valores medidos, uma vez que esta é uma etapa de calibração do sistema.

Na seção 2.7 foi discutida toda a teoria para o funcionamento do sensor de temperatura e deformação. Para que seja possível a aplicação do sensor a redes de Bragg em

monitoramento de temperatura e deformação, deve-se realizar sua calibração. Este procedimento resulta na determinação dos coeficientes que transformam medidas de variações dos comprimentos de onda de Bragg das redes em medidas de temperatura e deformação. Para calibrar o sistema, primeiramente a fibra óptica contendo as redes de Bragg foi fixada esticada entre dois grampos separados por 30 cm. A aplicação da deformação foi realizada utilizando-se um estágio de translação, como mostra a Figura 36. Para uma medida precisa da translação do estágio, utilizou-se um medidor de posição digital com precisão de 10 μm . Sabendo o comprimento da fibra entre os dois pontos fixos, 27 cm, e transladando o estágio em 10 μm , permitiram-se deformações em passos de 30 $\mu\text{-strain}$ na fibra. Pelo software desenvolvido, então, obtém-se a curva de calibração dos coeficientes K_ϵ de ambas as FBGs, simultaneamente. Durante a aquisição de dados, a fibra foi mantida a uma temperatura constante de 21,6 °C controlada por um Peltier e monitorada por um termopar.

Figura 36 - Esquemático do sistema para determinação dos coeficientes $K_{\epsilon 1}$ e $K_{\epsilon 2}$

Figura 37 - Esquemático do sistema para determinação dos coeficientes $K_{T 1}$ e $K_{T 2}$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, para medidas do comportamento do sensor em função da temperatura, a fibra óptica foi mantida relaxada durante todo o processo, ou seja, sem aplicação de deformação. Para a calibração dos coeficientes relacionados à variação dos comprimentos de onda de Bragg das redes do sensor, utilizou-se um forno, ao invés de um Peltier. Dessa forma, garantiu-se que toda a região da fibra óptica contendo o sensor e seus arredores estivessem submetidos à mesma temperatura. O monitoramento da temperatura dentro do forno foi realizado com um termopar de precisão de 2 °C. Com a fibra dentro do forno, ele foi programado para que se aquecesse desde a temperatura de 50 °C até 100 °C, à velocidade de 1 °C por minuto. A Figura 37 apresenta um diagrama esquemático do sistema para a calibração dos coeficientes K_{T1} e K_{T2} . Pelo software desenvolvido, obtém-se a curva de calibração dos coeficientes K_T de ambas as FBGs, simultaneamente.

6 Resultados

Este trabalho se baseia no método proposto por Xu e colaboradores¹⁶ para medir simultaneamente variações de temperatura e pressão utilizando redes de Bragg em fibras ópticas como sensores, como mencionado anteriormente. Para isso, duas redes de Bragg foram inscritas superpostas uma à outra, em comprimentos de onda de 810 e 860 nm. Como as duas FBGs possuem comprimentos de onda próximos, 50 nm de separação, foi possível utilizar apenas um diodo super luminescente de emissão na faixa de 800-880 nm, ao invés de duas fontes luminosas centradas em comprimentos de onda diferentes. Para a interrogação do sistema, empregou-se um espectrômetro portátil de alta resolução nessa região do espectro luminoso (*Ocean Optics* – HR4000). Como mencionado nas seções anteriores, sendo o sistema configurado desta maneira, eliminou-se a necessidade de utilização de OSA, como proposto por Xu¹⁶, para o monitoramento de cada uma das redes de Bragg.

6.1 Determinação dos coeficientes da matriz K

O funcionamento do sensor de temperatura e deformação depende da correta determinação dos coeficientes da matriz K , que relaciona variações dos comprimentos de onda das redes de Bragg, centradas em 810 e 860 nm, com variações de temperatura e deformação. Como descrito na seção 5.3, para a determinação desses coeficientes relacionados à deformação da fibra óptica, K_{e1} e K_{e2} , a região que contém as redes de Bragg, denominada como sensor, foi mantida sob temperatura constante de 21,6 °C durante todo o processo de medida. Para maior eficácia da calibração, o sensor foi submetido a deformações de módulo entre 0 e 700 $\mu\epsilon$, que compreendem quase todo o intervalo de elasticidade da fibra óptica. Segundo as Equações (21) e (22), a relação entre deformação e o comprimento de onda central de cada FBG é linear, sendo que o coeficiente angular dessa relação representa o coeficiente K_e . A Figura 38 apresenta as curvas de calibração que relacionam o comprimento de onda de Bragg lido na FBG, em nanômetros, com a deformação aplicada na fibra óptica, em μ -strain.

Figura 38 - Comportamento do comprimento de onda induzido nos comprimentos de onda das redes de Bragg pela variação da deformação da fibra óptica à temperatura constante de 21,6 °C

Para a determinação dos coeficientes da matriz K relacionados à variação de temperatura, K_{T1} e K_{T2} , a fibra óptica foi submetida a temperaturas entre 50 e 100 °C. Durante a medida, a fibra óptica foi mantida relaxada, ou seja, sem nenhuma deformação aplicada sobre ela, evitando qualquer influência advinda de deformações na fibra sobre o resultado. Segundo as Equações (21) e (22), a relação entre temperatura e o comprimento de onda central de cada FBG também é linear, assim como para deformações na fibra óptica. O coeficiente angular da reta que rege essa relação representa o coeficiente K_T . A curva de calibração entre temperatura e o comprimento de onda de Bragg de cada FBG é exibida na Figura 39.

Figura 39 - Comportamento do comprimento de onda induzida nos comprimentos de onda das redes de Bragg pela variação de temperatura na fibra óptica

Pela regressão linear das retas determinada pelos dados experimentais apresentados na Figura 38 e na Figura 39, obtiveram-se, respectivamente, os coeficientes referente à deformação ($K_{\epsilon 1}$ e $K_{\epsilon 2}$) e os referentes à temperatura (K_{T1} e K_{T2}) -

$$K_{\epsilon 1} = 0.527 \pm 0.007 \text{ pm}/\mu\text{-strain}$$

$$K_{\epsilon 2} = 0.558 \pm 0.007 \text{ pm}/\mu\text{-strain}$$

$$K_{T1} = 5.08 \pm 0.02 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$$

$$K_{T2} = 5.39 \pm 0.02 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$$

onde 1 e 2 se referem aos comprimentos de onda 810 e 860 nm, respectivamente.

Estes resultados comparam-se favoravelmente com os obtidos por Xu¹⁶ quando comparados com a rede de Bragg de comprimento de onda em 850 nm.

$$K_{\epsilon} = 0.590 \pm 0.003 \text{ pm}/\mu\text{-strain} \quad K_T = 6.30 \pm 0.04 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$$

Vale ressaltar que, como pode ser visto a partir das equações apresentadas na seção 2.7, a diferença observada entre esses coeficientes pode ser explicada pelo uso de diferentes fibras ópticas em ambos os trabalhos, uma vez que os coeficientes p_{11} , p_{12} , ν , n , α e ζ não são, necessariamente, os mesmos em cada ocasião.

Para que seja possível a distinção entre respostas por variações de temperatura ou de deformação, a matriz K apresentada na Equação (23) deve ser bem-comportada, isto é, seu determinante não deve ser nulo. Para isso, a seguinte condição deve ser respeitada -

$$\frac{K_{\varepsilon 2}}{K_{\varepsilon 1}} \neq \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \quad (42)$$

Aplicando os resultados obtidos a essa condição e fazendo as devidas propagações de erros, temos que -

$$\frac{K_{\varepsilon 2}}{K_{\varepsilon 1}} = 1,00 \pm 0,02$$

$$\frac{K_{T2}}{K_{T1}} = 1,061 \pm 0,008$$

Portanto, a matriz K obtida é bem-comportada e, apesar de pequena a diferença encontrada entre os valores de seus elementos, é possível distinguir entre repostas do sensor devidas a variações de temperatura ou de deformação. Atentando a isso, vemos que é factível o sensoriamento dos dois parâmetros físicos, temperatura e deformação, simultaneamente. E mais, a interrogação do sensor pode ser efetuada pelo uso de equipamentos de custo muito mais baixo que os apresentados pelos autores anteriores.

6.2 Análise de erros na determinação de variações de temperatura e deformação

Tendo determinado os coeficientes da matriz K que caracterizam o sistema, devemos analisar os erros nas medidas de deformação e temperatura advindos dos erros propagados pela determinação dos comprimentos de onda de ambas as redes de Bragg que compõem o sensor. Para quantificar a incerteza nessa determinação, devemos garantir que o comprimento de onda de referência se mantém constante ao longo de toda a medida, para que erros devidos

a variações de temperatura e pressão não interfiram no resultado. Para isso, utilizamos uma lâmpada de Neon de calibração cujo espectro de emissão pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 - Espectro de emissão de uma lâmpada de Neon de calibração

Para uma média de 50 medidas dos comprimentos de onda na região do espectro de interesse (800-880 nm), o desvio padrão obtido foi de 0.017 pm. Aplicando esse resultado e os valores dos coeficientes da matriz K , obtidos no item anterior, nas equações (31) e (32) do capítulo 3, temos que os respectivos erros na determinação da deformação aplicada sobre o sensor e da temperatura a que ele está submetido são -

$$\delta\epsilon_{m\acute{a}x} = \pm 21 \mu\text{-strain} \qquad \delta T_{m\acute{a}x} = \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Este resultado é comparável ao obtido por Brady e colaboradores¹⁰ cujo sistema apresentou erros na medida de deformação de $\pm 17.4 \mu\text{-strain}$ e de temperatura de $\pm 1.72 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Além disso, em seu trabalho Brady também obtém que, segundo sua análise, pelos coeficientes da matriz K obtidos por Xu¹⁶, esses erros são, respectivamente, $\pm 12 \mu\text{-strain}$ e $\pm 1.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

7 Conclusões

O uso de sensores baseados em redes de Bragg tem sido extremamente limitado devido à falta de precisão na distinção entre variações de temperatura e deformação, quando empregados como sensores deste tipo. Apesar de terem surgido técnicas capazes de solucionar esse problema, seu alto custo também tem sido um limitante para a disseminação da técnica. Para solucionar esse problema, isto é, produzir um sensor capaz de distinguir variações de temperatura e deformação e ao mesmo tempo ser de custo reduzido, este trabalho propôs um sensor com duas redes de Bragg inscritas superpostas e com comprimentos de onda separados por 50 nm (810 e 860 nm).

Enquanto outras técnicas exigiam o emprego de dois equipamentos para iluminação, já que operavam em duas regiões distintas do espectro óptico, esta abordagem possibilitou o uso de apenas uma fonte de luz banda larga, de forma a baratear o sistema. Além disso, a interrogação do sistema foi realizada utilizando-se um espectrômetro que, para a região do infravermelho (800-880 nm), também apresenta menor custo quando comparado a interrogadores em outras regiões do espectro. Como os equipamentos de iluminação e interrogação utilizados possuem dimensões reduzidas, o sistema se torna também portátil, possibilitando o uso desse sensor em diversas aplicações.

Embora os comprimentos de onda das redes de Bragg utilizados nesse sistema fossem bem próximos, foi possível discriminar os coeficientes da matriz K que determinam a dependência do comprimento de onda de cada FBG com variações de temperatura e deformação. Considerando as diferenças físicas das fibras ópticas utilizadas nesse trabalho em relação às utilizadas por outros autores, os valores desses coeficientes foram comparáveis aos resultados previamente apresentados por eles. Da mesma forma, os valores dos erros na medida dessas variações de temperatura e de deformações, ± 2 °C e ± 21 μ -strain, respectivamente, também foram compatíveis aos obtidos por outros autores, o que permitiu à técnica apresentada a medida simultânea de variações de temperatura e deformação na fibra óptica.

Portanto, pelo método apresentado, o custo da utilização de redes de Bragg como sensores de variações de temperatura e deformação foi consideravelmente reduzido, criando um ambiente propício para sua disseminação nas mais diversas aplicações.

Para trabalhos futuros, propõe-se o uso de redes de Bragg como sensores de índices de refração de fluidos. Estudos realizados por Falate⁴⁶ revelam a possibilidade do uso de LPGs para este fim. O método empregado por ela utiliza redes produzidas com períodos entre 570 e 650 μm , de forma a operarem na terceira janela de transmissão de 1,55 μm , obtendo uma resolução média de $0,0139 \text{ (nm)}^{-1}$, para índices de refração do meio externo variando entre 1,333 e 1,430.

Estudos recentes apresentam a utilização de redes de Bragg inclinadas como alternativa para a determinação de índices de refração. Neste âmbito de pesquisa, Miao e colaboradores⁴⁷ utilizam redes de Bragg inclinadas a um ângulo de 8° em relação ao eixo óptico da fibra. Segundo os autores, a diferença entre as ressonâncias dos modos de propagação do núcleo e dos modos de propagação da casca da fibra é utilizada para a detecção de variações no índice de refração do meio que envolve a fibra óptica. Nestes estudos obteve-se que a sensibilidade e a precisão são acrescidas quando os índices de refração variam entre 1,333 e 1,4532.

REFERÊNCIAS

- 1 HILL, K. O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides - application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, p. 647-649, 1978.
- 2 OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg gratings** – fundamentals and applications in telecommunications and sensing. London: Artech House, 1999.
- 3 KASHYAP, R. **Fiber Bragg gratings**. San Diego, USA: Academic Press, 1999.
- 4 KAWASAKI, B. S. et al. Narrow-band bragg reflectors in optical fibers. **Optics Letters**, v. 3, n. 2, p. 66-68, 1978.
- 5 KERSEY, A. D. et al. Fiber grating sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1442-1463, Aug.1997.
- 6 FERRARO, P.; DE NATALE, G. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 37, n. 2-3, p. 115-130, Feb-Mar. 2002.
- 7 RAO, Y. J. In-fibre Bragg grating sensors. **Measurement Science & Technology**, v. 8, n. 4, p. 355-375, Apr.1997.
- 8 BHATIA, V.; VENGSAKAR, A. M. Optical fiber long-period grating sensors. **Optics Letters**, v. 21, n. 9, p. 692-694, May 1996.
- 9 ALAVIE, A. T. et al. A Multiplexed bragg grating fiber laser sensor system. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 5, n. 9, p. 1112-1114, Sept. 1993.
- 10 BRADY, G. P. et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using the first- and second-order diffraction wavelengths of Bragg gratings. **IEE Proceedings-Optoelectronics**, v. 144, n. 3, p. 156-161, June 1997.
- 11 DAVIS, M. A.; KERSEY, A. D. Simultaneous measurement of temperature and strain using fibre Bragg gratings and Brillouin scattering. **IEE Proceedings-Optoelectronics**, v. 144, n. 3, p. 151-155, June 1997.

- 12 ECKE, W.; CHERTORIISKI, A. A.; VESNIN, V. L. A high-speed system for strain and temperature measurements based on fiber Bragg sensors. **Instruments and Experimental Techniques**, v. 50, n. 4, p. 565-571, 2007.
- 13 JAMES, S. W.; DOCKNEY, M. L.; TATAM, R. P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors. **Electronics Letters**, v. 32, n. 12, p. 1133-1134, June 1996.
- 14 JUNG, J.; PARK, N.; LEE, B. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium - ytterbium-doped fiber. **Applied Optics**, v. 39, n. 7, p. 1118-1120, Mar. 2000.
- 15 KANELLOPOULOS, S. E.; HANDEREK, V. A.; ROGERS, A. J. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings. **Optics Letters**, v. 20, n. 3, p. 333-335, 1995.
- 16 XU, M. et al. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors. **Electronics Letters**, v. 30, n. 13, p. 1085-1087, June 1994.
- 17 ZHAO, Y.; LIAO, Y. B. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 41, n. 1, p. 1-18, Jan. 2004.
- 18 XU, M. G. et al. Thermally-compensated bending gauge using surface-mounted fiber gratings. **International Journal of Optoelectronics**, v. 9, n. 3, p. 281-283, May-June 1994.
- 19 REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982.
- 20 ATKINS, R. M. et al. Mechanisms of enhanced uv photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses. **Electronics Letters**, v. 29, n. 14, p. 1234-1235, July 1993.
- 21 DOUAY, M. et al. Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1329-1342, Aug. 1997.
- 22 BRAMBILLA, G.; PRUNERI, V. Enhanced photosensitivity in silicate optical fibers by thermal treatment. **Applied Physics Letters**, v. 90, n. 11, p.111905, Mar. 2007. DOI - 10.1063/1.2714096

- 23 SALIK, E.; STARODUBOV, D. S.; FEINBERG, J. Increase of photosensitivity in Ge-doped fibers under strain. **Optics Letters**, v. 25, n. 16, p. 1147-1149, Aug. 2000.
- 24 NOGUEIRA, R. N. **Redes de Bragg em fibra óptica**. 2005. 343p. (Mestrado em Física) - Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2005.
- 25 LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. Characterization of single-mode optical fiber filters. **Applied Optics**, v. 20, n. 3, p. 440-445, 1981.
- 26 STONE, J. Photorefractivity in geo2-doped silica fibers. **Journal of Applied Physics**, v. 62, n. 11, p. 4371-4374, Dec. 1987.
- 27 MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, n.15, p. 823-825, Aug. 1989.
- 28 HAND, D. P.; RUSSEL, P. S. J. Single-mode fibre grating written into Sagnac loop using photosensitive fibre - transmission filters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF INTEGRATED OPTICS & OPTICAL FIBER COMMUNICATION, IOOC,7,1989. Kobe, Japan. **Proceedings...**Kobe,Japan -1989.p.21C3-21C4.
- 29 LEMAIRE, P. J. et al. High-pressure h-2 loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensitivity in geo2 doped optical fibers. **Electronics Letters**, v. 29, n. 13, p. 1191-1193, June 1993.
- 30 OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. **Review of Scientific Instruments**, v.68, n.12,p. 4309-4341, Dec. 1997.
- 31 ARCHAMBAULT, J. L.; REEKIE, L.; RUSSELL, P. S. High reflectivity and narrow bandwidth fiber gratings written by single excimer pulse. **Electronics Letters**, v. 29, n. 1, p. 28-29, Jan. 1993.
- 32 VENGSARKAR, A. M. et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. **Journal of Lightwave Technology**, v. 14, n. 1, p. 58-65, Jan. 1996.
- 33 VENGSARKAR, A. M. et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. **Optics Letters**, v. 21, n. 5, p. 336-338, Mar. 1996.

- 34 PATRICK, H. J. et al. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 8, n. 9, p. 1223-1225, Sept. 1996.
- 35 TANG, J. L.; WANG, J. N. Error analysis and measurement uncertainty for a fiber grating strain-temperature sensor. **Sensors**, v. 10, n. 7, p. 6582-6593, 2010.
- 36 MELTZ, G.; MOREY, W. W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. In: **Proceedings of SPIE**, v.1516, p.185-412, Dec.1991.
- 37 ALBERT, J. et al. Minimization of phase errors in long fiber Bragg grating phase masks made using electron beam lithography. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 8, n. 10, p. 1334-1336, 1996.
- 38 MARTINEZ, A. et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser. **Electronics Letters**, v. 40, n. 19, p. 1170-1172, Sept. 2004.
- 39 DAVIS, D. D. et al. Long-period fibre grating fabrication with focused CO2 laser pulses. **Electronics Letters**, v. 34, n. 3, p. 302-303, Feb. 1998.
- 40 BENNION, I. et al. UV-written in-fibre Bragg gratings. **Optical and Quantum Electronics**, v. 28, n. 2, p. 93-135, Feb. 1996.
- 41 KERSEY, A. D.; BERKOFF, T. A.; MOREY, W. W. Multiplexed fiber bragg grating strain-sensor system with a fiber fabry-perot wavelength filter. **Optics Letters**, v. 18, n. 16, p. 1370-1372, Aug. 1993.
- 42 OLIVEIRA, V. D. **Leitura de redes de Bragg por modulação óptica**.2005. 66p. (Mestrado em Ciências) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, CEFET, Curitiba, 2005.
- 43 VESNIN, V. L.; CHERTORIISKII, A. A.; ECKE, W. Monitoring and measuring systems based on fiber-optic Bragg sensors. **Journal of Communications Technology and Electronics**, v. 50, n. 6, p. 687-693, June 2005.
- 44 ALBERT, J. et al. Bragg gratings in defect-free germanium-doped optical fibers. **Optics Letters**, v. 24, n. 18, p. 1266-1268, Sept. 1999.

45 ANEDDA, A. et al. Absorption spectrum of Ge-doped silica samples and fiber preforms in the vacuum ultraviolet region. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 280, n. 1-3, p. 281-286, Feb. 2001.

46 FALATE, R. **Produção e caracterização de redes de período longo para aplicações em sensoriamento**. 2002. 97p. (Mestrado em Ciências) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET, Curitiba, 2002.

47 MIAO, Y. P. et al. Temperature-insensitive refractive index sensor based on tilted fiber bragg grating. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 51, n. 2, p. 479-483, Feb. 2009.