



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA**

GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI**

FABIANO KULLER

**INTEGRAÇÃO E APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE
PRODUÇÃO DE DISPOSITIVOS FOTORREFRATIVOS
DA UTFPR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

AGOSTO - 2008

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

DISSERTAÇÃO

apresentada a UTFPR
para obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

por

FABIANO KULLER

INTEGRAÇÃO E APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE DISPOSITIVOS FOTORREFRATIVOS DA UTFPR

Banca Examinadora:

Orientadora:

PROF^a. DR. MARCIA MULLER UTFPR

Examinadores:

PROF^a. DR. ROSANE FALATE UEPG

PROF. DR. JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA UTFPR

PROF. DR. ALEXANDRE DE ALMEIDA PRADO POHL UTFPR

CURITIBA, 19 de Setembro de 2008

FABIANO KULLER

**INTEGRAÇÃO E APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO
DE DISPOSITIVOS FOTORREFRATIVOS DA UTFPR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” - Área de concentração: Informática Industrial.

Orientadora: Prof^a. Dr. Marcia Muller

Co-orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Curitiba

2008

*Aos meus pais,
Francisco(in memorian) e Ivone,
aos meus irmãos
Luciane e Rodrigo
e com amor a minha esposa
Silvia.*

Agradecimentos

À Deus por estar sempre presente em minha vida, e tornar tudo possível.

A minha orientadora professora Marcia Muller e ao meu co-orientador professor José Luís Fabris, sou muito grato pela paciência, orientação e conhecimentos adquiridos com suas experiências.

Aos Professores Alexandre de Almeida Prado Pohl e Hypolito José Kalinowski pelo conhecimento adquirido com suas experiências, pela paciência, ajuda, incentivo e colaboração para a realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, pelas críticas e sugestões.

A minha família pelo apoio durante esta jornada.

À Capes pela concessão de bolsa e CNPq, Fundação Araucária e Projeto GIGA pelo suporte financeiro aos laboratórios.

Sumário

Sumário	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvii
1 Introdução	23
1.1 Considerações Iniciais	23
1.2 Estado da Arte	24
1.3 Justificativas e Objetivos	26
1.4 Estrutura da Dissertação	26
2 Fundamentação Teórica	29
2.1 Fotossensibilidade em fibras ópticas	29
2.2 Cálculo da concentração de hidrogênio na fibra	32
2.3 Redes de Bragg em fibras ópticas	34
2.3.1 Tipos de Redes de Bragg	36
2.4 Redes de Período Longo	39
2.5 Rede de Bragg Atuando como Sensor	40

2.6	Produção de Redes de Bragg	42
2.6.1	Gravação por Máscara de Fase	42
2.6.2	Interferômetro por divisão de amplitude	45
2.6.3	Interferômetro com máscara de fase	46
2.7	Produção de redes de Período Longo	48
2.7.1	Gravação Ponto-a-Ponto	48
2.7.2	Gravação Ponto-a-Ponto com Máscara de Amplitude	48
2.7.3	Gravação com Arco Elétrico	49
2.7.4	Gravação com Laser de CO ₂	50
2.8	Apodização	51
3	Metodologia	53
3.1	Hidrogenação de Fibras Ópticas	53
3.2	Interferômetro com 3 Graus de Liberdade	55
3.3	Interferômetro com 4 Graus de Liberdade	56
3.4	Automatização do Sistema de Gravação	57
3.5	Implementação de Perfis de Velocidade	61
3.6	Gravação de Redes de Bragg com máscara de fase	62
3.7	Gravação de Redes de Período Longo	63
4	Resultados e Discussões	65
4.1	FBG em Fibras SMF	65
4.2	FBG com Apodização	69
4.3	FBG em Fibra Fotossensível	72
4.4	FBG em Fibra HiBi	73
4.5	FBG em Fibra com Alta Dopagem de Germânio	74
4.6	FBG com Diferentes Comprimentos	75
4.7	LPG em Fibra Fotossensível	77

5 Conclusões e Trabalhos Futuros	79
5.1 Conclusões	79
5.2 Trabalhos Futuros	81
Trabalhos Publicados	83
A Diagramas do Sistema de Controle	87
Apêndice	86
B Diagramas do Sistema de Leitura de Redes de Bragg	91
C Perfis de Velocidade	95
Referências Bibliográficas	97

Lista de Figuras

2.1	Fenômeno da fotossensibilidade em um material exposto a uma luz com distribuição espacial senoidal.	30
2.2	A reação do hidrogênio na ligação Si-O-Ge conduz à formação de centros GODC e Ge-OH.	32
2.3	Concentração normalizada de hidrogênio gasoso difundido na fibra em função da posição radial da fibra. As curvas representam a concentração em função do tempo de difusão em dias para temperatura de $21^{\circ}C$	33
2.4	Esquema da modulação local do índice de refração do núcleo da fibra óptica que constitui a rede de Bragg.	35
2.5	Esquema do princípio de operação de uma rede de Bragg em fibra óptica. Uma faixa estreita do espectro, centrada no comprimento de onda de Bragg λ_B é refletida, e o restante é transmitido.	35
2.6	Acoplamento entre os modos propagante e co-propagante por uma rede de período longo com período e índice de modulação constante.	40
2.7	Esquema do deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida a tração e compressão.	41
2.8	Representação esquemática da difração das ordens -1 e +1 na máscara de fase.	43
2.9	Representação esquemática da difração das ordens -1 e 0 na máscara de fase.	43

2.10	Esquema de um interferômetro por divisão de amplitude para a gravação de redes de Bragg.	45
2.11	Esquema de gravação de redes de Bragg baseado no método interferométrico com máscara de fase.	47
2.12	Técnica de escrita ponto-a-ponto.	48
2.13	Montagem experimental que alterna os processos de escrita ponto-a-ponto e com máscara de amplitude.	49
2.14	Esquema da técnica de escrita ponto-a-ponto por arco elétrico.	50
2.15	Escrita de LPG ponto-a-ponto com laser de CO_2	50
3.1	Sistema de Hidrogenação	54
3.2	Sistema de gravação de redes de Bragg	55
3.3	Representação dos ângulos envolvidos no percurso óptico do interferômetro. d_e :distância entre os espelhos; d_f : distância entre a fibra e os espelhos, ao longo do eixo X; d_{mf} : distância entre a máscara e os espelhos, ao longo do eixo X.	58
3.4	Sistema de controle do interferômetro para gravação de redes de Bragg.	60
3.5	Sistema de monitoração para gravação de redes de Bragg.	61
3.6	Sistema de gravação de redes de Bragg direto com máscara de fase.	62
3.7	Sistema de gravação de redes de período longo (LPG).	63
4.1	Crescimento da rede.	67
4.2	Largura de banda da rede.	67
4.3	Rede de Bragg gravada utilizando o sistema de controle implementado, com largura de banda de 0,29 nm e comprimento de onda de pico em 1547,59 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).	68
4.4	Rede de Bragg gravada utilizando sistema de controle anterior a este trabalho. Largura de banda de 0,42 nm e comprimento de onda de pico em 1529,75 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).	68

4.5	Rede de Bragg, gravada com deslocamento linear do feixe laser. Largura de banda de 0,15 nm e comprimento de onda em pico de 1536,31 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).	69
4.6	Rede de Bragg, gravada com deslocamento gaussiano do feixe laser. Largura de banda de 0,16 nm e comprimento de onda de pico em 1536,27 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).	70
4.7	Rede de Bragg, gravada com deslocamento trapezoidal do feixe laser. Largura de banda de 0,16 nm e comprimento de onda de pico em 1536,3 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).	70
4.8	Crescimento de uma rede de Bragg gravada em fibra fotossensível. . .	71
4.9	Largura de banda de uma rede de Bragg gravada em fibra fotossensível.	71
4.10	Rede gravada em fibra HiBi com feixe fixo	73
4.11	Rede gravada em fibra HiBi com deslocamento do feixe	74
4.12	Espectro de uma rede escrita em fibra com alta dopagem de germânio (medida com resolução do OSA de 0,07 nm).	75
4.13	Redes de Bragg gravadas com iluminação direta da máscara de fase. .	76
4.14	Espectro da razão entre o sinal transmitido pela LPG, durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte óptica LED. LPG com 1,83cm de comprimento, 45 pontos e período de 407 μ m (com resolução do OSA se 0,07 nm).	77
A.1	Sistema de controle fornecido pelo fabricante do ESP-6000, em NI Labview 7.1©.	87
A.2	Equações desenvolvidas na seção 3.4, implementadas em NI Labview 7.1©.	88
A.3	Diagrama do sistema de controle implementado em NI Labview 7.1©. .	89
B.1	Diagrama do sistema de leitura de redes de Bragg.	92
B.2	Digrama dos pacotes utilizado no sistema de leitura implementado em NI Labview 7.1©.	93

C.1	Interface do sistema de controle com perfil gaussiano.	95
C.2	Interface do sistema de controle com perfil trapezoidal.	95

Lista de Tabelas

- 4.1 Tabela com resultados de gravações em fibras SMF, com λ_B informado ao software de controle, λ_B obtido na gravação, diferença entre eles $\Delta\lambda_B$, refletividade, largura de banda $\Delta\lambda$ e tempo de gravação. 66
- 4.2 Tabela com resultados de gravações em fibras fotossensíveis, com λ_B informado ao software de controle, λ_B obtido na gravação, diferença entre eles $\Delta\lambda_B$, refletividade, largura de banda $\Delta\lambda$ e tempo de gravação. 73

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>FBG</i>	-	Fiber Bragg Grating
<i>LASER</i>	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<i>LED</i>	-	Light Emitting Diode
<i>LPG</i>	-	Long Period Grating
<i>OSA</i>	-	Optical Spectrum Analyzer
<i>CWDM</i>	-	Coarse Wavelength Division Multiplexing
<i>WDM</i>	-	Wavelength Division Multiplexing
<i>CCD</i>	-	Charge-Coupled Device
<i>TFBG</i>	-	Tilted Fiber Bragg Grating
<i>UV</i>	-	Ultraviolet

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema experimental versátil empregado na produção de redes de Bragg e redes de período longo em fibras ópticas. O sistema emprega um laser de Nd:YAG operando em 266 nm como fonte de luz e permite a produção de redes de Bragg por meio de duas diferentes técnicas de irradiação. As redes de Bragg são obtidas tanto pela iluminação direta de uma máscara de fase quanto pelo uso de um interferômetro com máscara de fase, e as redes de período longo pela técnica de irradiação ponto a ponto. As redes são escritas em fibras fotossensíveis ou em fibras mono-modo padrão hidrogenadas. A operação do sistema é controlada por computador e a troca entre as diferentes técnicas de irradiação é efetuada facilmente. O processo de gravação das redes é acompanhado em tempo real com a ajuda de um analisador de espectros ópticos. Os espectros de reflexão ou transmissão são obtidos lançando na fibra a luz de um LED superluminescente (1445-1645 nm), porém dependendo da faixa espectral de interesse outras fontes de luz podem ser usadas. O sistema permite a obtenção de trocas no comprimento de onda de Bragg com incrementos de 0.11 nm. O desempenho do sistema foi testado e são apresentados os resultados referentes às redes de Bragg e de período longo produzidas. Foram produzidas redes de Bragg com comprimentos de 15 mm e largas de banda de 0.11 nm e refletividades de 26 dB.

Palavras-chave: Fibras Ópticas, Dispositivos fotorrefrativos, Redes de Bragg.

INTEGRATION AND IMPROVEMENT OF THE UTFPR PHOTOREFRACTIVE DEVICES PRODUCTION SYSTEM

Abstract

This work presents a versatile experimental set-up developed to produce Bragg gratings and long-period gratings in optical fibers. The set-up employs as light source an ultraviolet Nd:YAG laser operating at 266 nm and allows Bragg gratings to be written by two different techniques of fiber irradiation. Bragg gratings are obtained both by a direct illumination of a phase-mask and by the use of a phase-mask interferometer, and long-period gratings are produced by the point-to-point technique. Gratings are written in photosensitive or hydrogen loaded single mode fibers. The system operation is computer aided and the interchange between the techniques of irradiation is easily accomplished. The writing process of fiber gratings is monitored in real-time with the help of an optical spectrum analyzer. The reflection or transmission spectra are obtained after launching light in the fiber using a superluminescent LED (1445-1645 nm) and depending on the spectral range of interest, other light sources may be used. Changes of Bragg wavelength are obtained with increments of 0.11 nm. The set-up performance was tested and results concerning the recorded fiber Bragg gratings and long-period gratings are presented. Bragg gratings with lengths up to 15 mm have been produced, with bandwidth as low as 0.11 nm and reflectivity as high as 26 dB.

Keywords: Optic Fibers, Photorefractive Devices, Fiber Bragg Grating.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Nas últimas décadas, o uso de fibras ópticas nas comunicações aumentou consideravelmente a capacidade de transmissão e reduziu os custos de tais sistemas. Uma justificativa para essa evolução foi a obtenção de dispositivos a fibra óptica capazes de substituir os dispositivos eletrônicos convencionais. No campo das telecomunicações, esses dispositivos permitem a construção de multiplexadores e demultiplexadores, com características que superariam em muito as dos equipamentos atuais, otimizando as capacidades das redes de comunicação hoje existentes. Os dispositivos a fibra também encontram uma grande aplicabilidade na área de sensoriamento, uma vez que são compactos e de fácil integração aos enlaces ópticos de comunicação, apresentando imunidade a interferência elétrica externa [1] [2] [3] [4]. Além disso, se a codificação do sinal for feita em comprimento de onda ao invés de amplitude, o sensor torna-se imune as flutuações de intensidade da fonte de sinal ótico.

As redes de Bragg em fibras ópticas são um tipo especial de estrutura periódica fotorrefrativa, que pode ser produzida em fibra óptica e utilizada tanto para fins de sensoriamento quanto na construção de dispositivos para as telecomunicações.

1.2 Estado da Arte

Desde a primeira proposta da viabilidade da fibra óptica por Kao e Hockham [1] em 1966 e a demonstração subsequente destes princípios em 1970 [2], a diminuição das perdas e o uso da fibra óptica evoluiu rapidamente. O interesse, e o crescimento maciço de sistemas de fibra óptica foi explorado devido as propriedades atraentes oferecidas por este método transmissão de informações. As vantagens oferecidas pela fibra incluem baixa perda de transmissão, grande largura de banda, tamanho pequeno, baixo peso, e imunidade à interferência eletromagnética externa.

Concomitante com o interesse crescente e o desenvolvimento de sistemas a fibra óptica ocorreu o desenvolvimento de componentes para serem usados nestes sistemas. Um desses componentes é a rede de Bragg em fibra por causa da capacidade dela em ser usada em diferentes aplicações. Essas aplicações incluem lasers em fibras dopadas com terras raras [3], na compensação de dispersão [4], na multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM) [5], em acopladores de modos [6], na estabilização do comprimento de onda em diodos laser [7], em lasers híbridos fibra/semicondutor [8], em amplificador a fibra com controle de ganho [9], em sensores baseados em redes [10] entre outros.

A formação de uma rede permanente escrita diretamente no núcleo de uma fibra foi demonstrada primeiro por Ken Hill *et al.* em 1978 [11]. Eles lançaram radiação de alta intensidade de um laser de argônio em 488 nm no interior de uma fibra óptica e observaram que parte da luz era refletida no sentido contrapropagante para fora da fibra e tinha sua intensidade aumentada em função do tempo, até quase toda a luz que seria transmitida pela fibra ser refletida. Esse tipo de rede gravada, chamada "Rede de Hill", foi formada pela interferência entre a luz propagante e a contrapropagante no núcleo da fibra. A luz transmitida pela fibra experimentou uma reflexão na extremidade da fibra. Essa luz refletida interferiu com a radiação de entrada e o padrão de onda estacionária resultante foi gravado no núcleo da fibra por um processo chamado fotossensibilidade.

A formação da Rede de Hill era uma curiosidade inexplicada até os resultados importantes de Lam e Garside [12]. Eles argumentaram que um processo de dois fótons causou a formação da rede e aquelas redes poderiam ser formadas mais eficazmente se fosse usada radiação em 244 nm ao invés de 488 nm. Isso inspirou Meltz *et al.* a gravar uma rede em fibra pelo método holográfico, expondo o núcleo de uma fibra a um padrão de interferência de dois feixes em 244nm externos à fibra [13]. Variando o ângulo com o qual os feixes de escrita se cruzariam, poderiam ser feitas redes em fibra agir como refletores de Bragg para quase qualquer comprimento de onda. No início a fotossensibilidade foi associada com a presença de germânio nas fibras, porém o efeito também passou a ser observado em fibras que não possuíam germânio como dopante [14].

Em 1993 Lemaire e colaboradores desenvolveram uma técnica para obter grande modulação do índice de refração em fibras ($\Delta n \approx 10^{-3}$ a 10^{-2}) dopadas com GeO_2 . A técnica, que promovia o aumento da fotossensibilidade das fibras, consistia em armazenar as fibras em uma atmosfera de alta pressão de hidrogênio (20 atm - 750 atm) com temperatura entre 20°C e 75°C [15]. Em 1995 Loh [16] e colaboradores produziram redes de Bragg (FBG) utilizando uma máscara de fase para produzir um padrão de interferência da luz do laser sobre a fibra. Essa técnica permite a produção de redes com boa reprodutibilidade e mais longas, no entanto o comprimento de onda de Bragg é limitado pelo período da máscara de fase.

No ano de 2001, a técnica usando o interferômetro de Talbot modificado foi desenvolvida [17]. Nessa técnica a máscara de fase é usada para difratar o feixe de luz ultravioleta, e uma lente cilíndrica combinada com um par de espelhos produzem duas fontes simétricas virtuais que se recombinaem na fibra óptica produzindo o padrão de interferência. O comprimento da rede Bragg pode ser controlado pela translação da fibra, dos espelhos ou da máscara de fase [17].

1.3 Justificativas e Objetivos

O grupo "Dispositivos Fotônicos e Aplicações" da UTFPR atua na área de produção e estudo de dispositivos fotorrefrativos em fibra óptica particularmente redes de Bragg e de período longo. Nos últimos anos foram desenvolvidos vários trabalhos tanto na linha dos sensores a fibra óptica [18] [19] quanto de dispositivos de fibra para as telecomunicações [20].

Considerando que o domínio da tecnologia de produção de tais dispositivos possibilita a fabricação de equipamentos com base em fibras ópticas, com aplicações em áreas diversas. Além disso, se faz necessário um sistema de gravação que possibilite a produção de redes com alto grau de reprodutibilidade em um curto período de tempo. Além disso, o sistema também deve possibilitar a produção de redes com diferentes características e sua operação deve ser simples com um mínimo de ajustes manuais.

Com base nessas necessidades o presente trabalho tem como objetivo geral ampliar as potencialidades do sistema de gravação de redes de Bragg existente anteriormente [21]. Para alcançar esse objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: Implementar um sistema de controle para motores do interferômetro de forma que haja a menor interação humana possível nos ajustes, implementar perfis de velocidade que permitam gravar redes de Bragg apodizadas e verificar o correto funcionamento do sistema por meio da produção de redes para diferentes aplicações em variados tipos de fibras.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. No capítulo 1 são colocadas as considerações iniciais e um estado da arte, onde são citadas as primeiras descobertas sobre a viabilidade da fibra óptica e dos sensores à fibra óptica, e são também descritas as principais justificativas e os objetivos do trabalho. No capítulo 2 faz-se

uma breve fundamentação teórica sobre redes de Bragg, a aplicação destas como sensores e a fotossensibilidade em fibras ópticas. No capítulo 3 é descrito com detalhes o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. No capítulo 4 são relatados os principais resultados obtidos e discussões. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas, as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Fotossensibilidade em fibras ópticas

A fotossensibilidade, descoberta por Hill *et al.* em 1978 [11], produz uma mudança no índice de refração do núcleo da fibra óptica quando esta é exposta à luz com comprimento de onda e intensidade adequados, o que possibilita a escrita de redes nestas fibras. O aumento desta fotossensibilidade permite a gravação de redes com a utilização de menores potências ópticas do laser de escrita e tempos de exposição, portanto neste trabalho é de grande importância o aumento da fotossensibilidade já presente nas fibras ópticas.

O fenômeno da fotossensibilidade é descrito na figura 2.1 [22] e pode ser explicado como segue. A luz incidente com distribuição de intensidade variável gera portadores de cargas livres (elétrons ou lacunas) pela excitação dos níveis de energia da impureza a uma taxa proporcional à potência óptica [22]. Esses portadores de carga difundem para posições de baixa intensidade de radiação eletromagnética, saindo atrás das cargas fixas de polaridade oposta. Os portadores livres são presos então pelos íons de impureza que conduzem à recombinação e a deposição da carga [22]. O efeito total é a criação de uma distribuição não homogênea espaço-carga que pode existir permanentemente na estrutura até uma radiação mais intensa ou a alta temperatura a destruir. A distribuição espacial da carga resulta em um campo elétrico interno que

causa mudança no índice de refração do material, mudança devido ao Efeito Pockels eletro-óptico [22].

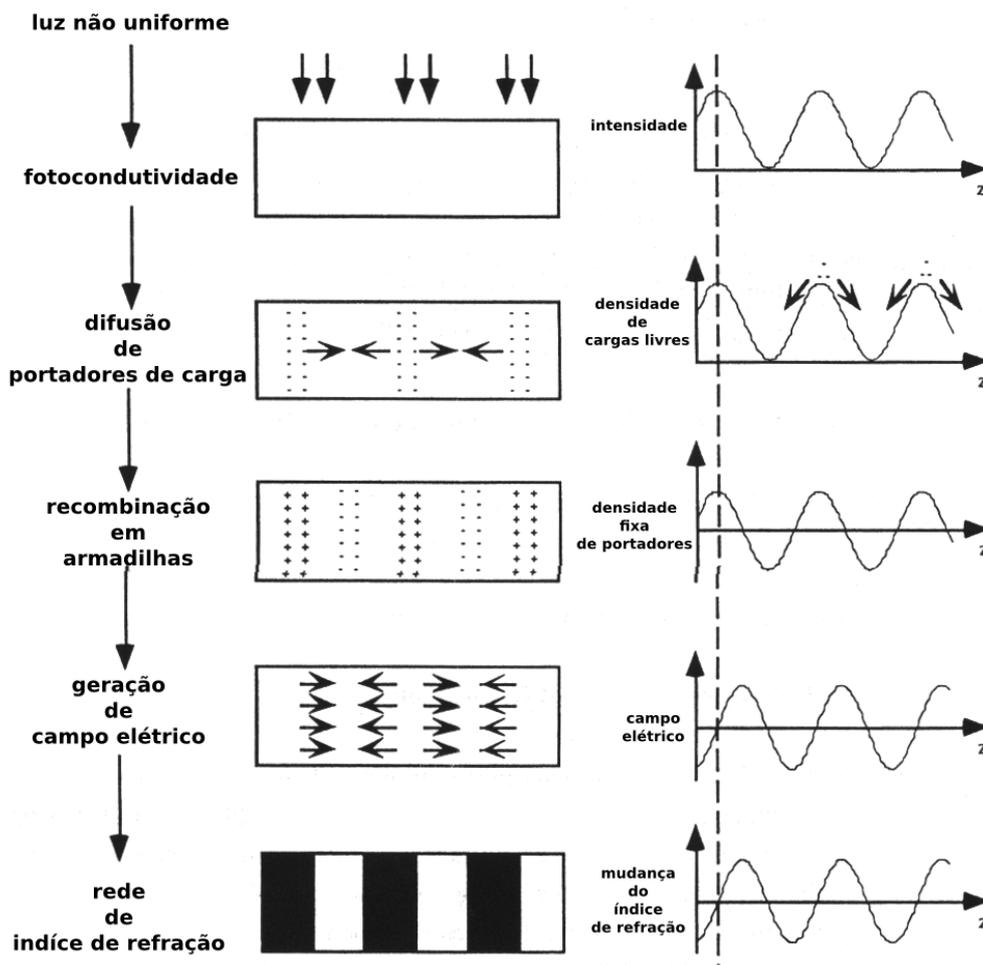


Fig. 2.1: Fenômeno da fotossensibilidade em um material exposto a uma luz com distribuição espacial senoidal.

A fotossensibilidade está sendo usada cada vez mais para fabricar dispositivos de alto desempenho em telecomunicações e dispositivos sensores. Hill *et al.* [11] usaram o padrão de interferência de dois feixes contra-propagantes de luz azul ou verde (488 ou 514 nm) e uma fibra mono modo dopada com germânio, para formar uma rede interna de índice de refração no núcleo da fibra. Tais redes acoplavam a luz do modo fundamental LP_{01} propagante para o modo LP_{01} contra propagante em um comprimento de onda em que a condição de casamento de fase para o modo de acoplamento era satisfeita [11]. Como as redes de Hill eram gravadas lançando luz no núcleo da

fibra, o comprimento de onda das redes era igual ao comprimento de onda da escrita, região do espectro visível, devido a isto elas não eram aplicáveis em telecomunicações em comprimento de onda na faixa de 1390 nm. Redes de Bragg tiveram aplicações limitadas em telecomunicações até o surgimento do método holográfico transversal ou técnica de escrita lateral para a fabricação de redes ser proposto por Meltz *et al.* [13]. A técnica de escrita lateral permitiu a produção maciça de redes ao longo da fibra, no comprimento de onda desejado usando o padrão de interferência entre dois feixes *UV* coerentes.

Um grande número de teorias já foram propostas para explicar a fotossensibilidade em fibras produzidas com dopantes como germânio entre outros. Também observou-se que a máxima mudança no índice de refração do vidro dopado com germânio, e a formação de uma rede mais forte ocorre quando o comprimento de onda da radiação *UV* do feixe incidente coincide com o comprimento de onda de absorção dos centros com deficiência de oxigênio Ge-Si e Ge-Ge (*GODC* - germanium oxygen deficient center) [23]. A formação dos defeitos dentro do vidro que têm uma forte absorção no *UV* distante (aproximadamente 200 nm) conduz à modulação no índice de refração ao longo do comprimento da região exposta [24]. Embora a fotossensibilidade tenha sido relatada nas fibras dopadas com cério [25] e európio [14], as fibras de germano silicato são as que mais alteram o índice de refração. O valor da fotossensibilidade observado é proporcional a concentração de *Ge* no núcleo da fibra, que implica também numa concentração maior de defeitos de *GODC*. Podem ser obtidas mudanças no índice de refração em torno de $3 \cdot 10^{-5}$ para fibras mono modo padrão com 3% de dióxido de germânio [23].

Em 1985, Lemaire e Tomita [26] mostraram os primeiros resultados da adição de hidrogênio na formação de defeitos no vidro de germano silicato. A adição de hidrogênio em vidros dopados com germânio conduz à quebra das ligações Si-O-Ge, tendo como resultado a formação das ligações Si-OH e dos centros de deficiência de oxigênio Ge-Si e Ge-Ge, responsáveis pela banda de absorção centrado em 240 nm, sendo que ambos conduzem ao aumento no índice de refração, conforme exemplificado na figura

2.2 [27].

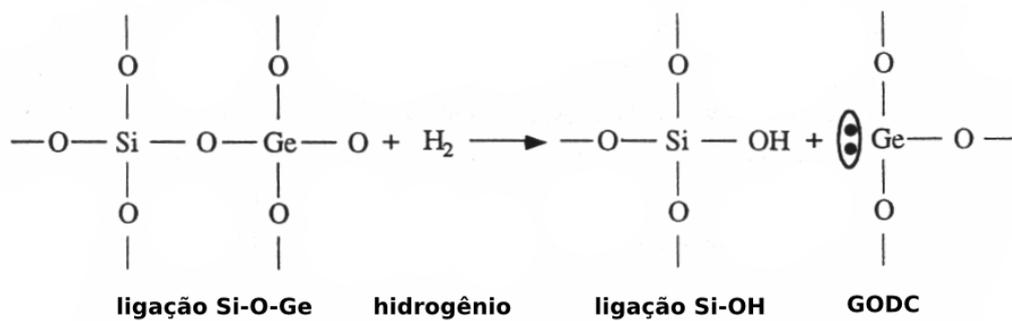


Fig. 2.2: A reação do hidrogênio na ligação Si-O-Ge conduz à formação de centros GODC e Ge-OH.

Por sua vez, a formação de moléculas de OH gera uma banda de absorção centrada em 1390 nm, e pode ser prejudicial ao desempenho em telecomunicações e sistemas sensores que operam nesta região espectral. Essa limitação pode ser contornada substituindo o hidrogênio molecular por deutério uma vez que a formação dos centros de Ge-OD produz picos de absorção fora da faixa espectral de operação das telecomunicações [15]. Com difusão de hidrogênio ou deutério, mudanças no índice de refração maiores que 10^{-2} foram relatadas por Lemaire *et al.* [28], modulações que são pelo menos duas ordens de grandeza maior que aquelas obtidas nas fibras não carregadas com hidrogênio [23]. Em fibras carregadas com hidrogênio, a perda em 1390 nm também pode ser medida para estimar a concentração de OH na fibra.

2.2 Cálculo da concentração de hidrogênio na fibra

O montante de hidrogênio que pode ser difundido em uma fibra é uma função da temperatura, tempo, e pressão. A influência desses parâmetros na taxa de difusão de hidrogênio no núcleo de uma fibra pode ser modelada usando uma equação de difusão Fickian. Para calcular a difusão do hidrogênio no núcleo da fibra, a fibra é tratada como um cilindro com um raio igual ao da casca da fibra [29]. A concentração

normalizada de hidrogênio no núcleo de uma fibra com raio a é dada então por [30]

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-D\alpha_n^2 t) J_0(r\alpha_n)}{\alpha_n J_1(a\alpha_n)} \quad (2.1)$$

onde D é a constante de difusão de hidrogênio na sílica, t é o tempo, r é a distância radial do núcleo, a o raio da fibra, $r\alpha_n$ e $a\alpha_n$ são as raízes da função de Bessel de primeiro tipo de ordem zero e um, respectivamente. A constante de difusão, D , é dependente da temperatura e foi encontrada empiricamente por [28]:

$$D = 2,83 \cdot 10^{-4} \exp(-4834/T) \text{ cm}^2/\text{s} \quad (2.2)$$

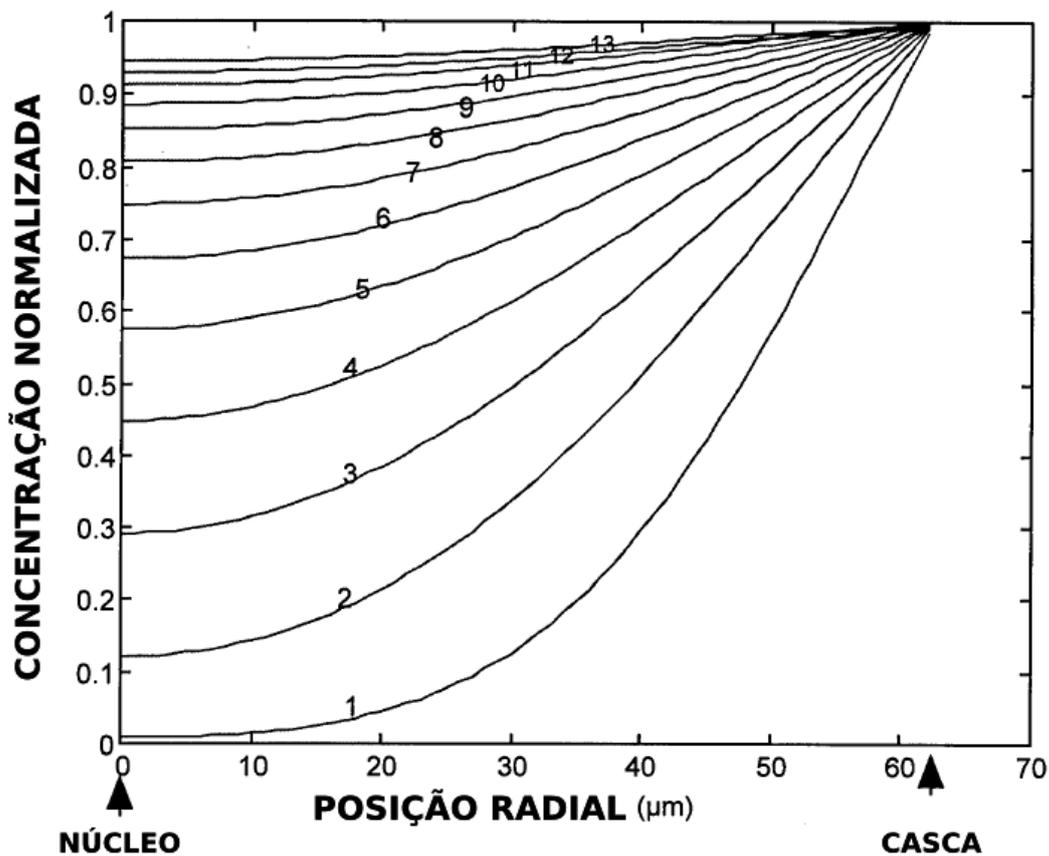


Fig. 2.3: Concentração normalizada de hidrogênio gasoso difundido na fibra em função da posição radial da fibra. As curvas representam a concentração em função do tempo de difusão em dias para temperatura de 21°C .

A figura 2.3 [29] apresenta uma série de curvas da concentração normalizada de hidrogênio em função da posição radial na fibra a uma temperatura de 21°C [29].

São usadas múltiplas curvas para ilustrar como a concentração de hidrogênio na fibra aumenta com o tempo (medido em incrementos de dia). A esta temperatura leva aproximadamente 13 dias para a concentração de hidrogênio no núcleo alcançar 95% de seu valor de equilíbrio [29]. Aumentando a temperatura à qual o hidrogênio está sendo difundido na fibra aumenta a velocidade do processo de difusão e diminui o tempo de difusão. Por exemplo, elevar a temperatura a $27^{\circ}C$ reduz o tempo de difusão para aproximadamente nove dias [29]. Embora o aumento de temperatura reduza o tempo de difusão, este procedimento também reduz o montante de moléculas de hidrogênio que podem ser absorvidas pela fibra, ou a solubilidade S também é reduzida [29]. A solubilidade segue uma lei exponencial, cujo argumento é inversamente proporcional à temperatura. Ela pode ser expressa por[15],

$$S = 3,37exp(1041,66/T)ppm/atm \quad (2.3)$$

Da equação 2.2, o aumento da temperatura resulta em uma concentração total de hidrogênio menor na fibra a uma determinada pressão. Porém, uma concentração mais alta pode ser obtida pela pressão de difusão [29]. A concentração de equilíbrio de hidrogênio no núcleo da fibra é igual a solubilidade (dependente do tempo) multiplicada pela pressão de difusão,

$$C_0 = S.Pppm \quad (2.4)$$

embora possam ser obtidas maiores concentrações aumentando a pressão, as tolerâncias mecânicas do sistema de difusão impõem um limite na pressão máxima que pode ser usada.

2.3 Redes de Bragg em fibras ópticas

Uma rede de Bragg gravada em uma fibra óptica constitui-se em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ao longo do seu eixo (ver figura 2.4). Normalmente, para a produção de redes de Bragg usando radiação UV, utilizam-se fibras fotossensíveis, porém tais redes também podem ser produzidas em fibras

SMF (single mode fiber) hidrogenadas.

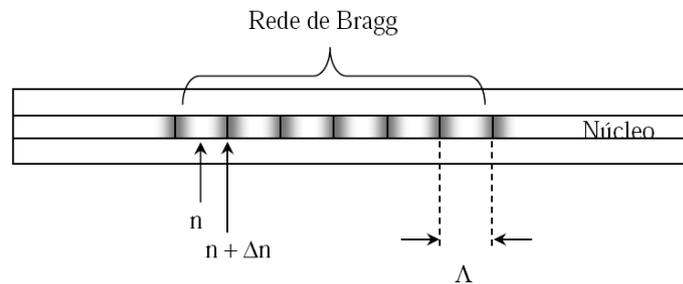


Fig. 2.4: Esquema da modulação local do índice de refração do núcleo da fibra óptica que constitui a rede de Bragg.

A rede de Bragg opera como um filtro espectral reflexivo que seleciona uma faixa estreita de comprimentos de onda de uma banda larga de comprimentos de onda que tenham sido acoplados à fibra (ver figura 2.4).

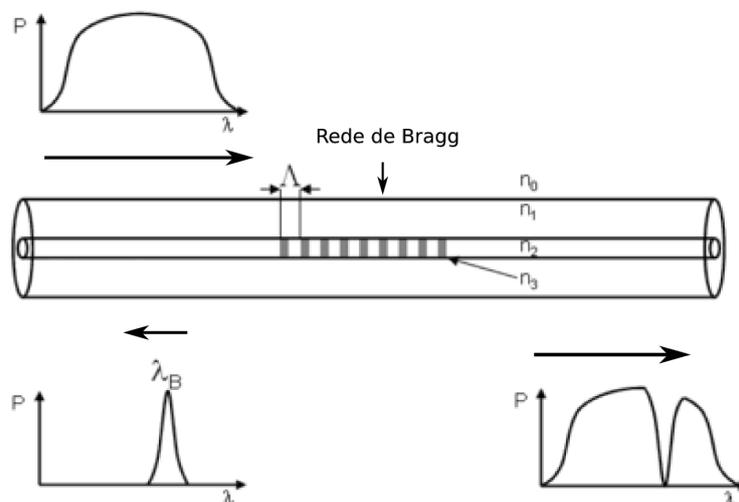


Fig. 2.5: Esquema do princípio de operação de uma rede de Bragg em fibra óptica. Uma faixa estreita do espectro, centrada no comprimento de onda de Bragg λ_B é refletida, e o restante é transmitido.

O comprimento de onda central da banda refletida, chamado comprimento de onda de Bragg λ_B está relacionado com a periodicidade espacial da modulação do índice de refração, Λ , e com o índice de refração efetivo do núcleo, n_{eff} , através da equação

2.5

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.5)$$

Na figura 2.5 é representada uma rede de Bragg sendo iluminada por uma fonte de luz banda larga. Uma faixa estreita do espectro de luz, centrada no comprimento de onda de Bragg, é refletida, e o restante do espectro é transmitido.

2.3.1 Tipos de Redes de Bragg

A otimização da fabricação de redes de Bragg exige a determinação da evolução das alterações do índice efetivo e da amplitude de modulação do índice em função do tempo de exposição à radiação UV. Esta dependência pode ser bastante complexa, pois está sujeita a diversos parâmetros, tais como: a natureza da fibra, as características da fonte laser UV, a densidade de energia, a visibilidade e estabilidade do padrão espacial de exposição.

Entre os sistemas utilizados para a gravação, freqüentemente são usados lasers de potência constante contínua como laser de Ar^+ dobrado em freqüência, gerando radiação de 244 nm. Feixes contínuos têm qualidade modal e uniformidade espacial superiores às de feixes pulsados. Assim, redes com grande reprodutibilidade podem ser gravadas com feixes contínuos e, uma vez determinados os parâmetros necessários para gravar redes de características específicas, tais redes podem ser reproduzidas em outros trechos de fibra com o mesmo arranjo. Como a gravação pode ser acompanhada em tempo real, é possível escrever redes e alterar os parâmetros durante a gravação de forma a obter as características desejadas do filtro espectral que se está gravando. A baixa potência utilizada durante a gravação não resulta necessariamente em refletividades inferiores, e redes de refletividade próxima de 100% são geralmente gravadas com este método. Com essa técnica podem ser gravadas redes de vários tipos incluindo as classificadas como tipo I. Redes do tipo I podem ser apagadas em temperaturas relativamente baixas ($\approx 200^\circ C$). No entanto, essas redes são as mais utilizadas e operam de $-40^\circ C$ a $+80^\circ C$, faixa de operação que cobre a

maioria das aplicações em telecomunicações e sensoriamento, [31].

Com o aumento do tempo de exposição das redes observa-se que a rede inicialmente gravada, tipo I, é apagada e outra rede começa a ser formada. Essa rede apresenta como principal característica, uma maior estabilidade térmica ($\approx 500^\circ C$), importante para aplicação das redes como sensores em casos específicos. Essas redes são chamadas de redes do tipo IIA, [31]. O comprimento de onda de Bragg da rede do tipo I se desloca para comprimentos de onda maiores durante a gravação, evidenciando uma alteração de índice positiva; o da rede do tipo IIA desloca-se para comprimentos de onda menores, sugerindo uma alteração de índice negativa. O processo de formação de redes do tipo IIA não é totalmente compreendido, tendo sido sugeridas duas etapas com dinâmicas distintas para justificar as observações experimentais: a primeira, relativamente rápida, corresponde à fotossensibilidade intrínseca das fibras ópticas, sendo responsável pelas alterações positivas de índice, rede tipo I; a segunda, tipicamente mais lenta, parece estar relacionada com a relaxação da tensão acumulada no núcleo da fibra, contribuindo para a parte negativa do índice [32].

Outra alternativa para a gravação de redes é o emprego de sistemas pulsados, como lasers de excímero de KrF (Kriptônio - Flúor) operando em 248 nm ou lasers de corante pulsados e dobrados em frequência, operando entre 240 - 250 nm, sintonizáveis, [31], [33] e [34]. A maior vantagem de se escrever redes de Bragg utilizando sistemas pulsados é que a intensidade do feixe geralmente é tão alta que poucos pulsos são suficientes para escrever uma rede. Porém, as potências podem ser tão altas que o dano mecânico causado no vidro pode ser considerável. Redes de grande permanência, conhecidas como de tipo II, podem ser gravadas por este método e problemas de instabilidade do padrão de interferência projetado na fibra podem ser minimizados. Essas redes são caracterizadas por um conjunto de propriedades bem definidas, tais como: alterações elevadas do índice de refração, elevada estabilidade térmica (redes desse tipo podem operar à temperaturas de $800^\circ C$ por um período de 24 horas sem alterar suas características [31], acoplamentos para modos de casca

e conseqüentes perdas de transmissão para os comprimentos de onda inferiores à condição de Bragg [35] [33]. Essas perdas elevadas resultam de um forte acoplamento para os modos radiativos, devido à forte assimetria e não-uniformidade dos defeitos induzidos pela exposição. Por outro lado, as redes do tipo II são igualmente caracterizadas por perdas de inserção relativamente elevadas, tipicamente entre 0,2 e 2 dB. Estas perdas dependem do comprimento da rede de Bragg e da extensão dos defeitos sobre a secção efetiva do núcleo. As redes do tipo II são gravadas com densidade de energia da ordem de $1J/cm^2$ [35]. Esse valor encontra-se próximo do limiar de dano da sílica que constitui a casca da fibra; assim, existe um pequeno intervalo de densidade de energia disponível para o regime de gravação de redes do tipo II sem provocar danos físicos na superfície da fibra. De fato, se a densidade for aumentada para cerca de $1,1J/cm^2$ é possível induzir redes do tipo II por fusão da fronteira núcleo-casca, criando defeitos físicos [36]. Os defeitos físicos têm origem na interação dos elétrons com múltiplos fótons, os elétrons são liberados para a banda de condução devido à elevada densidade de energia. Nesta situação, toda a energia absorvida nas múltiplas interações é essencialmente liberada por via térmica, conduzindo à fusão da matriz de sílica e à indução de defeitos físicos [31].

Em 2002, Liu *et al.* apresentaram um novo tipo de rede, conhecida por tipo IA. Esse tipo de rede é gravado em fibras de sílica dopada com alta concentração de germânio e hidrogenada. Apresentam como principal característica um coeficiente térmico menor ($\approx 6,4 pm/^\circ C$) que qualquer outro tipo de rede em fibra. As redes tipo IA são gravadas com laser em 244 nm e com tempo de exposição longo, aproximadamente quatro horas a uma potência de 60 mW. Devido ao tempo de exposição longo a rede gravada passa por um processo de recozimento (annealing), devido ao aquecimento gerado dentro da fibra pela absorção da radiação UV. Outro fator interessante na formação dessas redes é a dinâmica do crescimento durante a gravação. Em virtude do longo tempo de exposição era esperada a formação de uma rede do tipo IIA, mas foi observado um crescimento inicial similar ao da rede tipo I. Foi verificado um deslocamento contínuo para maiores comprimentos de onda mesmo após a

transição para a segunda rede e com uma variação do comprimento de onda de 18 nm do início da gravação até o final, o que sugere uma rede com grande variação a partir do índice de refração efetivo. A aplicação dessas redes foi demonstrada para medidas de deformação [37], onde a rede tipo IA foi utilizada para compensar variações de temperatura daquela sensora, do tipo I.

2.4 Redes de Período Longo

As redes de período longo (LPG) são dispositivos intrínsecos à fibra óptica que têm sua operação fundamentada no acoplamento entre o modo propagante de núcleo e modos co-propagantes de casca. Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são dados pela condição de casamento de fase [38]:

$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.6)$$

onde β_1 e β_2 são as constantes de propagação dos modos que estão sendo acoplados, $\Delta\beta$ é a diferença entre as constantes de propagação e Λ é o período da rede. Outra forma de escrever a condição de casamento de fase de uma rede em fibra, de modo a relacionar índices efetivos do núcleo e da casca ao invés das constantes de propagação, é obtida substituindo na equação 2.6 os valores de β_1 e β_2 , chegando-se à seguinte equação:

$$\lambda_m = (n_{co} - n_{cl})\Lambda \quad (2.7)$$

onde λ_m é o comprimento de onda central do m-ésimo modo de casca, para o qual a luz foi acoplada, n_{co} é o índice de refração efetivo do modo de núcleo, n_{cl} é o índice de refração efetivo do m-ésimo modo de casca e Λ é o período da rede. A potência óptica que se propaga nos modos de casca decai rapidamente devido às imperfeições da fibra, ou curvaturas, deixando no espectro de transmissão (ver figura 2.6) vales de atenuação centrados nos comprimentos de onda dados pela equação 2.7.

A relação entre o período da rede e os modos acoplados pode ser analisada a partir da equação 2.6. Nas redes de período longo o acoplamento ocorre entre o

modo fundamental e modos de casca co-propagantes de forma que o valor de $\Delta\beta$ é pequeno e os valores do período Λ são grandes, tipicamente da ordem de centenas de micrometros.

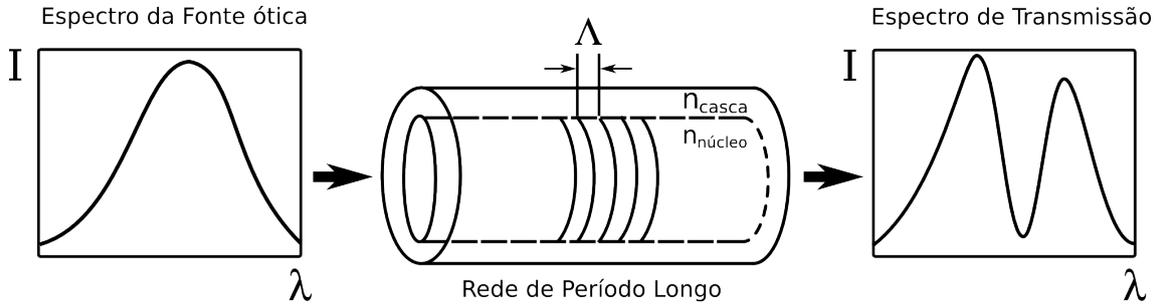


Fig. 2.6: Acoplamento entre os modos propagante e co-propagante por uma rede de período longo com período e índice de modulação constante.

2.5 Rede de Bragg Atuando como Sensor

Devido aos efeitos fotoelástico e termo-óptico, tanto deformações mecânicas longitudinais quanto variações na temperatura provocam o deslocamento do comprimento de onda de Bragg. A equação 2.8 descreve o comportamento do comprimento de onda de Bragg em função de variações no comprimento da fibra (Δl) e de variações de temperatura (ΔT),

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.8)$$

onde T é a temperatura. O primeiro termo da equação 2.8 representa o efeito da deformação longitudinal (ε_z) sobre a fibra óptica. Este corresponde à variação da periodicidade da rede resultante da deformação elástica e a uma mudança no índice de refração pelo efeito fotoelástico. Reescrevendo este termo em função da deformação e da constante elasto-óptica p_e (mantendo-se a temperatura constante), obtém-se:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 + p_e)\varepsilon_z \quad (2.9)$$

sendo

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})] \quad (2.10)$$

onde p_{11} e p_{12} são componentes do tensor elasto-óptico, e ν é a razão de Poisson. Para uma fibra óptica de germano-silicato, $p_{11} = 0.113$, $p_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$ e $n_{eff} = 1.482$ [39]. Usando estes parâmetros na equação 2.9, pode-se calcular a sensibilidade de uma rede de Bragg. Por exemplo, para $\lambda_B = 1550nm$, quando a rede de Bragg for submetida a uma deformação igual a $1\mu\epsilon$, ocorre um deslocamento no comprimento de onda de Bragg igual a $1.2pm$. Uma representação dos efeitos de tração e compressão sobre uma rede de Bragg pode ser visualizada na figura 2.5 que mostra o exemplo de uma rede de Bragg atuando como sensor. Nesta figura, pode-se observar que ocorre um deslocamento no comprimento de onda de Bragg quando esta é submetida a tração ou compressão. No caso da tração, uma variação positiva do comprimento de onda será obtida como consequência de um aumento na periodicidade espacial da rede de Bragg. Já para uma rede de Bragg submetida a compressão, a variação do comprimento de onda será negativa, devido a uma diminuição no período espacial da rede de Bragg.

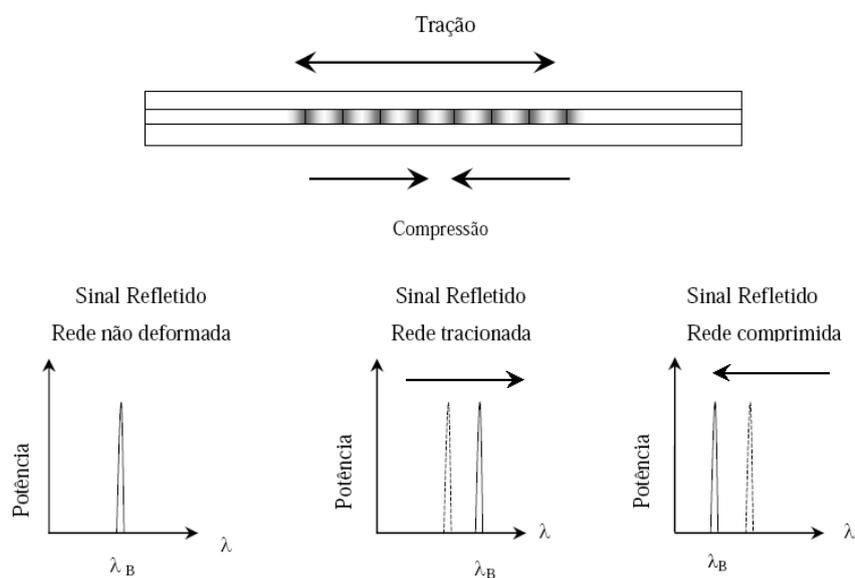


Fig. 2.7: Esquema do deslocamento espectral de uma rede de Bragg submetida a tração e compressão.

O segundo termo da equação 2.8 representa o efeito da temperatura sobre a fibra óptica. A variação do comprimento de onda de Bragg ocorre como consequência

das variações no período espacial da rede de Bragg, Λ (devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra), e no índice de refração, n_{eff} , devido ao efeito termo-óptico. Reescrevendo este termo em função do coeficiente de expansão térmica da fibra α_Λ , e do coeficiente termo-óptico do núcleo α_n , obtém-se, [39]:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (2.11)$$

Para uma fibra óptica dopada com germânio, α_Λ é aproximadamente igual a $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e α_n é aproximadamente igual a $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Desta forma, a sensibilidade de uma rede de Bragg centrada em $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ é aproximadamente igual a $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. A variação do comprimento de onda de Bragg descrita pela equação 2.8 é o que permite o uso de redes de Bragg como sensor de deformação e de temperatura, pois qualquer deformação na rede de Bragg ou alteração de temperatura poderá ser observada através da variação do comprimento de onda de Bragg [39]. A luz refletida pela rede é enviada a um sistema de detecção que mede o valor do comprimento de onda de Bragg. Variações $\Delta\lambda$ neste comprimento de onda podem então ser correlacionadas com alterações do parâmetro que está sendo monitorado.

2.6 Produção de Redes de Bragg

2.6.1 Gravação por Máscara de Fase

Um dos processos mais eficazes e práticos para a gravação de redes de Bragg em fibra óptica é a técnica da máscara de fase. A máscara de fase é um elemento de difração óptica, utilizado em transmissão, que consiste numa seqüência de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica. O princípio de funcionamento da técnica da máscara de fase baseia-se na sobreposição de duas ordens de difração no núcleo da fibra, que está na zona de sobreposição, formando um padrão de interferência. Normalmente a máscara é desenhada para que, numa situação de incidência normal, as ordens +1 e -1 sejam maximizadas e a ordem zero seja minimizada (ver figura 2.8). Na prática, a supressão da ordem zero não é total, conseguindo,

no entanto, valores tipicamente inferiores a 3% da luz incidente. Por outro lado, as ordens de difração +1 e -1 são maximizadas, podendo conter mais de 35% da potência total transmitida.

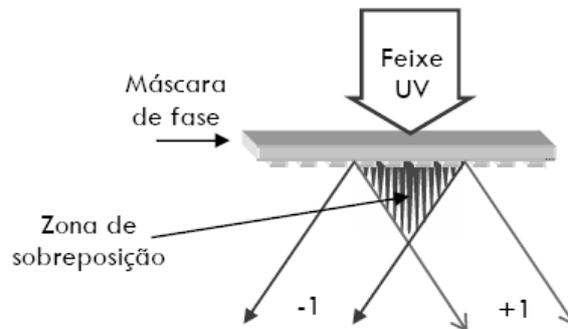


Fig. 2.8: Representação esquemática da difração das ordens -1 e +1 na máscara de fase.

Uma das primeiras experiências em que a técnica da máscara de fase foi utilizada para gravar redes de Bragg com as ordens +1 e -1 foi efetuada por Hill *et al.*, utilizando uma máscara de fase de 1060nm e um laser de KrF [40]. Na mesma época, Anderson *et al.* reportavam também a gravação de redes de Bragg com uma máscara de fase, mas com incidência diferente da normal [41]. Este tipo de incidência é normalmente utilizado quando se pretende gravar redes de Bragg com as ordens 0 e -1 (ver figura 2.9).

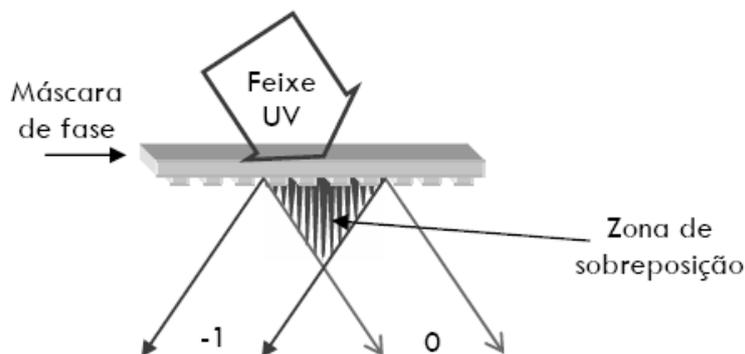


Fig. 2.9: Representação esquemática da difração das ordens -1 e 0 na máscara de fase.

As máscaras de fase com as ordens 0 e -1 maximizadas são tipicamente usadas

em situações onde é necessária a eliminação completa das ordens superiores. Esta técnica é muitas vezes utilizada na fabricação de lasers semicondutores monomodo com realimentação distribuída (DBF - Distributed Feedback) ou em óptica integrada. Nas outras situações, é preferível utilizar a incidência normal, uma vez que tem um alinhamento mais fácil.

Independentemente do tipo de incidência (normal ou não), a fibra terá que ser posicionada imediatamente a seguir à máscara de fase, para que, a porção do núcleo onde se deseja gravar esteja incluída na zona de sobreposição das duas ordens difratadas. A sobreposição origina franjas de interferência, que irão formar as redes de Bragg, com um período

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.12)$$

onde Λ_{mf} é o período das depressões da máscara de fase. Contudo, no caso da incidência normal, se a intensidade do laser ultravioleta for muito elevada, poderá ocorrer interferência da ordem zero. Neste caso, o período das franjas será igual ao da máscara de fase [34]. Também é necessário atenção à coerência espacial do laser, para que esta seja superior à distância entre a máscara de fase e o núcleo da fibra. Note-se que mesmo que a fibra esteja em contacto com a máscara de fase, o que é desaconselhável devido à real probabilidade de danificar a máscara, há ainda uma distância mínima entre a máscara e o núcleo, daí a importância de haver um laser com coerência espacial suficiente [42] [43]. A coerência temporal não é tão importante nesta técnica, uma vez que o percurso óptico das duas ordens é semelhante. Normalmente é necessário utilizar diferentes máscaras de fase para gravar redes com diferentes períodos ou redes com diferentes aperiodicidades. Contudo, é possível induzir alguma sintonia recorrendo a diversas técnicas. Uma delas consiste na aplicação de tensão na fibra, durante a gravação [44]. Quanto maior for a tração durante a gravação, menor será o comprimento de onda final da rede gravada. Este método está, obviamente, restrito aos limites elásticos e mecânicos da fibra. Uma alternativa à aplicação de tensão na fibra consiste na utilização de uma lente convergente antes da máscara de fase para gravar redes com períodos mais curtos, tendo sido demonstrada experi-

mentalmente por Prohaska *et al.* em 1993 [45]. Com a Alteração da distância da lente à máscara (ou da máscara à fibra), altera-se a dimensão da imagem produzida pela lente e, conseqüentemente, o período das franjas de interferência. Também é possível alterar o ângulo da fibra em relação ao plano paralelo à máscara de fase para gravar redes com diferentes comprimentos de onda. Este método permitiu a Othonos e Lee [42] sintonia de até $\approx 2nm$. Na prática, com esta técnica grava-se redes inclinadas, e espera-se perdas por radiação.

2.6.2 Interferômetro por divisão de amplitude

Em 1989, Meltz *et al.* [13] demonstraram, pela primeira vez, um método para a gravação de redes de Bragg por exposição transversal. Foi utilizado um interferômetro por divisão de amplitude, comumente utilizado em técnicas holográficas. Este tipo de interferômetros está representado na figura 2.10.

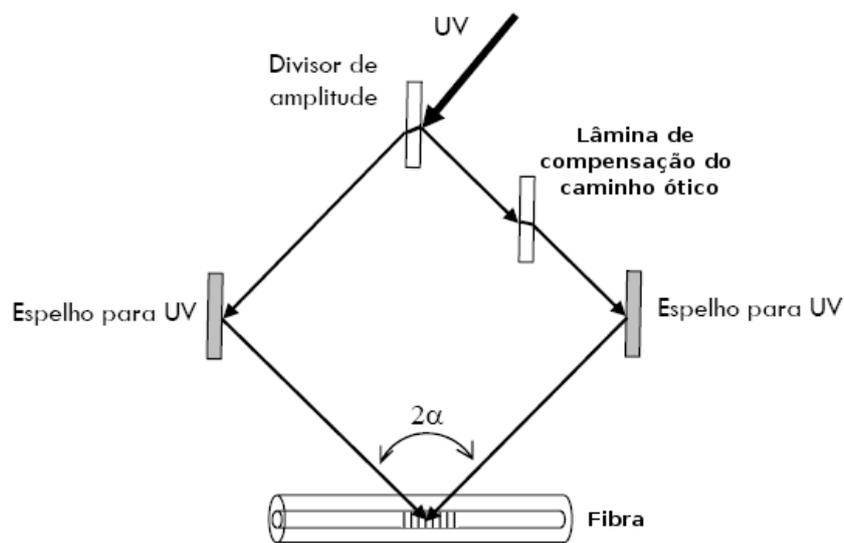


Fig. 2.10: Esquema de um interferômetro por divisão de amplitude para a gravação de redes de Bragg.

De uma forma geral, o feixe ultravioleta é dividido em dois, com amplitudes idênticas, por um divisor de amplitude. Depois de serem refletidos por dois espelhos próprios

para a emissão ultravioleta, os dois feixes recombina-se no núcleo da fibra com um ângulo 2α entre eles, formando um padrão de interferência. O período das franjas de interferência, Λ , é dado por

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2n_{eff}\sin\alpha} \quad (2.13)$$

Com este método, é teoricamente possível gravar redes com comprimentos de onda de Bragg entre valores próximos ao da fonte ultravioleta até o infinito $\alpha = 0$, tornando este método muito mais versátil que o da máscara de fase. Contudo, é necessário um cuidado especial no desenho do dispositivo de gravação que terá de ser imune a vibrações e protegido das turbulências do ar. Caso contrário, em exposições prolongadas, a qualidade de gravação é deteriorada significativamente. Se o laser tiver baixa coerência temporal, também é necessário corrigir a diferença de percursos ópticos induzida pelo divisor de amplitude. Normalmente, uma lâmina de S_iO_2 com a espessura correta resolverá o problema. Note-se que, mesmo com esta correção, a coerência do laser continua a ser bastante importante, uma vez que os feixes que interferem na fibra têm uma rotação espacial de 180° entre si, devido ao divisor de amplitude. Por isso é necessária uma boa coerência espacial.

2.6.3 Interferômetro com máscara de fase

A divisão de amplitude do feixe ultravioleta também pode ser efetuada com recurso de uma máscara de fase, em substituição ao divisor de amplitude.

Para a inscrição das redes de Bragg, são aproveitadas as ordens +1 e -1, sendo bloqueadas as restantes ordens incluindo a ordem 0. Depois de refletirem nos espelhos, os feixes de ordem +1 e -1 são redirecionadas para a fibra fotossensibilizada onde será feita a gravação. Também é possível utilizar as ordens -1 e 0, embora não seja tão prático [46]. As redes inclinadas podem ser gravadas através da rotação de uma das extremidades da fibra em relação à outra.

Apesar de aparentemente ser um método mais dispendioso, a utilização das ordens +1 e -1 de uma máscara de fase tem algumas vantagens intrínsecas em relação

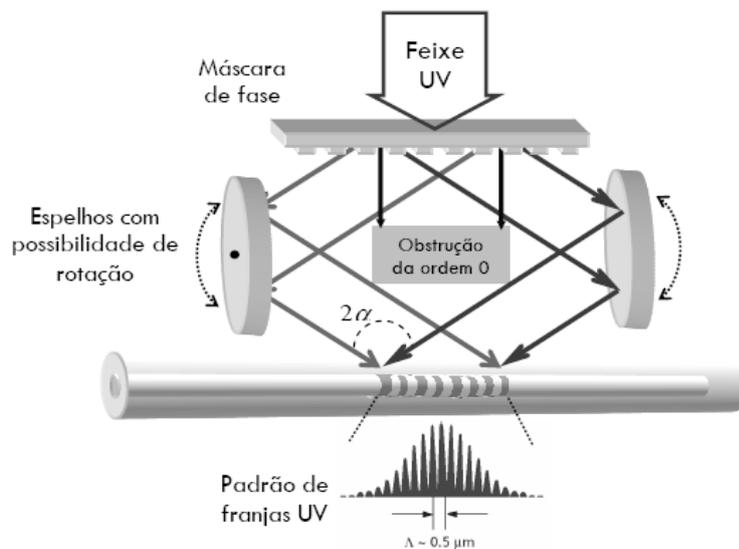


Fig. 2.11: Esquema de gravação de redes de Bragg baseado no método interferométrico com máscara de fase.

ao divisor de amplitude comum. Uma dessas vantagens é a incidência na máscara de fase ser normal a esta, simplificando o alinhamento. Além disso, a utilização da máscara de fase como divisor de feixe permite que esta seja utilizada como referência de comprimento de onda. Assim, considerando os espelhos paralelos e uma incidência normal na máscara de fase, o período de gravação através do interferômetro será o mesmo, caso a rede seja gravada diretamente pela máscara de fase. Com este tipo de interferômetro é possível obter sintonias extremamente elevadas.

Em 2001, Wang *et al.* demonstraram uma técnica baseada neste tipo de interferômetro onde os espelhos estão sempre paralelos. A sintonia é feita, colocando uma lente cilíndrica após a máscara de fase. Através do ajuste da distância da fibra à lente e da utilização de lentes com diferentes distâncias focais, foi possível gravar redes de Bragg com comprimentos de onda entre 600 e 1300 nm [17].

2.7 Produção de redes de Período Longo

2.7.1 Gravação Ponto-a-Ponto

A técnica de escrita ponto-a-ponto consiste em focalizar pontos fixos ao longo de uma fibra óptica fazendo incidir nesses pontos um feixe de laser. Dessa maneira o índice de refração do núcleo aumenta no local irradiado. Então a fibra, ou o feixe de laser é deslocado de uma distância, ao longo do eixo longitudinal da fibra e o processo de alteração do índice de refração recomeça em um outro ponto, a distância entre os pontos fornece o período da rede. Esse procedimento, representado esquematicamente na figura 2.12 [31], é repetido até a formação da rede desejada, que pode inclusive ser uma rede com gorjeio (chirp) aumentando-se o deslocamento da fibra, ou do laser, progressivamente. Essa é a técnica de escrita ponto a ponto [31].

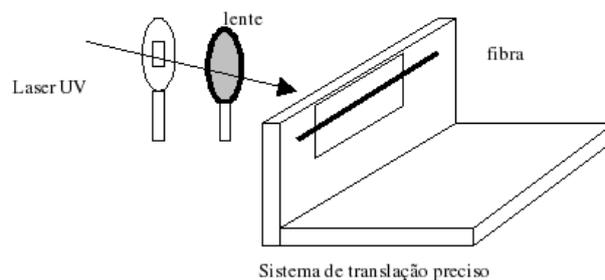


Fig. 2.12: Técnica de escrita ponto-a-ponto.

2.7.2 Gravação Ponto-a-Ponto com Máscara de Amplitude

A combinação dos dois processos de escrita, o ponto-a-ponto e a máscara de amplitude, tem a vantagem da possibilidade de mudança dos parâmetros da rede durante o processo de gravação; além de não se ter a desvantagem do processo interferométrico que tem uma grande dependência com o comprimento de onda do laser de escrita. Utilizando-se desses dois processos, conforme ilustra a figura 2.13 [47],

não há a necessidade de uma grande estabilidade do laser para a escrita. O período da LPG é o mesmo da máscara de amplitude. O computador controla o estágio de translação, por cada período Λ , após cada exposição.

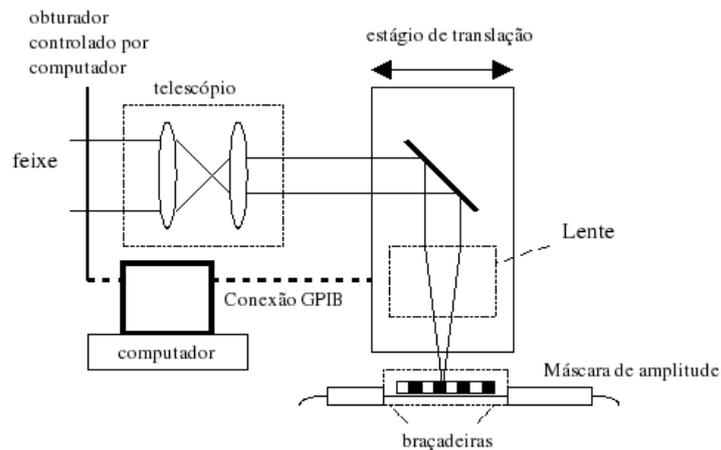


Fig. 2.13: Montagem experimental que alterna os processos de escrita ponto-a-ponto e com máscara de amplitude.

2.7.3 Gravação com Arco Elétrico

A técnica de escrita que faz o uso de arco elétrico, ponto-a-ponto está ilustrada na figura 2.14 [48]. Na escrita com arco elétrico, a fibra é desencapada e colocada entre os eletrodos de uma máquina de emendas sob tensão axial constante, mantendo-se uma de suas extremidades presa a uma massa e a outra fixa a um sistema de translação preciso. A fibra receberá, ponto-a-ponto, uma descarga elétrica com intensidade de corrente e intervalo de tempo controlados. A descarga elétrica produzida em todos os pontos, eqüidistantes e espaçados por um período Λ , gera aquecimento que modula o índice de refração da fibra. Redes gravadas com essa técnica tem mostrado bom desempenho em temperaturas superiores a 800°C sem modificação permanente das suas propriedades [49].

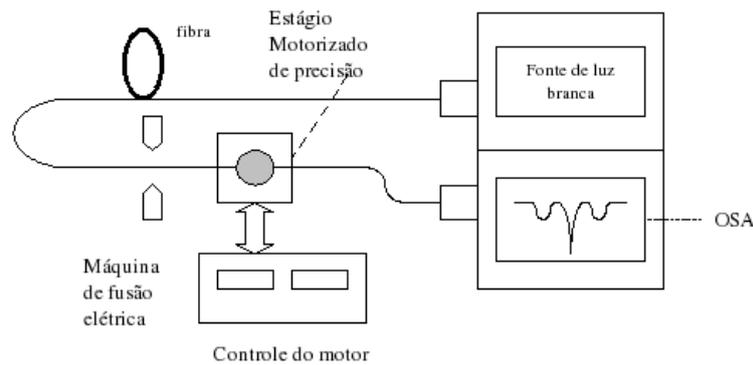


Fig. 2.14: Esquema da técnica de escrita ponto-a-ponto por arco elétrico.

2.7.4 Gravação com Laser de CO_2

O processo de escrita utilizando um laser de CO_2 é similar ao processo de escrita ponto-a-ponto. A radiação infravermelha, do laser de CO_2 , aquece cada ponto da fibra e produz uma relaxação da tensão residual do núcleo alterando o seu índice de refração. A cada período Λ o feixe do laser CO_2 , ou a fibra, são transladados precisamente, conforme ilustra a figura 2.15 [50]. Redes produzidas com essa técnica apresentam elevada estabilidade térmica [49].

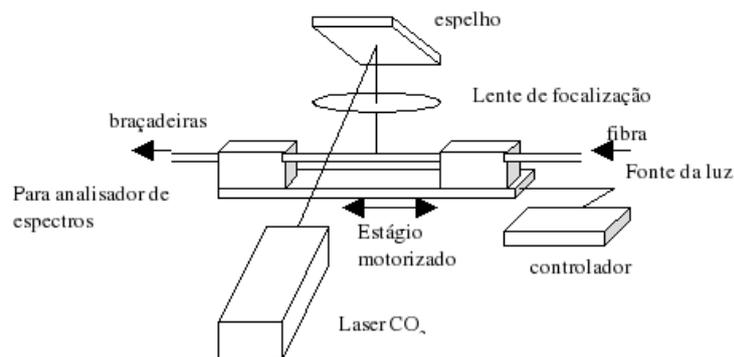


Fig. 2.15: Escrita de LPG ponto-a-ponto com laser de CO_2 .

2.8 Apodização

A resposta espectral de uma rede de Bragg exhibe lóbulos laterais à direita e à esquerda da reflexão máxima. Tais lóbulos são sempre indesejáveis e podem tornar-se críticos tanto em sistemas WDM, pois induzem diafonia entre canais adjacentes, quanto em redes compensadoras de dispersão, pois degradam suas características dispersivas. Em 1974, K.O. Hill demonstrou que tais lóbulos podem ser suprimidos se a eficiência do acoplamento entre modos contra-propagantes variar espacialmente ao longo do comprimento da rede. Essa operação é conhecida como apodização e requer, idealmente, que a modulação da amplitude do índice de refração apresente a forma de uma gaussiana, ao longo da rede, isto é, mínima em suas extremidades e máxima na metade do comprimento [51].

Os perfis de apodização tipicamente empregados têm sido descritos por diversas funções matemáticas, tais como Blackman, co-seno levantado, sinc, seno hiperbólico, tangente hiperbólica [52], gaussiana, gaussiana levantada [53] e co-seno truncado [54].

Em geral, a apodização implica em processos de fabricação mais complexos, sendo inúmeras as técnicas propostas para sua implementação. Dentre elas, destacam-se a exposição dupla [55], a máscara de fase com variação local da eficiência de difração [56], o sistema móvel da máscara de fase e/ou da fibra, durante o processo de exposição à radiação *UV* [57], [58], *dithering* da máscara de fase durante o processo de exposição [53] e *dithering* do feixe *UV* [59].

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Hidrogenação de Fibras Ópticas

Um sistema típico de hidrogenação, montado na UTFPR, figura 3.1, consiste de um cilindro de hidrogênio, um registro com dois manômetros que serve para pressurizar a câmara e também para verificar a pressão do cilindro, um registro para isolar a câmara da tubulação ligada ao cilindro, uma válvula de purga, utilizada para retirar o hidrogênio da câmara antes de retirar as fibras e uma porca na extremidade da câmara, por onde se coloca e se retira as fibras. O sistema é constituído por vários elementos descritos a seguir, e que podem ser identificados na figura 3.1. A garrafa de hidrogênio à pressão máxima de 150 atm é ligada ao cilindro através de tubos de aço inoxidável, sendo cada uma dessas ligações provida de uma válvula de isolamento para a interrupção do fornecimento de gás. Para evitar o retorno do gás para a garrafa foram utilizadas válvulas de retenção de alta pressão de aço inoxidável. A pressão da câmara é definida por um regulador de pressão de latão, com diafragma de aço inoxidável. Este elemento tem dois manômetros que permitem monitorar a pressão na garrafa e na câmara, sendo possível ajustar a pressão de fornecimento até o valor máximo de 150 atm. Como o hidrogênio é classificado como extremamente inflamável, deve respeitar-se criteriosamente todos os procedimentos descritos na respectiva ficha de segurança do produto. Nesse sentido descreve-se aqui sucinta-

mente as instruções de funcionamento, que devem ser sempre realizadas em qualquer circunstância seguindo a seqüência indicada.

- 1) Abrir o registro de purga (V1).
- 2) Abrir a tampa do tubo (T1), e retirar ou colocar as fibras a serem utilizadas.
- 3) Fechar a tampa do tubo (T1), onde estão armazenadas as fibras.
- 4) Fechar o registro de purga (V1).
- 5) Abrir o registro (V2), entre o tubo onde estão as fibras e o regulador de pressão (B1), próximo ao cilindro de hidrogênio.
- 6) Girar o manípulo do regulador (B1) lentamente (sentido horário) até o manômetro da esquerda indicar a pressão desejada, em seguida fechar esse (sentido anti-horário).
- 7) Fechar o registro (V2) entre o tubo onde estão armazenadas as fibras e o regulador de pressão de pressão.

Seguidos todos os procedimentos, as fibras devem ficar armazenadas por um período mínimo de duas semanas.

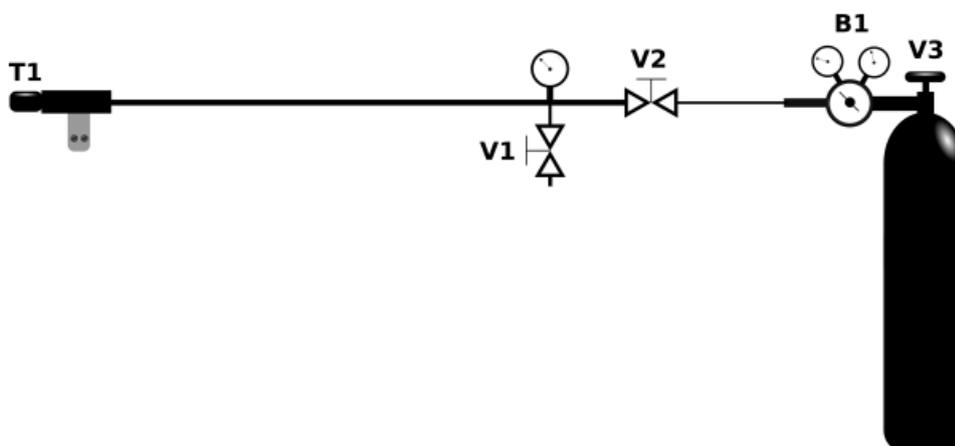


Fig. 3.1: Sistema de Hidrogenação

3.2 Interferômetro com 3 Graus de Liberdade

O sistema experimental utilizado na UTFPR para a produção de redes de Bragg faz uso de um interferômetro de Talbot modificado que emprega uma máscara de fase como divisor de feixe [17]. Todos os componentes utilizados na montagem do interferômetro estão indicados no diagrama esquemático mostrado na figura 3.2.

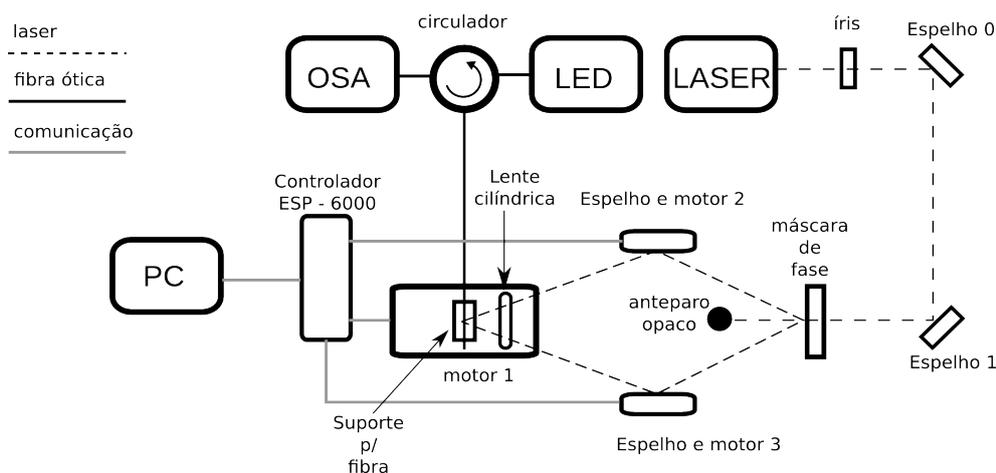


Fig. 3.2: Sistema de gravação de redes de Bragg

Primeiro ajusta-se o laser (New Wave Nd:Yag 266nm Tempest 20) sobre dois suportes de granito, fazendo com que o feixe saia com altura de 11,8 cm (altura de todos os componentes onde o laser incidirá) em relação a bancada. Em seguida, coloca-se um diafragma ajustável (íris) com abertura mínima de 0,7 mm em frente ao feixe para que se possa ajustar seu diâmetro e também selecionar sua parte espacial de melhor qualidade. O feixe é desviado por um espelho 0, colocado a um ângulo de 45° e incide sobre outro espelho 1, com ângulo de 45° para novamente mudar a trajetória do feixe, ficando paralelo à saída do laser.

Após ser refletido pelo espelho 1, o feixe é difratado pela máscara de fase (Ib-sen - com período de 1050.5nm) que está montada em um suporte (com ajuste de XYZ) acoplado a um goniômetro (OPTRON - GN1-60). A ordem zero é bloqueada por um anteparo opaco e as ordens ± 1 difratadas pela máscara são refletidas pelos espelhos 2 e 3 que estão acoplados aos motores 2 e 3 (NEWPORT - M-495CC) com

deslocamento angular. Os feixes de ordem ± 1 , após serem refletidos pelos espelhos, passam pela lente cilíndrica (Newport-CSX050 25.4x50.8x50.2 FL) montada em um suporte (NEWPORT - VGN-1) e são recombinados sobre a fibra, presa por dois ímãs ao suporte com sulco em “V” acoplado a um goniômetro (OPTRON - GN1-60), e a um suporte (micro-controle) com três graus de liberdade movido por um motor com deslocamento linear (NEWPORT - URM-8.25).

Depois de montar todos os componentes necessita-se alinhar o interferômetro. Primeiro certifica-se que o feixe que está chegando na máscara está paralelo ao feixe de saída e com a mesma altura deste. Após isto faz-se com que o feixe que chega à máscara passe por um orifício de ≈ 1 mm em um pedaço de papel branco posicionado antes da máscara. Observa-se as reflexões produzidas e faz-se com que elas retornem pelo mesmo caminho do feixe incidente garantindo o alinhamento da máscara de fase. Em seguida mede-se a altura das ordens ± 1 antes e depois de serem refletidas pelos espelhos 2 e 3, caso sejam diferentes ajusta-se estes espelhos. Após o ajuste da altura dos feixes faz-se a verificação da superposição sobre a fibra e a focalização. O ajuste da superposição é feito inclinando a lente cilíndrica fazendo com que os feixes de ordem ± 1 projetados sobre um papel branco no suporte da fibra, com isto observa-se os dois feixes separados, com isso faz-se os ajustes para que fiquem alinhados verticalmente, em seguida ajusta a lente para que haja a sobreposição dos feixes. O passo seguinte, consiste em gravar algumas redes para confirmar e refazer possíveis ajustes no alinhamento.

3.3 Interferômetro com 4 Graus de Liberdade

Para possibilitar a gravação de redes de Bragg com deslocamento do feixe, foi necessário instalar um quarto motor (Newport - MFA-CC) com curso total de 25 mm, acoplado ao espelho 1 da figura 3.2, permitindo varrer toda a máscara de fase. Para a instalação do quarto motor foi necessária a confecção de alguns suportes que permitam a movimentação do espelho 1, e de um espelho extra que pode ser utilizado

para desviar o feixe do laser para outros sistemas de gravação, são eles o sistema de gravação direto com máscara de fase, o para LPG e um sistema com interferômetro com ajustes manuais utilizado para gravação de redes de Bragg na faixa de $1300nm$. A movimentação do espelho 1 faz com que o feixe laser efetue uma varredura sobre a máscara de fase, deslocando o padrão de interferência ao longo da fibra, e assim possibilitando a gravação de redes de Bragg mais longas. Além disso, por meio da escolha adequada do perfil de velocidade de deslocamento do motor é possível produzir redes de Bragg apodizadas.

3.4 Automatização do Sistema de Gravação

Como visto anteriormente, uma das vantagens do método de gravação de redes de Bragg por interferômetro é a sua elevada flexibilidade. Para maximizar a capacidade do sistema descrito no item 3.2, optou-se por controlá-lo totalmente por computador. Assim, foi desenvolvido um modelo teórico da montagem experimental, baseando-se em trabalhos publicados em [46], [17], [60] e [61], para que este pudesse ser implementado num software de controle de todos os posicionadores.

As equações foram desenvolvidas de maneira a determinar dependência do comprimento de onda de gravação com os parâmetros físicos dos elementos que compõem a montagem. Para isso, foi analisada a dependência do ângulo de incidência na fibra, α , com o ângulo δ entre o espelho 2 e o eixo X (ver figura 3.2). Analogamente, o estudo também é válido para o espelho 3. Neste caso, tendo em conta a simetria do sistema, o ângulo do espelho 3 terá que ser $\delta' = -\delta$. Por uma questão de simplificação de notação, a partir de agora será apenas referido o ângulo δ , como pode ser observado na figura 3.3.

Com a radiação UV em incidência normal à máscara de fase, $\theta_i = 0$, a radiação difratada é dividida nas ordens $m = 0, \pm 1$ entre outras. Um padrão de interferência pode ser criado na fibra pela superposição dos feixes de ordens ± 1 . O período da rede Λ está relacionado ao ângulo de difração, θ_m [61], que é dado por:

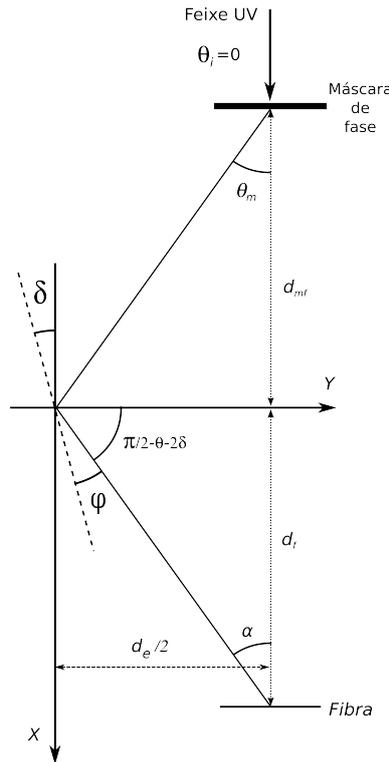


Fig. 3.3: Representação dos ângulos envolvidos no percurso óptico do interferômetro. d_e : distância entre os espelhos; d_f : distância entre a fibra e os espelhos, ao longo do eixo X; d_{mf} : distância entre a máscara e os espelhos, ao longo do eixo X.

$$\Lambda_{mf} = \frac{m \cdot \lambda_{UV}}{\text{sen}\theta_m - \text{sen}\theta_i} \quad (3.1)$$

Quando $\theta_i = 0$ e $m = \pm 1$,

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \cdot \text{sen}\theta_m} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (3.2)$$

$$\theta_m = \text{arcsen} \left(\frac{\lambda_{UV}}{2 \cdot \Lambda} \right) \quad (3.3)$$

$$\theta_m = \text{arcsen} \left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_m} \right) \quad (3.4)$$

onde θ_m é o ângulo da m -ésima ordem difratada e λ_{UV} o comprimento de onda do laser.

Agora substituindo a equação 3.3 na equação 2.5 para encontrar o comprimento de onda de Bragg $\lambda_{B_{mf}}$ obtém-se

$$\lambda_{B_{mf}} = n_{eff} \left(\frac{\lambda_{UV}}{\text{sen}\theta_m} \right) \quad (3.5)$$

Após determinar o comprimento de onda $\lambda_{B_{mf}}$ que seria gravado utilizando um sistema de gravação direto com máscara fase.

Analisando a figura 3.3, para o caso em que $\theta_m \neq \alpha$ tem-se que

$$\delta + \theta_m + \pi/2 + (\pi/2 - \theta_m - 2.\delta) + \varphi = \pi \quad (3.6)$$

$$\delta + \pi - \theta_m - 2.\delta) + \varphi = \pi \quad (3.7)$$

$$\varphi = \delta + \theta_m \quad (3.8)$$

$$\alpha = \delta + \varphi \quad (3.9)$$

$$\alpha = 2.\delta + \theta_m \quad (3.10)$$

onde δ é o ângulo que deverão ser rotacionados os espelhos 2 e 3. Com isso substituindo 3.10 e 3.3 na equação 2.5 temos

$$\lambda_B = \frac{n_{eff}.\lambda_{UV}}{\text{sen}(\alpha - 2.\delta)} \quad (3.11)$$

onde λ_B é o comprimento de onda que deseja-se gravar.

Agora encontra-se o valor de d_f , dado por

$$d_f = \frac{(\cot\alpha).d_e}{2} \quad (3.12)$$

onde d_e , é a distância entre os espelhos 2 e 3. Com isso chega-se as relações importantes para construção do sistema de controle apresentado na figura 3.4 e descrito no apêndice A.

Para o caso particular em que o ângulo de difração θ_m é igual ao ângulo α de cruzamento dos feixes de ordens ± 1 na fibra, refletidos pelos espelhos 2 e 3, em que estes estão paralelos entre si e as distâncias da máscara ao centro dos espelhos e deste à fibra são iguais ($d_{mf} = d_f$).

$$\text{sen}\alpha = \frac{n_{eff}.\lambda_{UV}}{\Lambda} \quad (3.13)$$

$$\text{sen}\alpha = \frac{\lambda_{UV}}{\lambda_B/2n_{eff}} \quad (3.14)$$

$$\alpha = \arcsen\left(n_{eff}\frac{\lambda_{UV}}{\lambda_B}\right) \quad (3.15)$$

A distância d_{mf} , do centro dos espelhos 2 e 3 à máscara de fase será dada por:

$$d_{mf} = \frac{d_e/2}{\tan\theta_m} \quad (3.16)$$

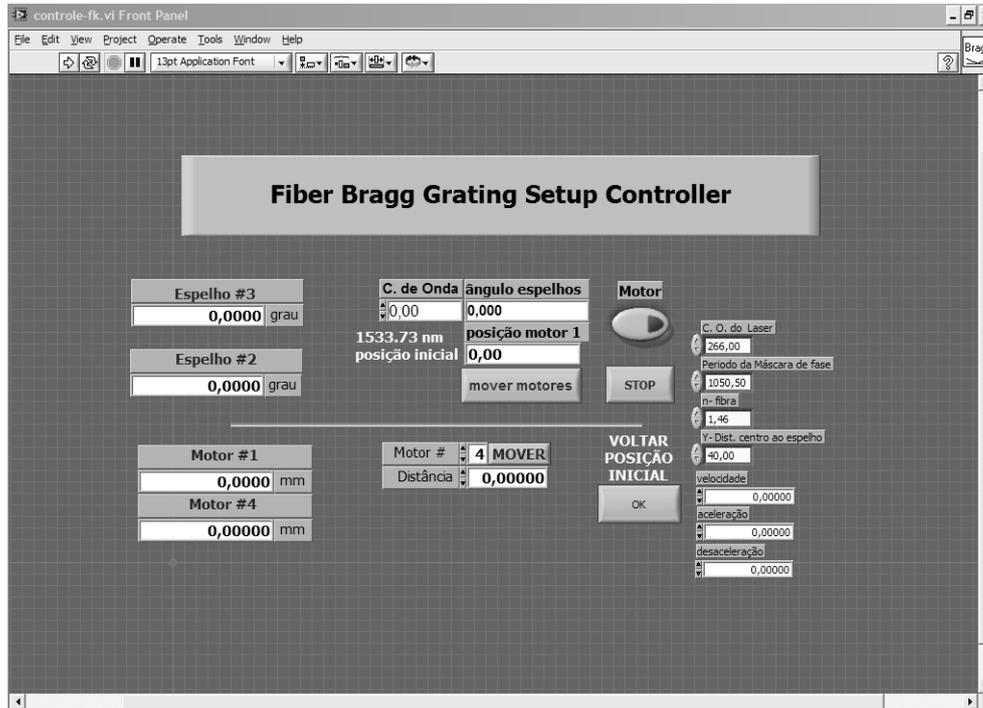


Fig. 3.4: Sistema de controle do interferômetro para gravação de redes de Bragg.

O sistema de controle da figura 3.4 permite de forma simples alterar a posição dos motores utilizados e, assim, o comprimento de onda da rede a ser gravada. Como os ângulos encontrados estão em radianos, então necessita-se converter para graus, que é a unidade utilizada pelo controlador dos motores.

Para completar o sistema de controle implementou-se um sistema de leitura (ver figura 3.5) que interliga um computador ao OSA, permitindo observar a dinâmica de crescimento das redes e também armazenar os dados referentes à gravação tais como, tempo de gravação, comprimento de onda de pico da rede, refletividade e largura de banda a meia altura. A interface do sistema de leitura é apresentada na figura 3.5, de onde se identifica a evolução típica de uma rede sendo gravada. As telas com a estrutura de construção do sistema podem ser vistas no apêndice B.

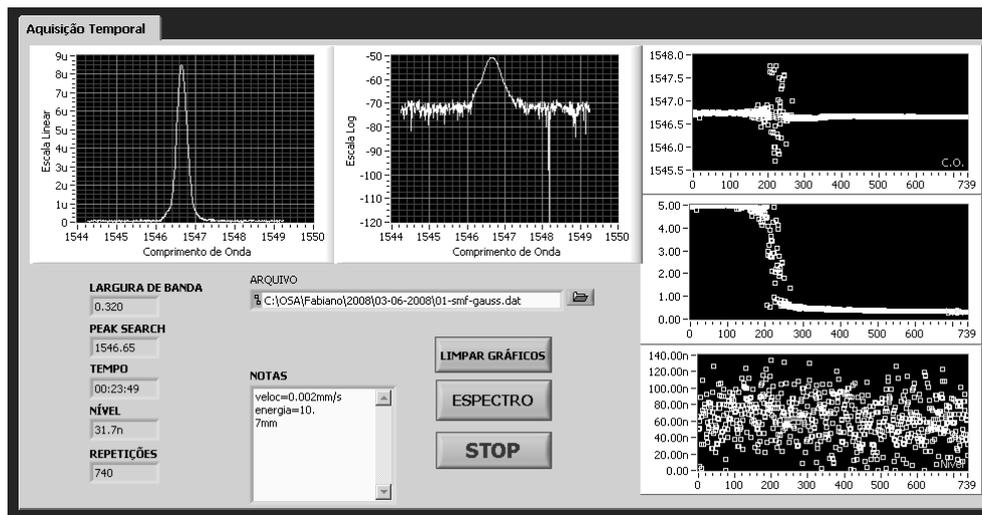


Fig. 3.5: Sistema de monitoração para gravação de redes de Bragg.

3.5 Implementação de Perfis de Velocidade

Alguns perfis de velocidade foram implementados no sistema de controle, para possibilitar a gravação de redes de Bragg apodizadas, além das conseguidas com o deslocamento linear, tanto no sistema com interferômetro quanto no direto com máscara de fase. Para o perfil gaussiano foram implementadas todas as alterações de velocidade que serão realizadas dentro do software de controle, ficando disponível para o usuário do sistema somente a mudança do comprimento da rede, número de pontos de mudança de velocidade e o tempo de gravação.

Para o perfil trapezoidal foram implementadas no software funções para as mudanças de velocidade seguindo o perfil. Neste o usuário tem um número maior de parâmetros a serem alterados para a gravação, para isto a rede é dividida em três partes, a primeira parte representa 1/3 da curva de uma função trapezoidal, a segunda representa a parte superior da curva e a terceira representa o restante da curva, assim tem-se três velocidades e comprimentos que podem ser informados ao software para a gravação de uma rede seguindo este perfil. As interfaces de controle destes perfis podem ser observadas no apêndice C.

3.6 Gravação de Redes de Bragg com máscara de fase

Para gravação de redes utilizando a técnica de escrita direta com máscara de fase, foi implementada uma modificação no sistema de gravação apresentado na figura 3.6 que permite a gravação das redes tanto pela técnica de máscara de fase quanto pela técnica interferométrica com máscara de fase. Um suporte com espelho móvel foi montado sobre o motor (4). Este espelho redireciona a luz do laser fazendo-a incidir sobre a montagem óptica contendo uma lente cilíndrica (com distância focal de 6cm), uma máscara de fase (Ibsen-1050,5nm) e o suporte com a fibra óptica a ser gravada como pode ser observado na figura 3.6.

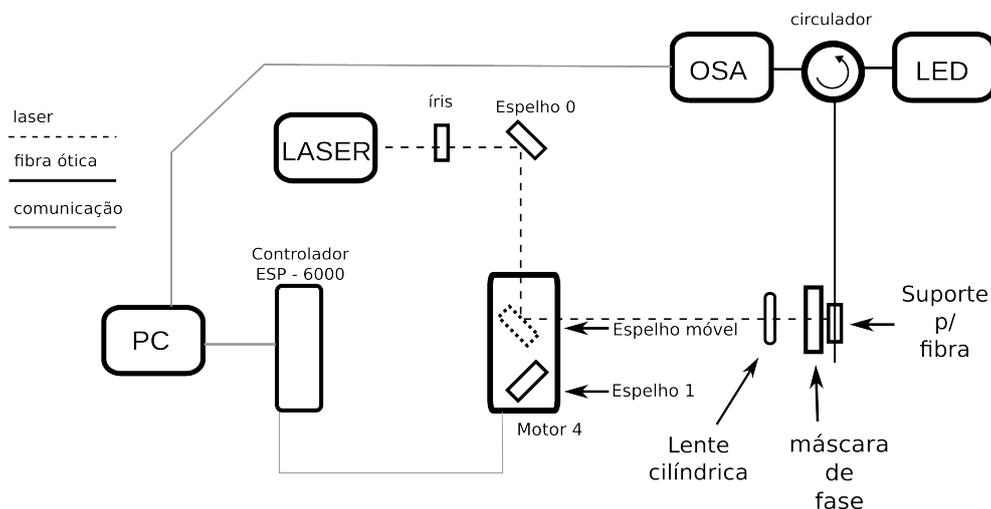


Fig. 3.6: Sistema de gravação de redes de Bragg direto com máscara de fase.

Com isto tem-se um sistema de gravação com máscara de fase direta. Utilizando-se do sistema de controle da figura 3.4, pode-se transladar o espelho móvel com velocidade constante ou utilizando perfis de velocidade fazendo com que o feixe UV, focalizado pela lente cilíndrica, faça uma varredura sobre máscara de fase e o padrão de interferência se desloque ao longo do comprimento da fibra. Com isto é possível produzir redes mais longas em relação às gravadas no sistema com interferômetro, sendo o comprimento destas limitado pelas dimensões da máscara de fase e/ou pelo curso do motor (4).

3.7 Gravação de Redes de Período Longo

Devido a versatilidade conseguida com a implementação do quarto motor, um sistema de gravação de rede de período longo, foi implementado usando a técnica de exposição ponto-a-ponto, visto figura 3.7. A implementação deste sistema é baseado no desvio do feixe através do espelho móvel, cujo suporte encontra-se acoplado ao motor 4.

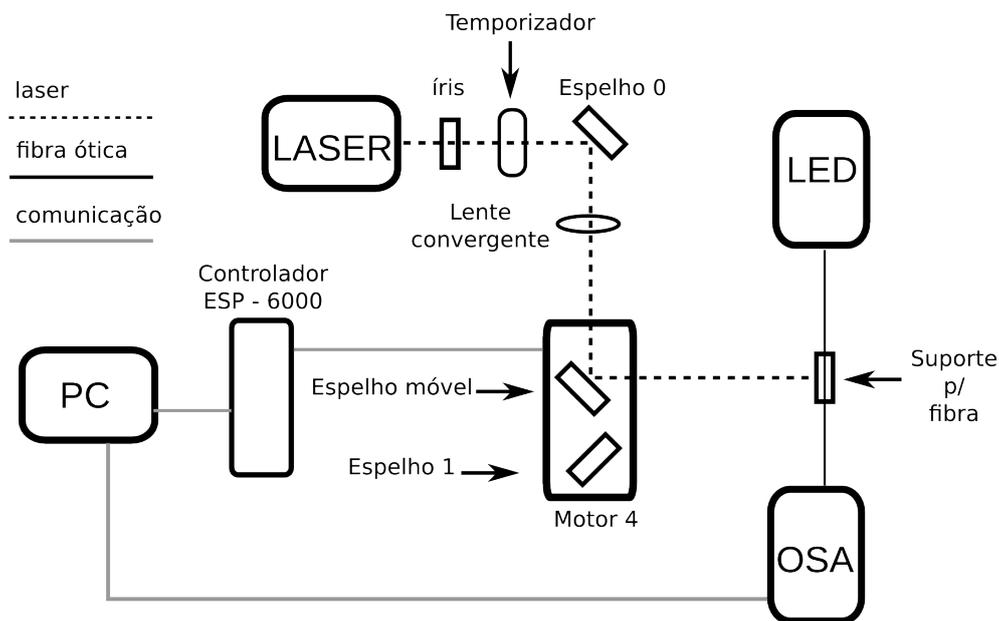


Fig. 3.7: Sistema de gravação de redes de período longo (LPG).

O sistema de gravação consiste na técnica de incidência lateral de radiação UV ponto-a-ponto ao longo do comprimento da fibra óptica. O feixe laser é desviado por meio do espelho móvel cujo suporte encontra-se acoplado ao motor 4, sendo focalizado por uma lente convergente (com 60cm de distância focal) diretamente sobre a fibra, como pode ser observado na figura 3.7 que apresenta um diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação utilizados. Decorrido o tempo de incidência no primeiro ponto, um temporizador programável com acionamento manual (Newport Model 845, Digital Shutter Controller) obstrui o feixe de UV e um estágio de translação movido pelo motor 4, desloca o espelho móvel por uma distância igual ao período da rede. Uma vez reposicionado o espelho móvel, aciona-se manualmente o temporizador para

liberar o feixe de UV que deverá incidir no ponto seguinte, pelo tempo programado, até obstruir novamente o feixe.

Assim o processo é repetido até que todos os pontos da rede estejam gravados. Nesse processo de gravação, o período da LPG pode ser mudado alterando-se o passo do estágio de translação, movido pelo motor 4, sobre o qual fica montado o espelho móvel. Para acompanhar a evolução da gravação é empregado um sistema de leitura, composto por um LED super luminescente (Superlum Pilot-2), operando na faixa de 1445nm a 1645nm e um analisador de espectros ópticos (OSA). O LED é utilizado como fonte da luz a ser transmitida na fibra e a outra extremidade da fibra é conectada ao OSA. A observação da razão, entre o sinal do espectro de transmissão da rede e o sinal do espectro do LED, em tempo real no OSA, permite acompanhar visualmente o processo de crescimento das LPGs.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 FBG em Fibras SMF

Com o interferômetro descrito no item 3.2 do capítulo 3 foram gravadas inúmeras redes em fibra SMF (fibra monomodo padrão de telecomunicações) hidrogenada em diferentes comprimentos de onda, para as mais diversas aplicações dentro do grupo de pesquisa. Alguns resultados obtidos nestas gravações podem ser observados na tabela 4.1 onde compara-se o comprimento de onda de Bragg (λ_B) informado ao sistema de controle com o obtido na gravação (λ).

Como observa-se na tabela 4.1, o sistema implementado mostrou-se muito eficiente para a gravação em diferentes comprimentos de onda, pois permite sua alteração com facilidade. Mesmo havendo um desvio médio de 0,64nm, entre o comprimento de onda indicado ao sistema e o obtido, é possível fazer a correção e assim gravar as redes no comprimento de onda desejado. Mas além dos ajuste no comprimento de onda de gravação é necessário considerar o deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à saída do hidrogênio da fibra. Dados obtidos para redes gravadas neste sistema mostram um deslocamento total de aproximadamente 1,2 nm [62] para menores comprimentos de onda, 18 dias após a gravação de redes em fibra SMF, com isso pode-se estimar o comprimento de onda que deverá ser gravado, para posterior utilização no comprimento de onda desejado. Com isto é possível utilizar estas

Tab. 4.1: Tabela com resultados de gravações em fibras SMF, com λ_B informado ao software de controle, λ_B obtido na gravação, diferença entre eles $\Delta\lambda_B$, refletividade, largura de banda $\Delta\lambda$ e tempo de gravação.

$\lambda_B(nm)$	λ_B obtido (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Reflet. (dBm)	Tempo (s)
1545	1544,45	0,55	0,20	22	2557
1545	1544,61	0,39	0,28	29	3065
1545	1544,55	0,35	0,38	21	1767
1545	1544,29	0,71	0,26	27	2565
1471	1470,03	0,97	0,37	26	1541
1470	1469,15	0,85	0,37	25	1270

fibras, lembrando que elas necessitarão de um tratamento prévio para a retirada do hidrogênio antes de serem utilizadas. Com o uso da tabela 4.1 também pode-se verificar que com o aumento no tempo de gravação tem-se redes com maior refletividade, chegando a um limite de saturação que provoca um alargamento da rede que em algumas aplicações é indesejado.

Observa-se também na tabela 4.1 que as refletividades obtidas diretamente do OSA, tem valores próximos para as diferentes redes mostrando que o sistema é reprodutível independente do comprimento de onda, e que os valores com pequenas diferenças podem ser justificados pela diferença no tempo de gravação que não é o mesmo para todas as redes, e além disso outro parâmetro que também pode influenciar é a posição vertical da fibra no suporte, não havendo uma referência precisa para seu posicionamento.

Na figura 4.1 pode-se observar o espectro de crescimento de uma rede, ele é um dos parâmetros importantes para a gravação pois consegue-se observar se a rede está próximo da saturação, assim evita-se causar um maior dano a fibra devido ao excesso de exposição ao laser de gravação, fragilizando a fibra mecanicamente. Outro parâmetro monitorado, mostrado na figura 4.2, é a largura de banda a meia altura.

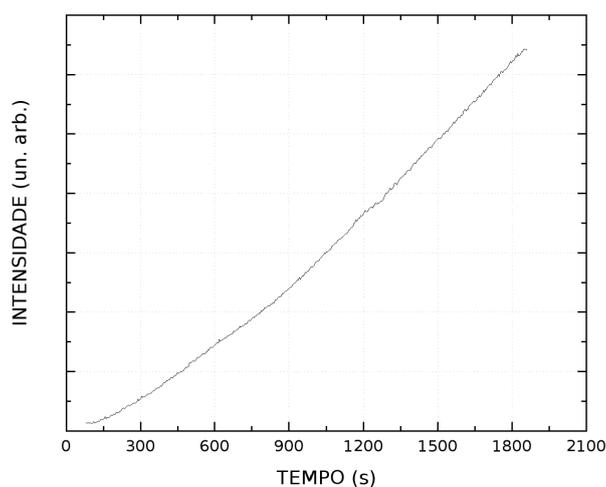


Fig. 4.1: Crescimento da rede.

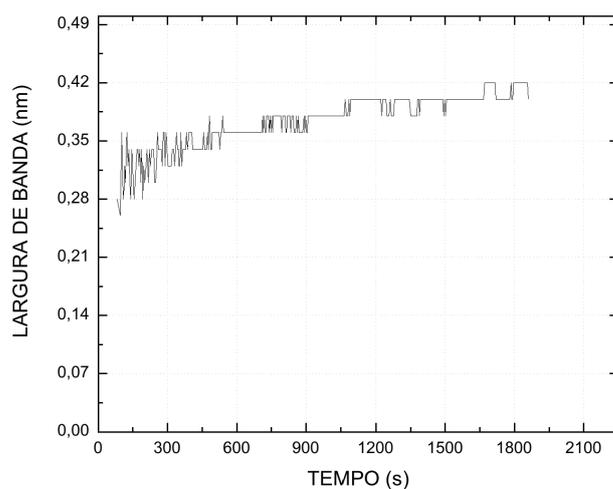


Fig. 4.2: Largura de banda da rede.

Devido a muitas aplicações necessitarem de redes para serem utilizadas como sensor codificado em comprimento de onda, nesse caso a rede atuará de maneira análoga a um ponteiro. Assim quanto mais estreita melhor será, pois pequenas variações na posição de pico poderão ser detectadas.

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos com o sistema de gravação

implementado, são mostrados nas figuras 4.3 e 4.4 os espectros de duas redes gravadas.

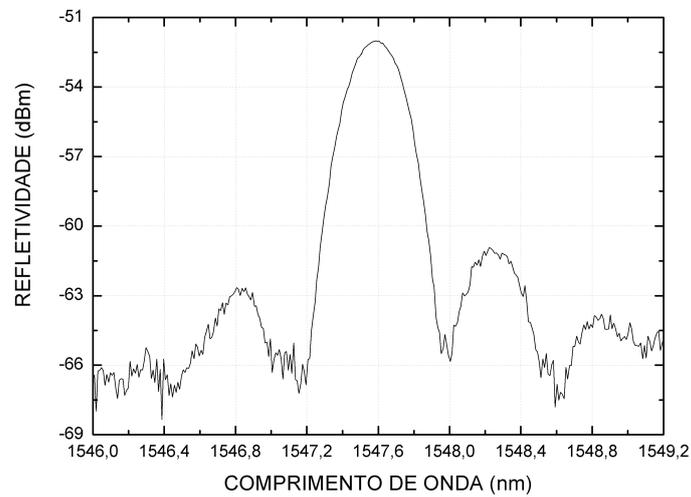


Fig. 4.3: Rede de Bragg gravada utilizando o sistema de controle implementado, com largura de banda de 0,29 nm e comprimento de onda de pico em 1547,59 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).

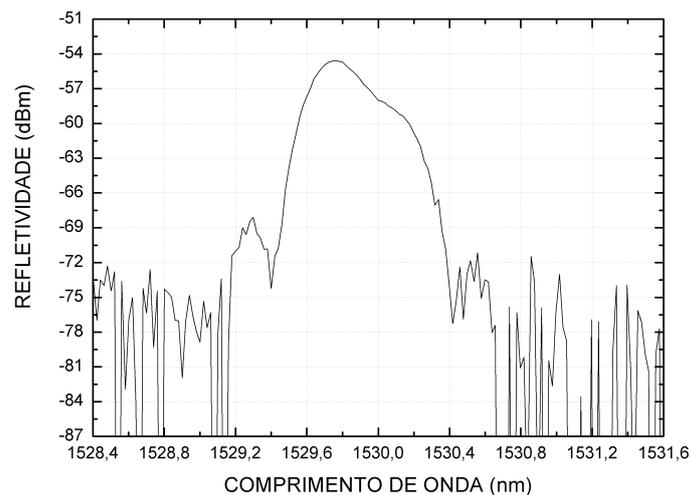


Fig. 4.4: Rede de Bragg gravada utilizando sistema de controle anterior a este trabalho. Largura de banda de 0,42 nm e comprimento de onda de pico em 1529,75 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).

A rede da figura 4.3 foi gravada utilizando o sistema de controle implementado 3.4 e a da figura 4.4 com o sistema de controle anteriormente utilizado no interferômetro, ambas com mesma abertura de íris (2,5 mm) e feixe laser parado. Facilmente observa-se que a rede gravada com o sistema implementado apresenta um espectro mais simétrico. Isso se deve a um melhor ajuste do interferômetro, independente do comprimento de onda que se deseja gravar, o que não acontecia com o sistema anterior.

4.2 FBG com Apodização

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os resultados obtidos utilizando perfis de velocidade para a gravação de redes de Bragg. Na figura 4.5 observa-se o exemplo de uma rede gravada com deslocamento do feixe de gravação a velocidade constante.

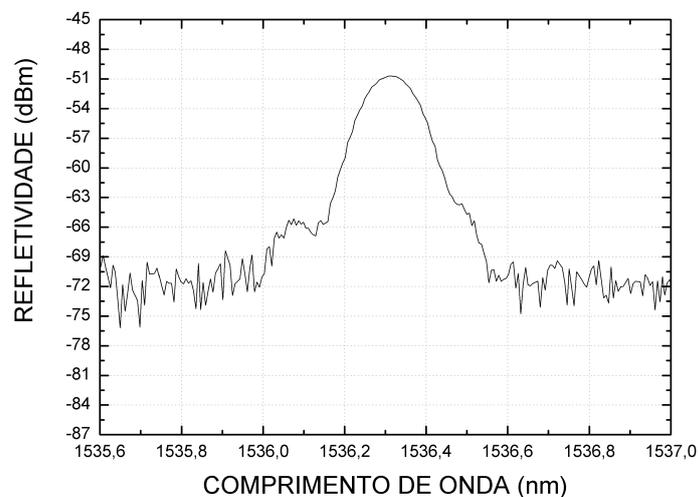


Fig. 4.5: Rede de Bragg, gravada com deslocamento linear do feixe laser. Largura de banda de 0,15 nm e comprimento de onda em pico de 1536,31 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).

Como esperado, a rede de maior comprimento, 7 mm, possui uma largura de banda menor que uma rede gravada com 2,5 mm (figura 4.3).

Nas figuras 4.6 e 4.7 são apresentados os resultados obtidos para redes gravadas

utilizando os perfis de velocidade implementados sendo todas gravadas com 7mm de comprimento.

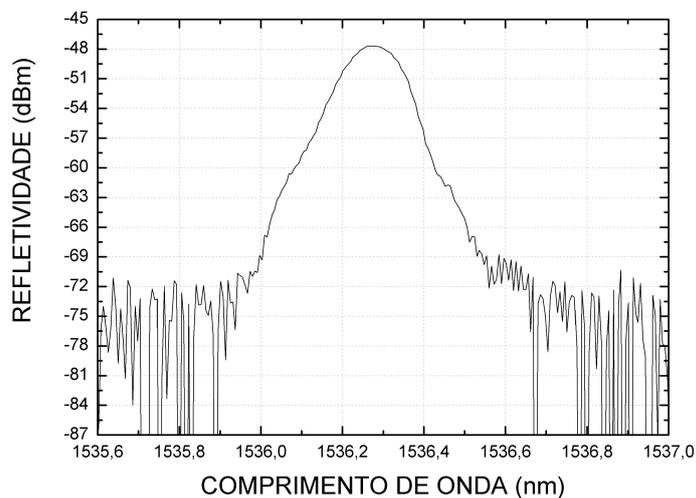


Fig. 4.6: Rede de Bragg, gravada com deslocamento gaussiano do feixe laser. Largura de banda de 0,16 nm e comprimento de onda de pico em 1536,27 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).

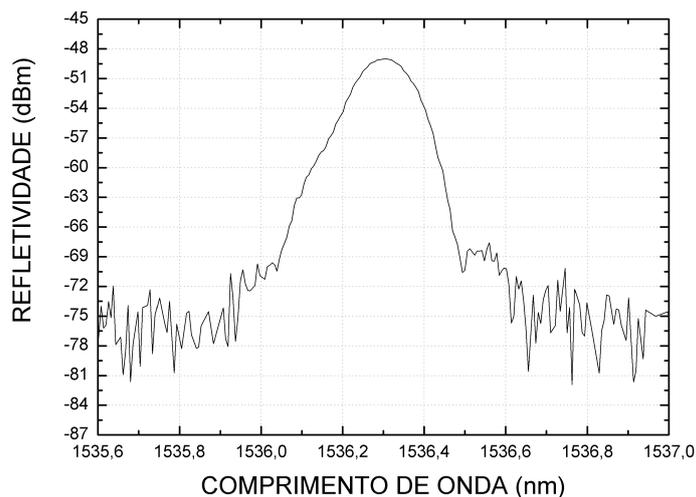


Fig. 4.7: Rede de Bragg, gravada com deslocamento trapezoidal do feixe laser. Largura de banda de 0,16 nm e comprimento de onda de pico em 1536,3 nm (utilizando resolução do OSA de 0,07 nm).

Redes gravadas utilizando os perfis de velocidade gaussiano e trapezoidal apresentam uma diminuição nos lóbulos laterais, em relação as redes gravadas com deslocamento à velocidade constante (figura 4.5). Os graficos de crescimento e largura de banda na gravação de uma rede com deslocamento do feixe, utilizando o perfil de velocidade gaussiano são mostrados respectivamente nas figuras 4.8 e 4.9.

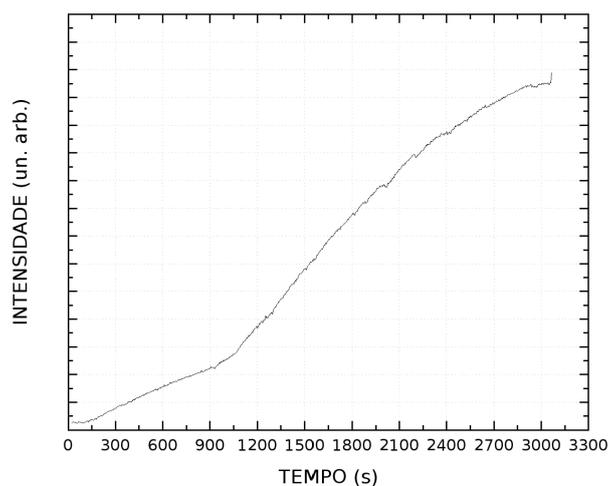


Fig. 4.8: Crescimento de uma rede de Bragg gravada em fibra fotossensível.

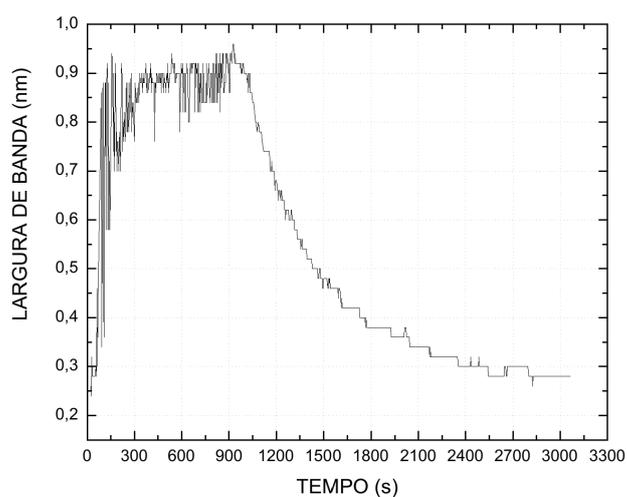


Fig. 4.9: Largura de banda de uma rede de Bragg gravada em fibra fotossensível.

O sistema de gravação implementado, além de permitir gravar redes de Bragg com diferentes perfis de velocidade, também gerou redes com maior definição no espectro com possibilidade ou não de redução dos lóbulos laterais. A diminuição dos lóbulos laterais em relação ao pico da rede facilita na determinação do deslocamento do pico efetivo da rede. Pois dependendo da amplitude destes lóbulos, eles podem causar deformações indesejáveis no pico principal, e então erros de leituras durante medidas em aplicações específicas, que seriam afetadas por uma determinação errônea da posição do pico de reflexão.

Embora se tenha conseguido escrever redes com a redução dos lóbulos laterais, a gravação utilizando estes perfis de velocidade não reproduz redes com espectros iguais aos perfis de apodização desejados (perfis gaussiano e trapezoidal). Contudo, qualitativamente obteve-se um sistema que, ao usar dos perfis de velocidade disponíveis durante a gravação, consegue-se produzir redes com supressão dos lóbulos laterais.

4.3 FBG em Fibra Fotossensível

Os mesmos procedimentos adotados na gravação em fibras SMF foram utilizados para as fibras fotossensíveis, com exceção da hidrogenação. A tabela 4.3 permite identificar a diferença entre o comprimento de onda (λ_B) indicado ao sistema de controle e o medido pelo sistema de leitura (λ_g).

Para as redes em fibras fotossensíveis observou-se um desvio médio de 0,56nm entre o comprimento de onda desejado e o obtido na gravação. Assim, pode-se considerar que o desvio médio é igual independente do tipo de fibra utilizada na gravação.

A utilização de fibras fotossensíveis, em detrimento a fibras SMF hidrogenadas, ocorre quando se quer utilização imediata da rede após a gravação. Isso não ocorre para fibras hidrogenadas que sofrem um deslocamento na posição do pico de reflexão da rede destas últimas devido à saída do hidrogênio da fibra [31], necessitando um tratamento prévio para que haja a total saída do hidrogênio.

Tab. 4.2: Tabela com resultados de gravações em fibras fotossensíveis, com λ_B informado ao software de controle, λ_B obtido na gravação, diferença entre eles $\Delta\lambda_B$, refletividade, largura de banda $\Delta\lambda$ e tempo de gravação.

λ_B (nm)	λ_B obtido (nm)	$\Delta\lambda_B$ (nm)	Reflet. (dBm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Tempo (s)
1541	1540,61	0,39	26	0,56	1180
1541	1540,50	0,50	21	0,42	1860
1545	1544,78	0,62	23	0,62	1684
1549	1548,48	0,52	27	0,62	1777
1557	1556,23	0,77	29	0,64	2409

4.4 FBG em Fibra HiBi

Os espectro de duas redes gravadas em fibra com alta birrefringência são mostrados nas figuras 4.10 e 4.11. A rede da figura 4.10 foi gravada utilizando uma fibra HiBi Thorlabs (Bow Tie), laser com diâmetro do feixe de 2,5 mm e sem deslocamento. A rede da figura 4.11 foi produzida utilizando 1 mm para diâmetro do feixe e deslocamento do feixe de escrita de 5 mm a uma velocidade constante de 0,002 mm/s.

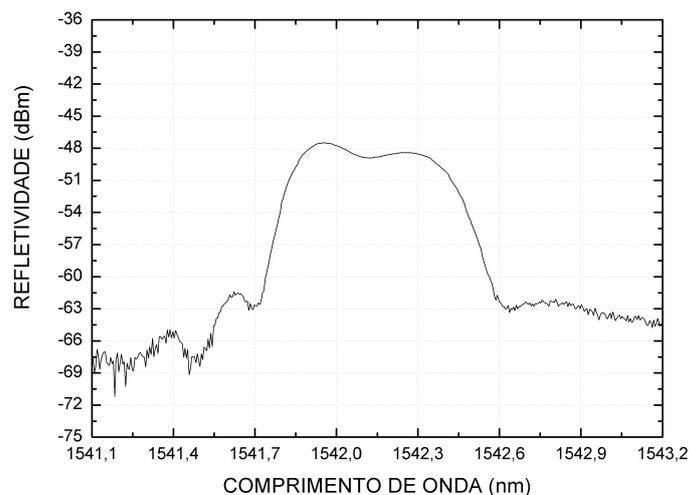


Fig. 4.10: Rede gravada em fibra HiBi com feixe fixo

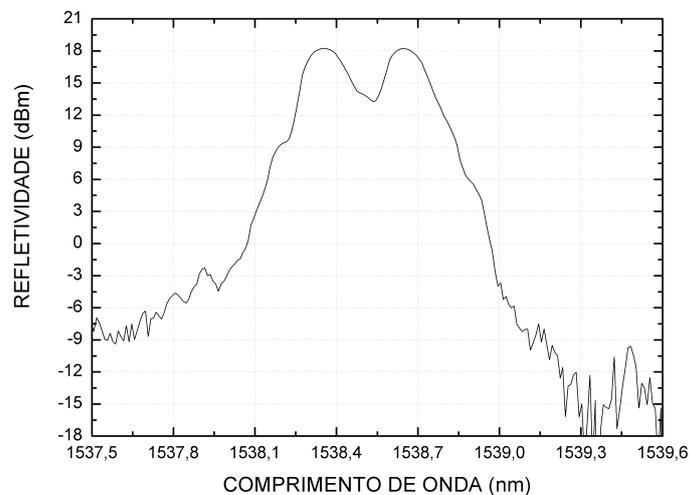


Fig. 4.11: Rede gravada em fibra HiBi com deslocamento do feixe

Devido ao maior comprimento da rede da figura 4.11 em relação à rede da figura 4.10 gravada com feixe parado, a primeira apresenta uma largura de banda menor e um espectro com melhor definição dos picos de reflexão (para os planos de polarização X e Y). Nesses experimentos não foi utilizado um controlador de polarização, por isso, os picos de reflexão da mesma não estão com a mesma amplitude.

4.5 FBG em Fibra com Alta Dopagem de Germânio

Em outra gravação, figura 4.12 mostra o espectro de reflexão de uma rede para aplicação na área de telecomunicações. Neste caso a rede foi gravada com grande largura de banda (≈ 14 nm) para ser utilizada como filtro em sistema CWDM. Os sistemas CWDM possuem uma separação entre canais de 20 nm por isso a necessidade de redes tão largas em comparação com as demais gravadas durante este trabalho. Devido a isto utilizou-se fibras com alta dopagem de germânio, por possuírem uma grande fotossensibilidade comparadas a fibras fotossensíveis comuns.

Para gravação de uma rede com esta largura de banda no sistema implementado não é possível gravá-la iluminando somente um ponto e com uma máscara de fase uni-

forme. Por isto foi utilizada uma máscara de fase com gorjeio (chirp) de 10nm/cm. Com isto conseguiu-se inicialmente uma rede com largura de banda de 2,7 nm. Para aumentar esta largura, após a saturação da rede em um primeiro processo de gravação, deslocava-se o feixe de escrita para que outra rede fosse gravada ao lado. Com seu alargamento obtém-se a união com a anterior, formando uma rede com maior largura. Assim, esse processo é sucessivamente repetido sucessivamente até atingir o valor requerido.

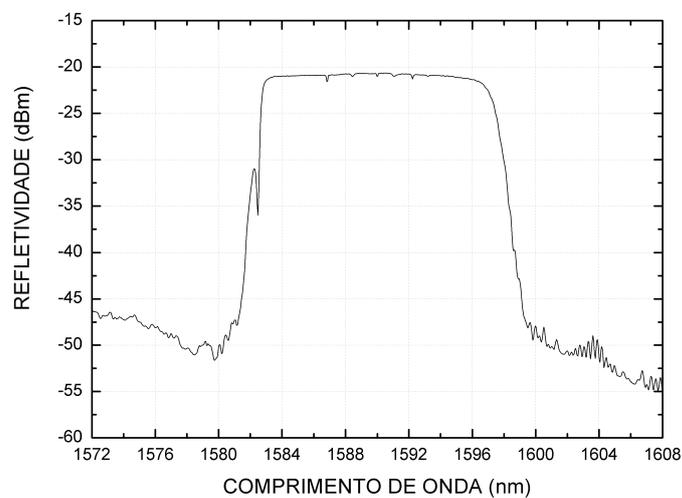


Fig. 4.12: Espectro de uma rede escrita em fibra com alta dopagem de germânio (medida com resolução do OSA de 0,07 nm).

O espectro da figura 4.12 possui vários vales e são devidos a não continuidade nas várias redes que são gravadas para se conseguir uma única com grande largura de banda. Ao se gravar várias redes com deslocamentos não contínuos, aparecem diferenças de fase entre elas, que provocam os vales no espectro.

4.6 FBG com Diferentes Comprimentos

Três FBGs foram escritas com iluminação direta da máscara de fase, os espectros correspondentes são apresentados na figura 4.13. Estas FBGs foram produzidas com

os mesmos parâmetros (diâmetro do laser de 0,1 mm e intensidade de $\approx 200 \text{ mJ/cm}^2$), diferindo apenas no comprimento total da rede. A rede (a) foi gravada com o espelho móvel da entrada do interferômetro em uma posição fixa, e assim o seu comprimento é limitado apenas pelo diâmetro da íris (2 mm). Para gravar as redes b e c esse espelho foi movido a uma velocidade constante (0,002 mm / s), resultando respectivamente redes com comprimento total de 10 mm e 15 mm. As redes a, b, c tem comprimento de onda de pico de 1520,4 nm, 1521,6 nm e 1521,5 nm; largura de banda de 0,22 nm, 0,145 nm e 0,115 nm; reflectividade de 24 dB, 23 dB e 26 dB, respectivamente. Os espectros foram gravados com o OSA ajustado para resolução de 0,07 nm.

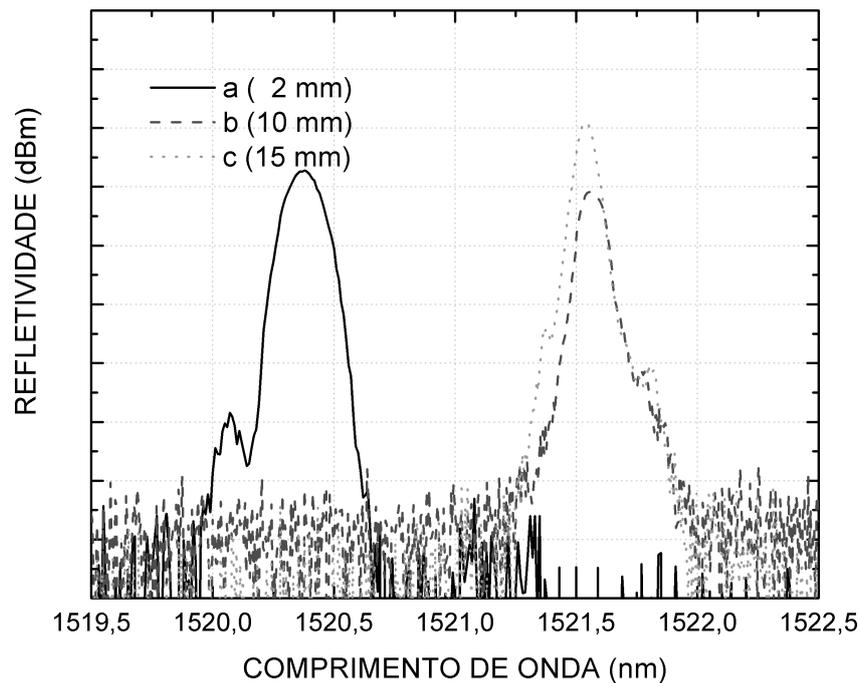


Fig. 4.13: Redes de Bragg gravadas com iluminação direta da máscara de fase.

4.7 LPG em Fibra Fotossensível

Na figura 4.14 observa-se o espectro de uma das redes de período longo, gravadas utilizando o sistema implementado [63]. A rede foi gravada em fibra Centaurus fotossensível hidrogenada pela exposição ponto a ponto usando o laser UV. Durante o processo de gravação cada ponto da fibra foi submetido a 4000 pulsos do laser operando com uma frequência de 20 Hz resultando num tempo total de exposição por ponto de 200 segundos.

As características espectrais da rede foram acompanhadas durante o processo de escrita por meio da gravação do espectro de transmissão da LPG a cada 5 pontos.

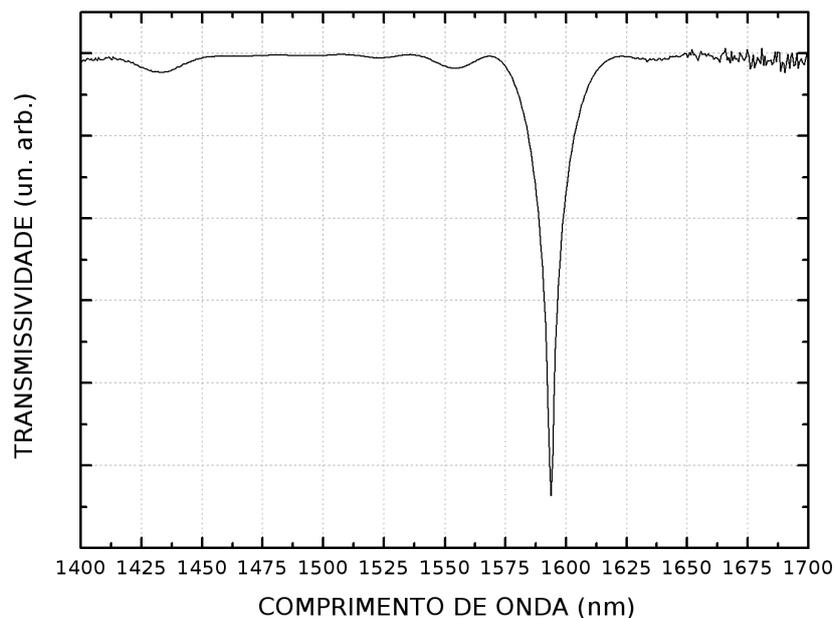


Fig. 4.14: Espectro da razão entre o sinal transmitido pela LPG, durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte óptica LED. LPG com $1,83\text{cm}$ de comprimento, 45 pontos e período de $407\mu\text{m}$ (com resolução do OSA se $0,07\text{ nm}$).

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A integração e o aprimoramento do sistema de produção de redes em fibras ópticas realizada neste trabalho resultou em um sistema versátil e eficiente. O sistema permite gravação de redes de Bragg tanto usando o interferômetro com máscara de fase quanto pela iluminação direta da máscara de fase, além da gravação de redes de período longo pela técnica de exposição ponto a ponto. A mudança do sistema entre uma e outra configuração é realizada com uma simples alteração na direção do feixe laser que não afeta o alinhamento do interferômetro. A automatização do sistema de gravação tornou mais fácil e rápido seu uso uma vez que o alinhamento dos espelhos 2 e 3 é controlado pelo software. Dessa forma, é possível produzir redes de Bragg com diferentes comprimentos de onda com um mínimo de ajustes manuais garantindo rapidez e eficiência no processo de gravação. O sistema permite a obtenção de diferentes comprimentos de onda de Bragg com incrementos de 0,11 nm, limitada pela resolução dos motores utilizados.

A implementação do sistema de leitura permite acompanhar o crescimento da rede durante o processo de gravação. Tal procedimento é importante pois permite ao usuário parar a gravação quando a rede atinge as características desejadas, de comprimento de onda, refletividade e largura de banda. Além disso, torna possível

a otimização do processo de escrita pela escolha de parâmetros de gravação que permitem a produção de redes adequadas para cada aplicação.

O aprimoramento do sistema também foi realizado no sentido de tornar possível a fabricação de redes de Bragg apodizadas usando diferentes perfis de iluminação, que são obtidos por meio do controle da velocidade de deslocamento do feixe laser sobre a máscara de fase. Foi feita uma comparação entre FBGs escritas sem deslocamento do feixe laser e com um perfil gaussiano de velocidade de deslocamento. Na rede obtida com o deslocamento do feixe laser foi observada uma supressão total dos lóbulos laterais, o que evidencia a capacidade do sistema em gravar redes apodizadas.

Para determinar a flexibilidade de escrita do sistema em diferentes fibras foram escritas FBGs em fibras SMF hidrogenadas, fotossensível e birrefringentes. Verificou-se que apesar das diferentes características de cada fibra, poucos ajustes foram necessários para a gravação das redes.

Quando se verifica a reprodutibilidade do sistema, tem-se que redes gravadas com o interferômetro em um dado tipo de fibra e com o sistema de controle ajustado para um comprimento de onda de Bragg fixo apresentaram uma boa reprodutibilidade sendo observado uma diferença menor que 0,2 nm na posição do pico de reflexão nas redes obtidas.

Com o uso da configuração que possibilita a gravação de FBG com a iluminação direta da máscara de fase foram produzidas redes com até 15mm de comprimento total e larguras de banda de até 0,115 nm.

Mostrou-se que é possível obter redes com largura de banda mais estreita deslocando o feixe de escrita e com uso de perfis de velocidade obter-se também uma diminuição dos lóbulos laterais.

Vê-se também que com a troca da máscara de fase por uma máscara com gorjeio (chirp) é possível produzir redes com essa característica, e que devido ao grande gorjeio (chirp) da máscara produziu-se redes com grande largura de banda para uma aplicação específica.

5.2 Trabalhos Futuros

Algumas alterações podem ser feitas de modo a melhorar o sistema de gravação, tornando o processo de alinhamento da fibra mais rápido, por exemplo, a instalação de uma câmera CCD para indicar o real posicionamento da fibra no suporte.

Instalação de um quinto motor acoplado ao suporte da fibra, permitindo gravar redes deslocando o suporte com a fibra e assim obter redes mais longas acima dos 25 mm e limitadas apenas pelas máscaras disponíveis.

Projetar e instalar um suporte para máscaras de fase de fácil substituição e com maior rigidez mecânica, permitindo assim sua troca sem a necessidade de longo período de alinhamento para novas gravações.

Sugere-se ainda a gravação de outros tipos de FBG, visando novas aplicações, por exemplo as TFBG (redes de Bragg inclinadas), com grandes possibilidades de aplicações em medidas de índice de refração.

Implementação de novos perfis de velocidade e aperfeiçoamento dos existentes para poder definir qual apresenta melhor resultado para as aplicações do grupo de pesquisa.

Automatizar o sistema de gravação de LPG para, possibilitar reprodutibilidade em sua gravação.

Trabalhos Publicados

Trabalhos associados com esta dissertação

KULLER, Fabiano ; SILVA, J. C. C. ; KALINOWSKI, H. J. ; FABRIS, J. L. ; MULLER, M. . Denvelopment of an Experimental Set-up for Fiber Bragg Gratings Production. In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA, 2008, Águas de Lindóia. XXXI ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA, 2008.

Trabalhos em co-autoria

1. LOURENCO JR, I., POSSETTI, Gustavo Rafael Collere, KULLER, Fabiano, MULLER, M., FABRIS J L . Fiber Bragg Grating Sensor Applied on the Drying Time of Latex Paint Monitoring. In: *MOMAG 2008*, 2008, Florianópolis. 13 SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica; 8 CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2008. p. 399-401.
2. MILCZEWSKI, M. S. ; SILVA, J. C. C. ; PATERNO, A. S. ; KULLER, Fabiano ; KALINOWSKI, H. J. . Measurement of composite shrinkage using a fibre optic Bragg grating sensor. *Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition*, v. 18, p. 383-392, 2007.
3. PATERNO, A. S. ; HARAMONI, N. ; KULLER, Fabiano ; KALINOWSKI, H. J. . Interrogation of Multiplexed FBG Sensors with a Strain Tuned EDF Laser using a High-Strength Grating. In: *Optical Sensors - Europe Symposium on Optics and Optoelectronics*, 2007, Praga. SPIE Proceedings, 2007.

4. NEVES JUNIOR, P. T. ; COSMO, P. V. ; KULLER, Fabiano ; POHL, A. A. P. ; KALINOWSKI, H. J. ; FABRIS, J. L. . 4-Channel Reconfigurable CWDM OADM Based on FBG Gratings. In: 6th Conference on Telecommunications, 2007, Peniche. Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications. Lisboa : Instituto de Telecomunicações, 2007. v. DVD. p. 173-176.
5. INÁCIO, P. L. ; KULLER, Fabiano ; SILVA, J. C. C. ; POHL, A. A. P. ; KALINOWSKI, H. J. . Production of Fibre Bragg Gratings at 1300 nm with a Phase-Mask Interferometer. In: 6th Conference on Telecommunications, 2007, Peniche. Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications. Lisboa : Instituto de Telecomunicações, 2007. v. DVD. p. 541-543.
6. KLEMBA, Francelli ; KULLER, Fabiano ; MARCONCIN, Christine ; SILVA, Jean Carlos Cardozo da ; MULLER, M. ; POHL, Alexandre de Almeida Prado ; FABRIS J L ; KALINOWSKI, Hypolito José . Implementação de sistema de gravação de redes de Bragg com perfis arbitrários de apodização por varredura do feixe de escrita. In: 12o. Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 2006, Belo Horizonte. Proceedings do 12o. Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 2006. v. 1. p. 6-10.
7. PATERNO, A. S. ; HARAMONI, N. ; SILVA, J. C. C. ; KULLER, Fabiano ; KALINOWSKI, H. J. . Interrogation of Multiplexed FBG Sensors with a Strain Tuned EDF Laser using a High-Strength Grating. In: 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006, Cancun. Proceedings OFS 18, 2006.
8. RICETTI, R. ; BUSCHLE, M. S. ; KULLER, Fabiano ; MULLER, M. ; FABRIS, J. L. . Interrogation System Intensity Coded for Bragg Gratings Based Sensors.. In: XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2006, São Lourenço. Optics Technical Digest, 2006. v. 1. p. 1-4.
9. POHL, A. A. P. ; KALINOWSKI, H. J. ; KULLER, Fabiano ; NEVES JUNIOR, P. T. ; FABRIS, J. L. . Two Channel CWDM OADM based on Large Bandwidth Fiber Bragg Gratings. In: 8th International Conference on Transparent Optical Networks, 2006, Nottingham. ICTON 2006, 2006. v. 1. p. 198-201.

10. FREITAS, F. C. ; KULLER, Fabiano ; MULLER, M. ; FABRIS, J. L. ; SAUL, C. K. . Characterization of a spark-based Long Period Grating (LPG) recording system. In: Ibersensor 2006, 2006, Montevideo. Memorias - Ibersensor 2006. Montevideo : Universidad de la Republica, 2006.
11. KALINOWSKI, H. J. ; KULLER, Fabiano ; SILVA, J. C. C. ; NOGUEIRA, R. ; FABRIS, J. L. ; POHL, A. A. P. ; BRITO, P. A. S. . Production and Characterization of Broad Fibre Bragg Gratings for Photonics Devices. In: European Conference on Optics and Optoelectronics, Photonic Technologies I, 2005, Varsóvia. Proceedings of SPIE, 2005. v. 4599. p. 1-6.
12. NEVES JUNIOR, P. T. ; MARCONCIN, C. ; KULLER, Fabiano ; KALINOWSKI, H. J. ; FABRIS, J. L. ; POHL, A. A. P. . Analysis of Mach-Zehnder OADM Characteristics using Fiber Bragg Gratings. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2005, Brasilia. International Microwave and Optoelectronics Conference, 2005.
13. PATERNO, A. S. ; FIGUEREDO, T. S. ; MILCZEWSKI, M. S. ; KULLER, Fabiano . Sistema com sensor a FBG de campo evanescente: aplicações na detecção gasolina adulterada e desenvolvimento de sensor de Hidrogênio.. In: 3o. Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005, Salvador Bahia. 3o. Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005.
14. FABRIS, J. L. ; KULLER, Fabiano ; MARCONCIN, C. ; KALINOWSKI, H. J. ; POHL, A. A. P. . Implementação de Perfis de Apodização de Redes de Bragg em Fibra Óptica. In: XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2005, Campinas. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2005. v. 1. p. 296-298.
15. KAMIKAWACHI, R. C. ; ROSADO, R. H. G. ; KULLER, Fabiano ; MULLER, M. ; FABRIS, J. L. . Sensores a fibra ótica para detecção de hidrocarbonetos e monitoração da temperatura em polidutos. In: 3o. Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005, Salvador. Anais do 3o. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005. v. 1. p. 1-9.

Apêndice A

Diagramas do Sistema de Controle

Na figura A tem-se o o diagrama de um sistema de controle básico fornecido pelo fabricante do controlador e dos motores descritos no seção 3.2 do capítulo 3. Com base neste sistema construiu-se a plataforma de controle atual.

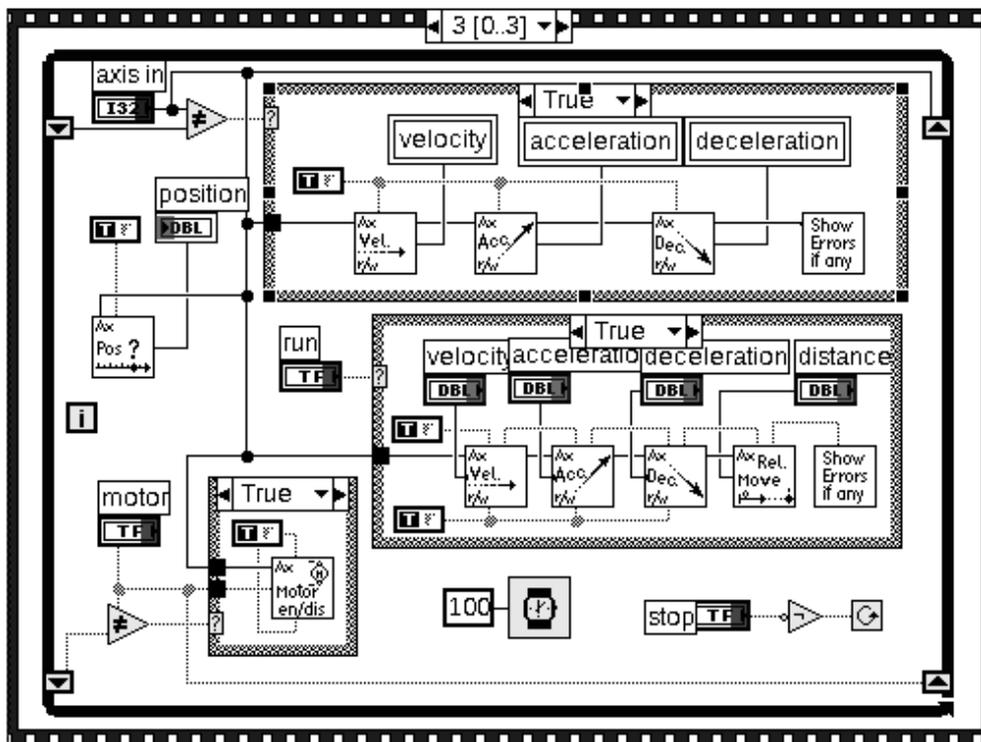


Fig. A.1: Sistema de controle fornecido pelo fabricante do ESP-6000, em NI Labview 7.1©.

Para a construção da plataforma empregou-se as equações descritas no item 3.4 do capítulo 3, chegando-se ao diagrama mostrado na figura A.2. Por fim, desenvolveu-se

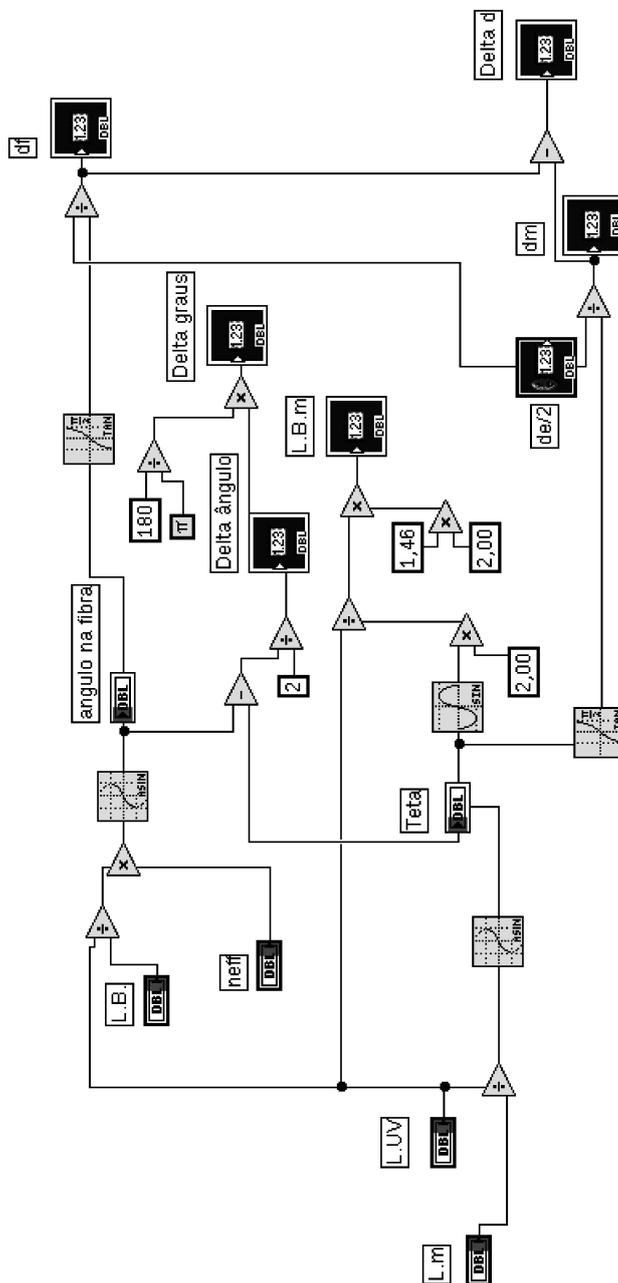


Fig. A.2: Equações desenvolvidas na seção 3.4, implementadas em NI Labview 7.1©.

o sistema de controle atual, como pode ser observado no diagrama da figura A.3.

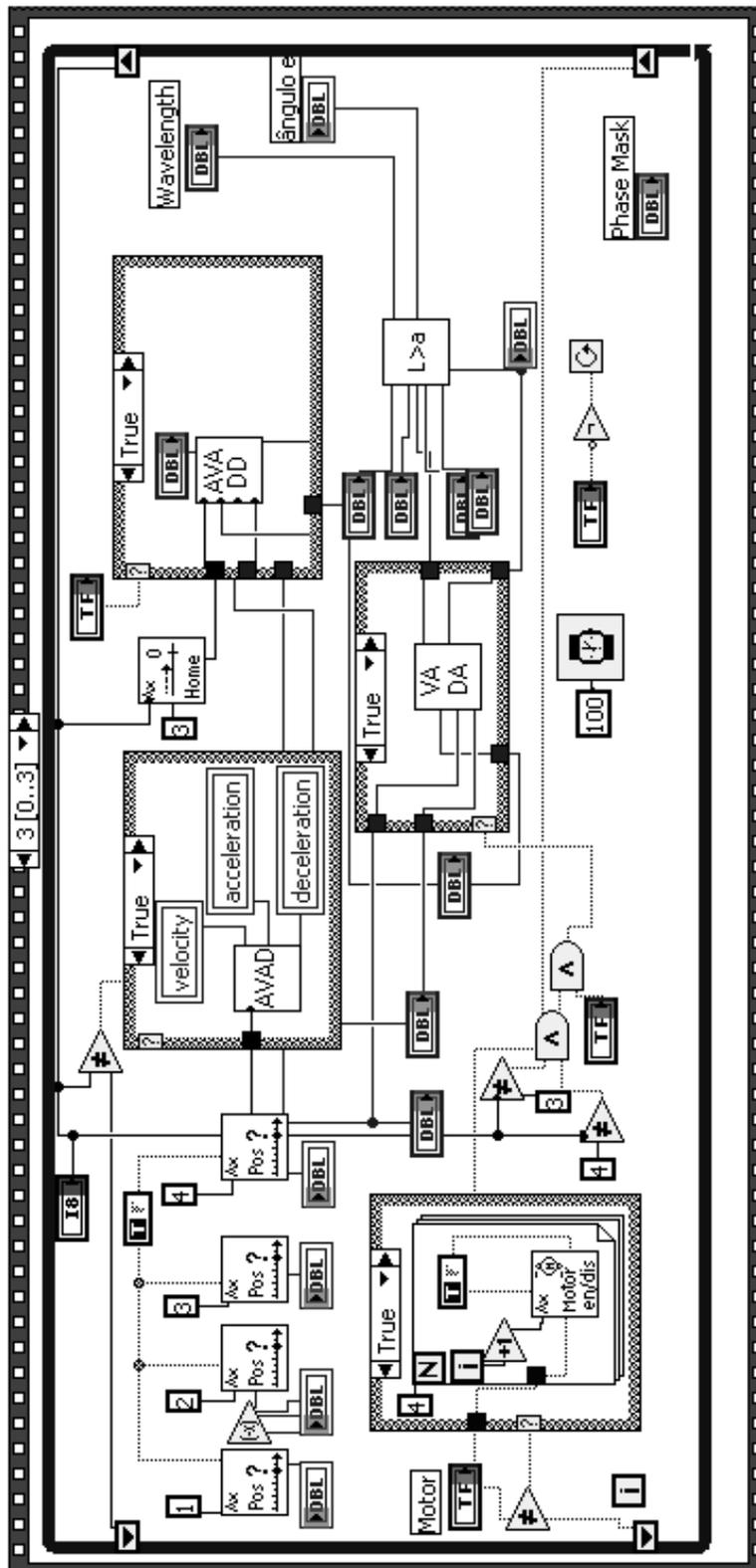


Fig. A.3: Diagrama do sistema de controle implementado em NI Labview 7.1©.

Apêndice B

Diagramas do Sistema de Leitura de Redes de Bragg

Na figura B observa-se o diagrama do sistema de leitura de redes de Bragg e como realiza-se o armazenamento dos dados referentes a sua gravação. Para sua elaboração utilizou-se pacotes com as funções implementadas em NI Labview 7.1©fornecidas pelo próprio fabricante do OSA utilizado. Na figura B observa-se alguns dos pacotes utilizados para confecção do sistema de leitura.

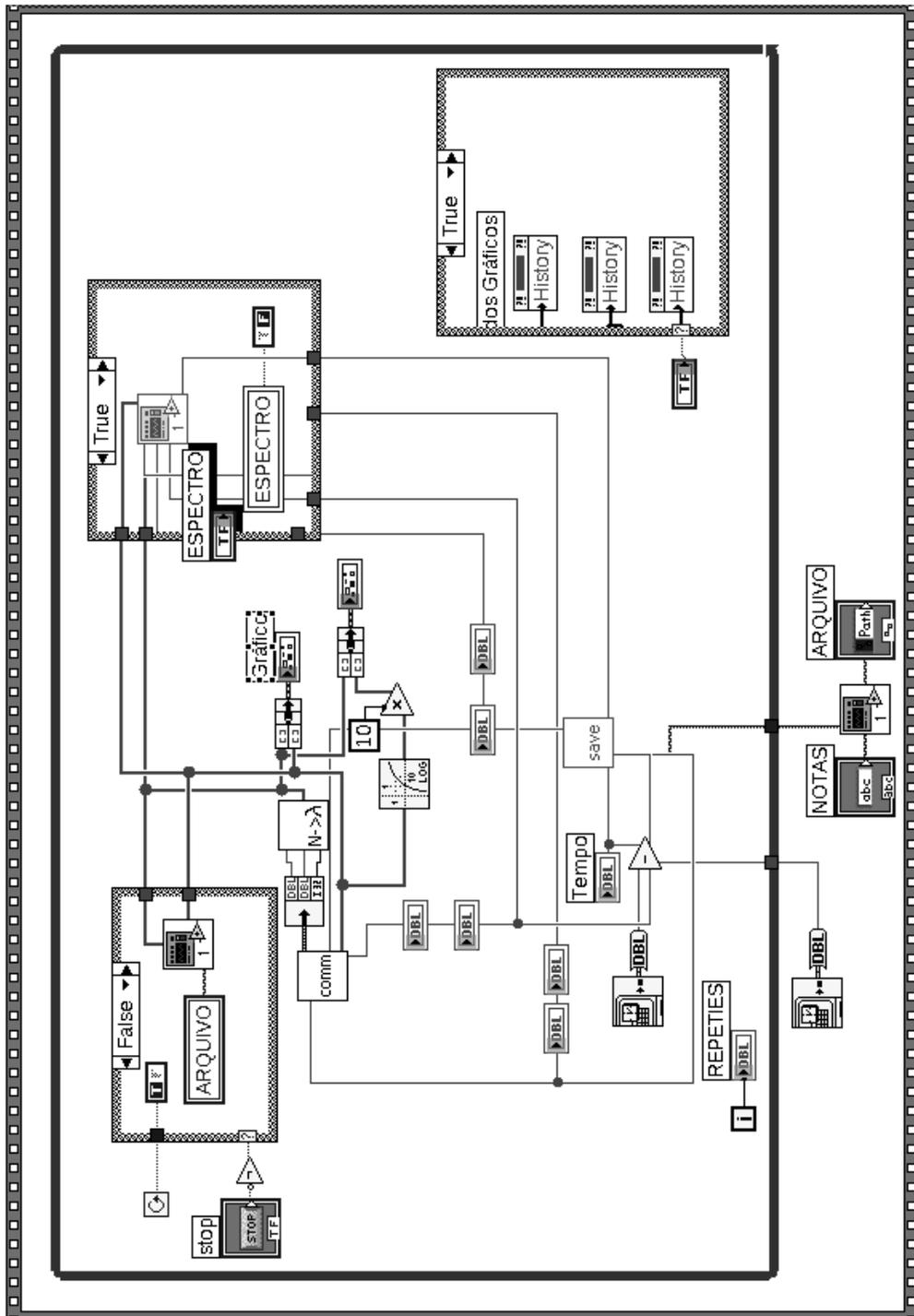


Fig. B.1: Diagrama do sistema de leitura de redes de Bragg.

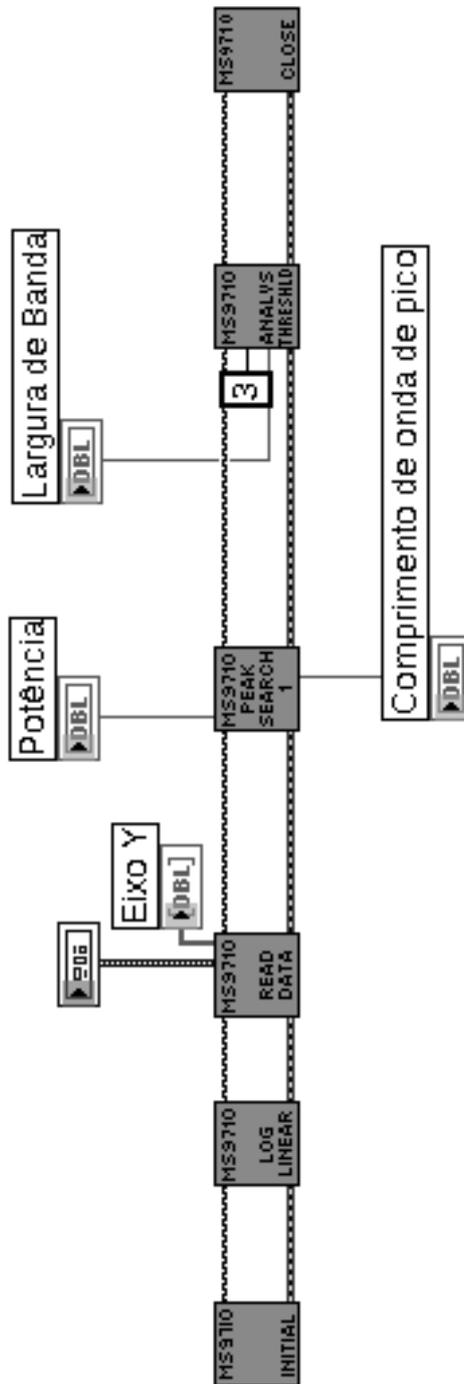


Fig. B.2: Diagrama dos pacotes utilizado no sistema de leitura implementado em NI Labview 7.1©.

Apêndice C

Perfis de Velocidade

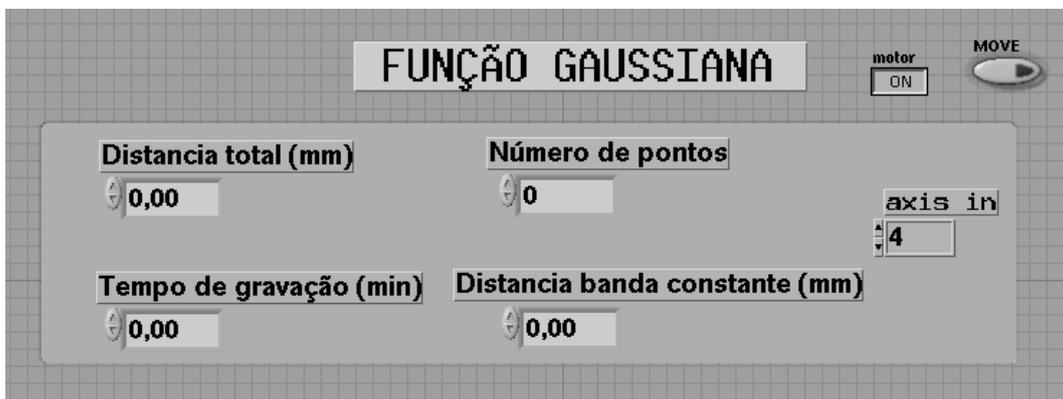


Fig. C.1: Interface do sistema de controle com perfil gaussiano.



Fig. C.2: Interface do sistema de controle com perfil trapezoidal.

Referências Bibliográficas

- [1] K. C. Kao and G. A. Hockmam. Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies. In *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 1966., volume 113, pages 1151–1158, 1966.
- [2] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer. Radiation losses in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 17(10):423–425, 1970.
- [3] G. A. Ball and W. W. Morey. Continuously tunable single mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 17(6):420–422, 1992.
- [4] J. A. R. Williams, I. Bennion, K. Sugden, and N. J. Doran. Fibre dispersion compensation using a chirped in fibre bragg grating. *Electronics Letters*, 30(12):985–987, jun 1994.
- [5] F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, and J. Albert. High return loss narrow band all fiber band pass bragg transmission filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(12):985–987, jun 1994.
- [6] K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and I. Skinner. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings. *Electronics Letters*, 26(16):1270–1272, aug 1990.
- [7] B. F. Ventrudo, G. A. Rogers, G. S. Lick, D. Hargreaves, and T. N. Demayo. Wavelength and intensity stabilisation of 980 nm diode lasers coupled to fibre bragg gratings. *Electronics Letters*, 30(25):2147–2149, dec 1994.

- [8] P. A. Morton, V. Mizrahi, S. G. Kosinski, L. F. Mollenauer, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, D. L. Coblentz, A. M. Sergent, and K. W. Wecht. Hybrid soliton pulse source with fibre external cavity and bragg reflector. *Electronics Letters*, 28(6):561–562, mar 1992.
- [9] J. Capmany, D. Pastor, and J. Marti. Edfa gain equalizer employing linearly chirped apodized fiber gratings. *MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS*, 12(3):158–160, 1996.
- [10] E. Udd. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineering and Scientists*. Wiley, New York, 1991.
- [11] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32(10):647–649, 1978.
- [12] D. K. W. Lam and B. K. Garside. Characterization of single mode optical fiber filters. *Appl. Opt.*, 20(3):440–445, 1981.
- [13] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn. Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 14:823–825, aug 1989.
- [14] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, T. F. Morse, A. Kilian, L. Reinhart, and O. Kyunghwan. Photosensitivity in eu^{2+} al_2o_3 doped core fiber: preliminary results and application to mode converters. In *Digest of Conference on optical communication, 1991, paper PD3*, 1991.
- [15] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed. High pressure h loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensitivity in geo_2 doped optical fibres. *Electronics Letters*, 29(13):1191–1193, jun 1993.
- [16] W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas, S. Barcelos, and R. I. Laming. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber scanning beam technique. *Opt. Lett.*, 20(20):2051–2053, 1995.

- [17] Y. Wang, J. Grant, A. Sharma, and G. Myers. Modified talbot interferometer for fabrication of fiber optic grating filter over a wide range of bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask. *Journal of Lightwave Technology*, 19(10):1569–1573, oct 2001.
- [18] M. S. Milczewski, J. C. C. Silva, A. S. Paterno, H. J. Kalinowski, and F. Kuller. Measurement of composite shrinkage using a fibre optic bragg grating sensor. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 18(4):383–392, 2007.
- [19] A. S. Paterno, N. Haramoni, J. C. C. Silva, F. Kuller, and H. J. Kalinowski. Interrogation of multiplexed fbg sensors with a strain tuned edf laser using a high-strength grating. In *Optical Sensing Technology and Applications. Edited by Baldini, Francesco; Homola, Jiri; Lieberman, Robert A.; Miler, Miroslav. Proceedings of the SPIE, Volume 6585, pp. 65850Q (2007).*, volume 6585, jun 2007.
- [20] P. T. Jr. Neves, P. V. Cosmo, F. Kuller, H. J. Kalinowski, J. L. Fabris, and A. A. P. Pohl. 4-channel reconfigurable cwdm oadm based on fbg gratings. In *Proceedings of the 6th Conference on Telecommunications*, 2007.
- [21] J.C.C. Silva, R. Falate, R.N. Nogueira, H.J. Kalinowski, J.L. Fabris, and J.L. Pinto. Production of fiber bragg gratings in phase mask interferometers. In *Proc. 4th. Conference on Telecommunications*, pages 449–451, 2003.
- [22] B. E. A. Saleh and M. C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley, New York, 1st edition, 1991.
- [23] D. L. Williams, B. J. Ainslie, J. R. Armitage, and R. Kashyap. Enhanced photosensitivity in germania doped silica fibers for future optical networks. In *European Conference on Optical Communication*, jan 1991.
- [24] D. L. Williams, S. T. Davey, R. Kashyap, J. R. Armitage, and B. J. Ainslie. Direct observation of uv induced bleaching of 240 nm absorption band in photosensitive germanosilicate glass fibres. *Electronics Letters*, 28:369–371, feb 1992.

- [25] M. M. Broer, R. L. Cone, and J. R. Simpson. Ultraviolet-induced distributed-feedback gratings in ce^{3+} -doped silica optical fibers. *Opt. Lett.*, 16(18):1391–1393, 1991.
- [26] A. Lemaire and P. J. Tomita. Hydrogen-loaded loss increase in germanium-doped single-mode optical fibers: Long-term predictions. *Electronics Letters*, 21:71, 1985.
- [27] P. J. Lemaire. Reliability of optical fibers exposed to hydrogen: prediction of long term loss increases. *Optical Engineering*, 30(6):780–789, 1991.
- [28] T. Lemaire and P. J. Ergodan. Hydrogen enhanced uv photosensitivity of optical fibers: mechanisms and reliability. In *Proc. OSA Topical Meeting on Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides, paper SuA4*, page 78, 1995.
- [29] J. M. Battiato. *Fiber Bragg gratings*. PhD thesis, THE UNIVERSITY OF ARIZONA, 1998.
- [30] J. Crank. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, USA, March 1980.
- [31] A. Othonos and K. Kalli. *Fiber Bragg Gratings : Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Optoelectronics Library. Artech House, Boston London, 1999.
- [32] I. Riant and F. Haller. Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension: type iia aging. *Lightwave Technology, Journal of*, 15(8):1464–1469, Aug 1997.
- [33] L. Dong, J. L. Archambault, L. Reekie, St. P. J. Russell, and D. N. Payne. Single pulse bragg gratings written during fibre drawing. *Electronics Letters*, 29(17):1577–1578, Aug. 1993.

- [34] B. Malo, K. O. Hill, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert. Point-by-point fabrication of micro-bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques. *Electronics Letters*, 29(18):1668–1669, Sept. 1993.
- [35] J. L. Archambault, L. Reekie, and P. St. J. Russell. 100% reflectivity bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses. *Electronics Letters*, 29(5):453–455, March 1993.
- [36] S. J. Mihailov and M. C. Gower. Periodic cladding surface structures induced when recording fiber bragg reflectors with a single pulse from a krf excimer laser. *Applied Physics Letters*, 65(21):2639–2641, 1994.
- [37] A. G. Simpson, K. Kalli, K. Zhou, L. Zhang, and I. Bennion. An idealized method for the fabrication of temperature invariant ia-i strain sensors. In *16th International Conference on Optical Fibre Sensors – OFS’2003, Nara, Japão, p. 14-17, 2003*, 2003.
- [38] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe. Long period fiber gratings as band rejection filters. *Journal of Lightwave Technology*, 14:58, jan 1996.
- [39] H. M. Presby. Refractive index and diameter measurements of unclad optical fibers. *J. Opt. Soc. Am.*, 64(3):280, 1974.
- [40] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask. *Applied Physics Letters*, 62(10):1035–1037, 1993.
- [41] D. Z. White, T. Anderson, T. Mizrahi, and A. E. Erdogan. Production of in fibre gratings using a diffractive optical element. *Electronics Letters*, 29(6):566–568, March 1993.

- [42] A. Othonos and L. Xavier. Novel and improved methods of writing bragg gratings with phase masks. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 7(10):1183–1185, Oct 1995.
- [43] P. E. Dyer, R. J. Farley, and R. Giedl. Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase masks. *Optics Communications*, 115:327–334, feb 1995.
- [44] N. Mohammad, W. Szyszkowski, W. J. Zhang, E. I. Haddad, J. Zou, W. Jamroz, and R. Kruzelecky. Analysis and development of a tunable fiber bragg grating filter based on axial tension/compression. *J. Lightwave Technol.*, 22(8):2001, 2004.
- [45] J. D. Prohaska, E. Snitzer, S. Rishton, and V. Boegli. Magnification of mask fabricated fibre bragg gratings. *Electronics Letters*, 29(18):1614–1615, Sept. 1993.
- [46] P. E. Dyer, R. J. Farley, and R. Giedl. Analysis and application of a 0/1 order talbot interferometer for 193 nm laser grating formation. *Optics Communications*, 129:98–108, feb 1996.
- [47] L. Zhang, Y. Liu, L. Everall, J. A. R. Williams, and I. Bennion. Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 5(5):1373–1378, Sep/Oct 1999.
- [48] P. Palai, M. N. Satyanarayan, M. Das, K. Thyagarajan, and B. P. Pal. Characterization and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge. *Optics Communications*, 193:181–185, jun 2001.
- [49] S. W. James, P. R. Tatam, A. Twin, R. Bateman, and P. Noonan. Cryogenic temperature response of fibre optic long period gratings. *Measurement Science and Technology*, 14:1409–1411, aug 2003.
- [50] M. Akiyama, K. Nishide, K. Shima, A. Wada, and R. Yamauchi. Novel long-period fiber grating using periodically released residual stress of pure-silica core fiber.

- Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC '98., Technical Digest*, pages 276–277, Feb 1998.
- [51] K. O. Hill. Aperiodic distributed parameter waveguides for integrated optics. *Appl. Opt.*, 13(8):1853–1856, 1974.
- [52] M. N. Zervas, K. Ennser, and R. I. Laming. Design of apodised linearly chirped fibre gratings for optical communications. In *Optical Communication, 1996. ECOC 96. 22nd European Conference on*, volume 3, pages 233–236, sep 1996.
- [53] H. Singh and M. Zippin. Apodized fiber bragg gratings for dwdm applications using uniform phase mask. In *Optical Communication, 1998. 24th European Conference on*, volume 1, pages 189–190, Madrid, Spain, sep 1998.
- [54] K. E. Chisholm, L. A. Everall, J. A. R. Williams, I. Bennion, X. Liu, R. M. De La Rue, and J. S. Aitchison. Apodised fibre bragg grating design subject to length constraints. In *Optical Communication, 1998. 24th European Conference on*, volume 1, pages 385–386, Madrid, Spain, sep 1998.
- [55] B. Malo, S. Theriault, D. C. Johnson, F. Bilodeau, J. Albert, and K. O. Hill. Apodised in fibre bragg grating reflectors photo imprinted using a phase mask. *Electronics Letters*, 31(3):223–225, feb 1995.
- [56] J. Albert, K. O. Hill, B. Malo, S. Theriault, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and L. E. Erickson. Apodisation of the spectral response of fibre bragg gratings using a phase mask with variable diffraction efficiency. *Electronics Letters*, 31(3):222–223, Feb 1995.
- [57] M. J. Cole, W. H. Loh, R. I. Laming, M. N. Zervas, and S. Barcelos. Moving fibre/phase mask-scanning beam technique for enhanced flexibility in producing fibre gratings with uniform phase mask. *Electronics Letters*, 31(17):1488–1490, aug 1995.

- [58] R. Kashuap, A. Swanton, and D. J. Armes. Simple technique for apodising chirped and unchirped fibre bragg gratings. *Electronics Letters*, 32(13):1226–1228, 1996.
- [59] M. Guy, J. Lauzon, M. Pelletier, P. Ehbets, and D. Asselin. Simple and flexible technique for spectrally designing all fibre filter and apodizing fibre gratings. In *Integrated Optics and Optical Fibre Communications, 11th International Conference on, and 23rd European Conference on Optical Communications (Conf. Publ. No.: 448)*, volume 1, pages 195–198, Edinburgh, UK, sep 1997.
- [60] F. Floreani, A. Gillooly, D. Zhao, L. Zhang, I. Bennion, X. Shu, and K. Sugden. Investigation of intrinsically apodised chirped fibre bragg gratings fabricated using scanning holographic setup. In *Fibre and Optical Passive Components, 2002. Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on*, pages 80–85, 2002.
- [61] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.
- [62] P. L. Inácio. Produção e caracterização de redes de bragg em 1300nm para aplicações cwdm. *CPGEI*, 2008.
- [63] Rita Zanlorensi Visneck Costa, Ricardo Canute Kamikawachi, Marcia Muller, and José Luís Fabris. Kinetic of long period gratings uv induced and sensing characteristics. *RIAO/OPTILAS 2007: 6th Ibero-American Conference on Optics (RIAO); 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (OPTILAS)*, 992(1):242–247, 2008.

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema experimental versátil empregado na produção de redes de Bragg e redes de período longo em fibras ópticas. O sistema emprega um laser de Nd:YAG operando em 266 nm como fonte de luz e permite a produção de redes de Bragg por meio de duas diferentes técnicas de irradiação. As redes de Bragg são obtidas tanto pela iluminação direta de uma máscara de fase quanto pelo uso de um interferômetro com máscara de fase, e as redes de período longo pela técnica de irradiação ponto a ponto. As redes são escritas em fibras fotossensíveis ou em fibras mono-modo padrão hidrogenadas. A operação do sistema é controlada por computador e a troca entre as diferentes técnicas de irradiação é efetuada facilmente. O processo de gravação das redes é acompanhado em tempo real com a ajuda de um analisador de espectros ópticos. Os espectros de reflexão ou transmissão são obtidos lançando na fibra a luz de um LED superluminescente (1445-1645 nm), porém dependendo da faixa espectral de interesse outras fontes de luz podem ser usadas. O sistema permite a obtenção de trocas no comprimento de onda de Bragg com incrementos de 0.11 nm. O desempenho do sistema foi testado e são apresentados os resultados referentes às redes de Bragg e de período longo produzidas. Foram produzidas redes de Bragg com comprimentos de 15 mm e larguras de banda de 0.11 nm e refletividades de 26 dB.

PALAVRAS-CHAVE

Fibras Ópticas, Dispositivos fotorrefrativos, Redes de Bragg.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.05.00-9: Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos

3.04.06.01-3: Teoria Eletromagnética, Micro-ondas, Propagação de Ondas, Antenas

1.05.02.02-5: Óptica

2008

Nº.: 485