

## CAPÍTULO 3

### Estado da Arte em Redes de Bragg

#### 3.1 Premissas Iniciais para o Estabelecimento do Estado da Arte

Não se pode desconsiderar que a sílica continua sendo um dos meios óticos mais eficientes para transportar luz guiada. Ela se destaca por ser opticamente mais transparente dentre os diversos tipos de vidro, além de utilizar os óxidos mais comuns (óxido de silício -  $\text{SiO}_2$ ) do mercado na sua fabricação. Este tipo de material é criado a partir da fusão de uma mistura de óxidos de metais, sulfetos e selenetos, que possuem o papel de tornar a estrutura cristalina mais resistente às deformações mecânicas. Permite ampliar a resistência a choques térmicos devido à expansão térmica e estender a estabilidade química às regiões de transparência no espectro do visível e do infravermelho (IV). Foi por conta destas características relevantes que a sílica se estabeleceu como um dos melhores materiais para a fabricação de fibras óticas. As fibras óticas podem ser fabricadas através de diferentes processos, todavia, os mais difundidos são a fusão direta da sílica em um cadinho ou os diversos e complexos processos de deposição por vapor.

O processo de fabricação das fibras óticas tem como objetivo principal produzir uma estrutura com materiais de características similares (núcleo e casca), porém, com uma pequena diferença entre os seus índices de refração para que a luz possa ser acoplada e guiada neste meio ótico através do fenômeno da reflexão interna total. Para que isto possa ocorrer é necessário acrescentar diferentes elementos químicos (dopantes) na composição química da sílica. Na tabela 2 são apresentados alguns tipos de elementos dopantes mais comuns usados no núcleo e na casca de uma fibra ótica (CLOWES *et al*, 1998).

Tabela 2: Elementos químicos dopantes do núcleo e da casca de uma fibra.

| Núcleo                                | Casca                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| $\text{SiO}_2$                        | $\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ |
| $\text{GeO}_2 - \text{SiO}_2$         | $\text{SiO}_2$                        |
| $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ | $\text{SiO}_2$                        |

Convém mencionar que, além da sílica, existem outros tipos de vidros que podem ser usados para a fabricação de fibras óticas, tais como os vidros halogênicos, calcogênicos, ativos (ZU'BI, 2011).

### 3.2 Cronologia das Redes de Bragg

A descoberta da fotossensibilidade nas fibras óticas permitiu uma evolução da pesquisa puramente acadêmica para aplicações reais no campo do sensoriamento ótico. O desenvolvimento de estudos sobre estes assuntos deu origem às primeiras redes de difração (redes de Bragg), através da capacidade de reflexão do núcleo de uma fibra ótica dopada com um elemento químico. O núcleo apresenta uma variação no seu índice de refração quando submetido à exposição da radiação de uma fonte de luz para um determinado comprimento de onda (HILL, 1978; OTHONOS, 1997).

A origem destas primeiras redes inscritas permanentemente nas fibras óticas foi através dos estudos de Hill e sua equipe em 1978, durante um experimento em que tentava estudar efeitos não-lineares em um tipo de fibra ótica especial. Trabalhou-se com uma fonte de luz no espectro do visível através de um laser de argônio com 488 nm que incidia luz no núcleo da fibra ótica. Depois de algum tempo decorrido observou-se uma atenuação do sinal original por alguma modificação das propriedades óticas da fibra. Deduziu-se num primeiro momento que poderia ser o efeito da reflexão de Fresnel referente à outra extremidade da fibra. Esta descontinuidade ótica com características não-lineares do efeito da fotorrefração produziu uma modulação fraca no índice de refração, resultando em uma estreita banda de reflexão do comprimento de onda inscrito. Este fenômeno ótico foi batizado de fotossensibilidade. Por conta desta limitação da modulação fraca do índice à época, este assunto foi deixado de lado por alguns anos (HILL *et al*, 1978).

Quase uma década depois, o pesquisador Meltz e seus colaboradores retomaram as pesquisas óticas sobre fotossensibilidade, supondo que poderiam realizar uma grande variação do índice de refração, por meio do uso de fibras dopadas com germânio expostas à radiação ultravioleta (UV), de modo que estas redes de difração fossem inscritas externamente às fibras óticas em qualquer comprimento de onda. A amplitude da variação do índice de refração dependeria

de diversos fatores, como por exemplo, a composição química do vidro da fibra, a intensidade da radiação UV, o comprimento de onda desejado. A retomada das pesquisas sobre fotossensibilidade por Meltz despertaram o interesse da comunidade científica internacional sobre o assunto e vem a cada dia sendo estudado mais profundamente (MELTZ *et al*, 1989).

Recentemente, distintos grupos de pesquisa ao redor do mundo vêm aperfeiçoando e desenvolvendo novas técnicas de fabricação de redes de Bragg, com a utilização de técnicas interferométricas, fabricação com rede de difração (máscara de fase), laser de femtossegundo, fabricação ponto-a-ponto, etc. (VASIL'EV *et al*, 2005).

### 3.3 Tipos de Fotossensibilização em Fibras de Silicato de Germânio

Os fenômenos físicos decorrentes da radiação ultravioleta (UV) a que uma fibra de sílica dopada com germânio pode ser submetida são bastante complexos e ainda continuam em estudo. Esta complexidade está relacionada a alguns efeitos óticos obtidos experimentalmente e que, muitas das vezes, estão associados a um determinado tipo de fibra, potência do laser de inscrição, comprimento de onda do laser.

O que se tem de concreto até o momento é que o efeito da fotossensibilidade em fibras de sílica dopadas com germânio está associado a uma deficiência de oxigênio na estrutura química das fibras, conhecida como deficiência “oxigênio-germânio”. Estes defeitos dizem respeito aos átomos de germânio (Ge) e como se unem na estrutura vítrea das fibras óticas. Esta deficiência produz um decréscimo de absorção após a fibra ser exposta à radiação ultravioleta e pode ser vista na Figura 25 (OTHONOS, 1997).

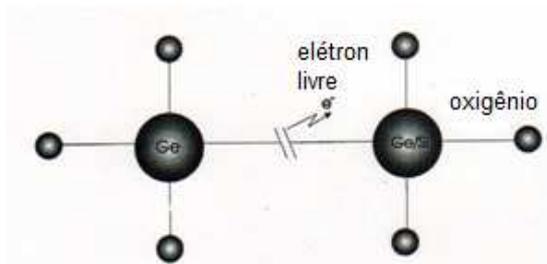


Figura 25: Defeitos da deficiência oxigênio-germânio são os responsáveis pelos efeitos de fotossensibilidade nas fibras de sílica dopadas com germânio, adaptado de (OTHONOS, 1997).

Pode-se afirmar que a fotossensibilidade é oriunda de defeitos acarretados pela má formação no núcleo das fibras de sílica dopadas com germânio. Estes defeitos de formação produzem uma mudança do índice de refração e são iniciados a partir de um simples fóton com banda de 240 nm, logo abaixo da banda de intervalo de 146 nm (VASILÉV *et al*, 2005).

Convém mencionar que o fenômeno da fotossensibilidade não está restrito às fibras dopadas unicamente com germânio. Outros dopantes como érbio, cério, európio, também podem apresentar os mesmos efeitos fotossensíveis.

O uso de um dopante como, por exemplo, o germânio serve para aumentar o índice de refração da fibra ótica. Geralmente, usa-se uma concentração de 3 mol % a 5 mol % de germânio para a dopagem. A adição de germânio ao núcleo da fibra introduz bandas de absorção localizadas, principalmente entre 185 nm e 242 nm. A banda de absorção de 242 nm está relacionada aos defeitos de deficiência da matriz  $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$  conhecidos como centros de deficiência germânio-oxigênio (CDGO). Os átomos de germânio no núcleo da fibra permitem a formação de ligações deficientes de oxigênio, semelhantes às encontradas nas ligações entre Ge-Ge, Si-Si e Si-Ge. Todavia, o defeito mais comum na matriz de sílica é o relacionado ao GeO. Quando se quebra esta ligação química dos elementos Ge-O ou outra ligação, ocorre uma liberação de elétrons que podem se movimentar livremente na matriz de sílica. Estes, movendo-se livremente, são retidos em cavidades que formam os centros conhecidos por Ge (1) e Ge (2) e absorvidos em 281 nm e 213 nm respectivamente, alterando o índice de refração do material, de acordo com as Figuras 26 e 27 (PISSADAKIS, 2007).

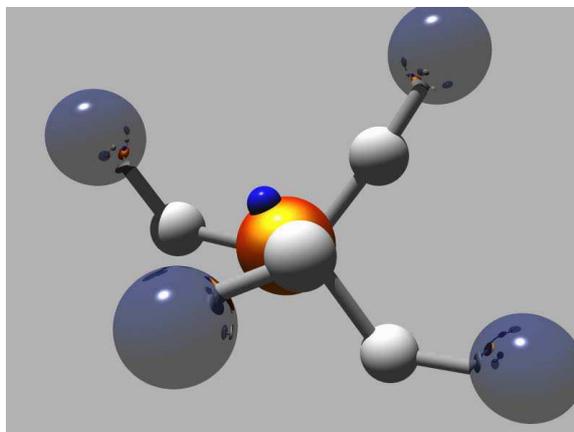


Figura 26: No centro Ge (1) o elétron é retido no átomo de Ge e unido a quatro ligações O-Si, adaptado de (PISSADAKIS, 2007).

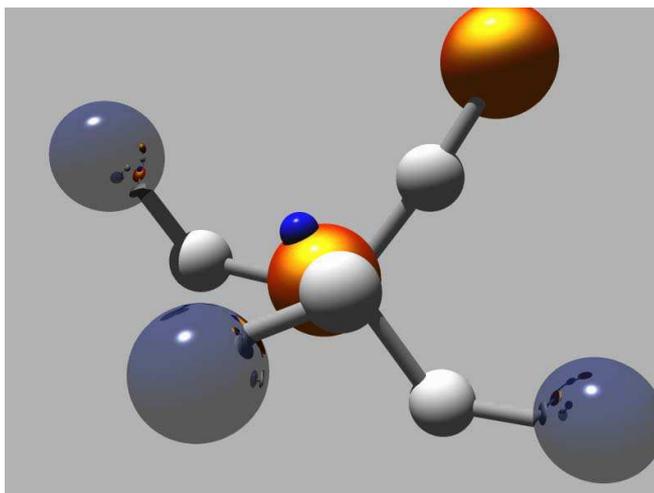


Figura 27: No centro Ge (2) o elétron é retido no átomo de Ge e unido por uma ligação O-Ge ( $\equiv\text{Ge-O-Ge}\equiv$ ) e três ligações O-Si, adaptado de (PISSADAKIS, 2007).

A variação do índice de refração no núcleo de uma fibra exposta a uma determinada dose de radiação ultravioleta pode ser considerada como uma escala de fotossensibilidade. Visto que quanto maior a fotossensibilidade, maior será a refletividade espectral, conseguindo-se uma inscrição na rede mais eficiente e rápida.

A formação dos defeitos na matriz de sílica (redes) a partir da interação com a radiação UV produz um aumento no índice de refração ( $\Delta n$ ). Este acréscimo é proveniente das variações dos centros de cor do material vítreo e da interação da radiação UV em relação às ligações químicas Ge-SiO<sub>2</sub>. Como consequência, uma determinada quantidade de GeO<sub>2</sub> produz centros de deficiência de oxigênio que acarretam o aumento do índice de refração quando submetidos à radiação UV. Todo este processo de formação ocorre de forma lenta e depende da intensidade da radiação UV (OTHONOS, 1997).

Existem diferentes maneiras para aumentar a fotossensibilização em fibras óticas, tais como varredura a chama, onde a região a ser sensibilizada é submetida a uma chama rica em hidrogênio com um pouco de oxigênio, chegando a alcançar temperaturas de 1700 °C. Este método possui a vantagem de produzir um efeito permanente de fotossensibilidade na fibra, num período de tempo relativamente pequeno.

Outra técnica possível é a co-dopagem com o elemento boro, pois este dopante também aumenta o índice de refração foto-induzido em fibras óticas padrão de telecomunicação. Ao ser irradiada com um laser de argônio com potência de  $1 \text{ W/cm}^2$ , a fibra dopada com boro apresenta uma maior fotosensibilidade que uma fibra dopada apenas com germânio. Justifica-se como causa mais provável da melhora na fotossensibilidade com a adição de boro a relaxação do estado de tensão foto-induzido na estrutura da fibra ótica.

Também existe uma técnica que aplica maiores potências para menores comprimentos de onda como é o caso dos lasers Excímeros ArF a vácuo com radiação UV de 193 nm (OTHONOS, 1997; HILL, 1997).

A difusão do hidrogênio em fibras óticas pode produzir atenuações transientes e permanentes nas mesmas; as atenuações permanentes são mais significativas e altamente dependentes da composição química do vidro. As atenuações transientes são processos reversíveis e causados pela absorção e dissolução do hidrogênio no vidro. Desta forma, se o hidrogênio for removido por algum motivo, a fibra ótica retorna à sua condição original.

Quando são produzidas atenuações permanentes, estas possuem características irreversíveis, visto que o hidrogênio quando reage quimicamente com os elementos que compõem o vidro cria defeitos permanentes.

As atenuações causadas pelo hidrogênio são dependentes a sua taxa de difusão no vidro e estão relacionadas com certas condições de temperatura e pressão (SANDERS, 2003).

A hidrogenação é um método de fotossensibilização eficiente, rápido e relativamente simples que pode ser utilizado para gravar redes de Bragg em qualquer fibra de silicato de germânio, com mudança permanente do índice de refração na região irradiada por radiação UV. Um inconveniente desta técnica é que a mesma necessita de um tempo relativamente grande para completar todo o ciclo de fotossensibilização em dias.

### 3.4 Fabricação de Redes de Bragg

A fabricação de redes de Bragg pode ser feita de várias formas. Contudo, existem duas técnicas de fabricação que se destacam: técnica interferométrica e não-interferométrica.

O processo de gravação de uma rede em uma fibra ótica é bastante delicado e necessita de equipamentos especiais que operem em ambiente controlado e com pessoal treinado. Este refinamento das condições de medição é exigido em função da necessidade de se realizar deslocamentos da ordem de micrometros nos dispositivos de alinhamento da fibra ótica para gravação das FBGs.

Entre as várias possibilidades de gravação interferométrica, uma das mais empregadas é a técnica holográfica desenvolvida por Meltz *et al.* Esta técnica modula espacialmente o índice de refração através da intensidade da luz formada por interferência entre dois feixes coerentes. Para isto, é necessário utilizar um laser de radiação ultravioleta (UV) com o intuito de reproduzir os mesmos conceitos de um interferômetro, podendo ser visto na Figura 24 (MELTZ, MOREY, GLEN, 1989).

A segunda técnica mais difundida, não interferométrica, é a que utiliza uma rede de difração denominada de máscara de fase, desenvolvida por Hill *et al.* Esta técnica de gravação é mais fácil de ser realizada, apresentando elevada reprodutibilidade sem a necessidade da fonte de radiação (laser) possuir potência de emissão elevada (HILL *et al.*, 1978).

#### 3.4.1 Máscara de Fase

A técnica de máscara de fase utiliza um elemento difrator em transmissão, que consiste em uma série de depressões longitudinais sobre a superfície de um substrato de sílica produzidas por foto-litografia.

O substrato de sílica é polido com alta qualidade ótica nas duas superfícies e coberto por uma camada metálica, normalmente de tungstênio ou de cromo, com espessura de angstroms, sobre o qual é depositado o verniz fotossensível. A matriz da rede de difração pode ser impressa no verniz por dois métodos conhecidos: através de inscrição holográfica ou inscrição por varredura com feixe de elétrons.

Após a impressão, o verniz fotossensível é revelado de forma a remover as zonas sensibilizadas, obtendo-se assim uma réplica da matriz sobre a camada metálica. Por fim, esta matriz é transferida para a camada metálica por “*dry etching*”, deixando exposto o substrato de sílica nas zonas desbastadas. A sílica é então gravada por ataque químico sendo posteriormente removida a camada metálica residual. Desta forma é fabricada uma rede de difração no substrato de sílica, com capacidade de difratar um feixe de luz guiada em transmissão. O fenômeno óptico relacionado com esta técnica de gravação é baseado na difração de um feixe de luz incidente com várias ordens,  $m = 0, \pm 1, \pm 2$ .

A maneira mais eficiente de se gravar redes de Bragg com máscara de fase é manter a fibra ótica próxima à superfície da máscara, alinhando-a transversalmente com as depressões da máscara. O período inscrito na fibra para a rede será a metade do período da máscara de fase. As facilidades de alinhamento do sistema de gravação, assim como a estabilidade da medição através de um padrão de interferência, permitem às FBGs serem fabricadas com elevada reprodutibilidade (OTHONOS, 1997).

### 3.4.2 Técnica Interferométrica

O sistema de gravação interferométrico consiste em uma fonte de radiação (laser) que trabalha no espectro do ultravioleta (UV). O feixe de luz UV é difratado nas ordens  $\pm 1$ , utilizando uma máscara de fase e realinhados na superfície da fibra ótica através de dois espelhos  $E_3$  e  $E_4$ . O feixe de luz de ordem zero da máscara é bloqueado por um anteparo opaco. Neste tipo de montagem os espelhos são movimentados a fim de posicionar corretamente a incidência dos feixes do laser na fibra ótica de acordo com a Figura 28. Desta forma, permite-se que os ajustes dos feixes sofram uma interferência num mesmo ponto da fibra e produzam um padrão de interferência.

O suporte da fibra encontra-se sobre um anteparo com deslocamento horizontal que é ajustado transversalmente. O diâmetro do feixe pode ser alterado por uma lente (íris) posicionada logo após a saída do laser, de forma a definir o comprimento da rede gravada e selecionar a região do feixe de laser com melhor padrão espacial. Para melhor focalizar os feixes na fibra, uma lente cilíndrica é colocada entre os espelhos e a fibra.

Neste tipo de montagem, o comprimento de onda refletido pela rede gravada é determinado pela metade do ângulo de cruzamento entre os feixes e pelo comprimento de onda do laser de gravação (MELTZ *et al*, 1989).

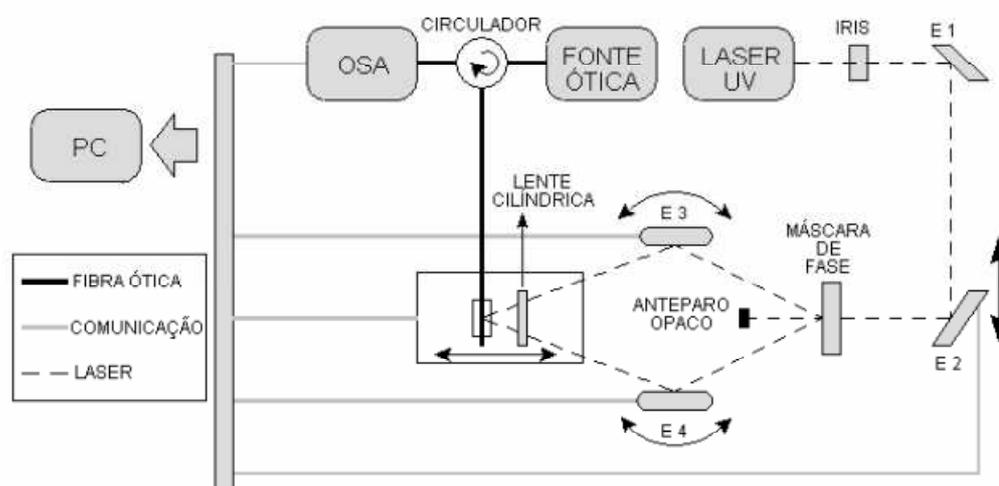


Figura 28: Esquema de fabricação de FBG pelo método interferométrico, adaptado de (MELTZ *et al*, 1989).

### 3.5 Tipos de Redes de Bragg

Até o momento sabe-se que existe uma grande variedade de tipos de redes de Bragg inscritas em fibras óticas de silicato de germânio. Estas podem ser classificadas pela maneira como ocorre a sua formação ou crescimento, pelas diferentes condições de exposição à radiação, pelas diferentes formas de inscrição e processos de recozimento, dentre outras propriedades foto-induzidas nas mesmas.

De acordo com Canning, poderia haver uma revisão na nomenclatura de classificação de diferentes tipos de redes de Bragg, separando-se efetivamente a cronologia histórica de descobrimento das questões relacionadas às propriedades do regime de exposição e conseqüente forma de crescimento das redes. Com esta nova abordagem existiriam dois grandes grupos principais de tipos de rede: as redes com variações do índice de refração abaixo do limiar de dano (denominadas tipo I) e aquelas associadas às variações acima do limiar de dano (denominadas tipo II). Contudo, ocorrerá situações que será difícil utilizarem esta nova forma de

classificação, visto que o limiar de dano em alguns casos contempla redes normais do tipo In (tipo II A). Estas redes podem eventualmente ser submetidas a estados de tensão que conduzam ao surgimento de danos em sua estrutura (CANNING, 2008).

### 3.6 Classificações Relacionadas às Propriedades de Crescimento

#### 3.6.1 Redes do Tipo I

São os tipos de rede mais comuns. Podem ser fabricadas com os mais diversos tipos de fibras fotossensíveis. Geralmente, o espectro em reflexão deste tipo de rede é igual a 1-T, onde T representa o espectro de transmissão de acordo com a Figura 29. Logo, os espectros de reflexão e transmissão são complementares e, conseqüentemente, as perdas de potência por absorção podem ser desconsideradas.

As redes podem ser classificadas como do tipo I quando a sua concentração molar de  $\text{GeO}_2$  no núcleo da fibra ótica for menor que 20 %, caso das fibras-padrão de telecomunicações. Para estes tipos de rede se considera uma relação entre a intensidade da potência da radiação UV e as variações do índice de refração do núcleo (CANNING, 2008; MIHAILOV *et al*, 2008).

Geralmente, as redes foto-induzidas por exposição a radiações (UV) são formadas pela combinação de múltiplas ordens de difração através de uma máscara de fase, a fim de reproduzir um padrão de interferência inscrito no núcleo de uma fibra ótica de silicato de germânio. Foi pela forma como se dá esta modulação no núcleo que o processo ficou conhecido por variação de índice do tipo I. No processo de fabricação destes tipos de rede, a radiação (UV) induz uma transformação nos centros de defeitos de um vidro com silicato de germânio, resultando numa densificação da estrutura do vidro. Esta modificação no centro de defeitos é seguida por variações nos parâmetros do espectro visível e das bandas de absorção de (UV) conforme as relações de Kramers-Kronig relativas às variações do índice de refração do núcleo da fibra (CANNING, 2010).

No caso das fibras de sílica dopadas com germânio, os níveis de energia necessários coincidem com as bandas de absorção do centro de deficiência em oxigênio, que são em torno de 244 nm e 320 nm. Para sua fabricação podem ser

usados lasers de frequência duplicada Ar (244 nm), lasers KrF (248 nm pulsado), lasers ArF (193 nm pulsado), dentre outros (CANNING, 2010).

O processo de inscrição das redes de Bragg através da simples absorção de fótons pode ser feita por inscrição direta utilizando uma máscara de fase ou através de um interferômetro (esquemas Mach Zhender, Sagnac).

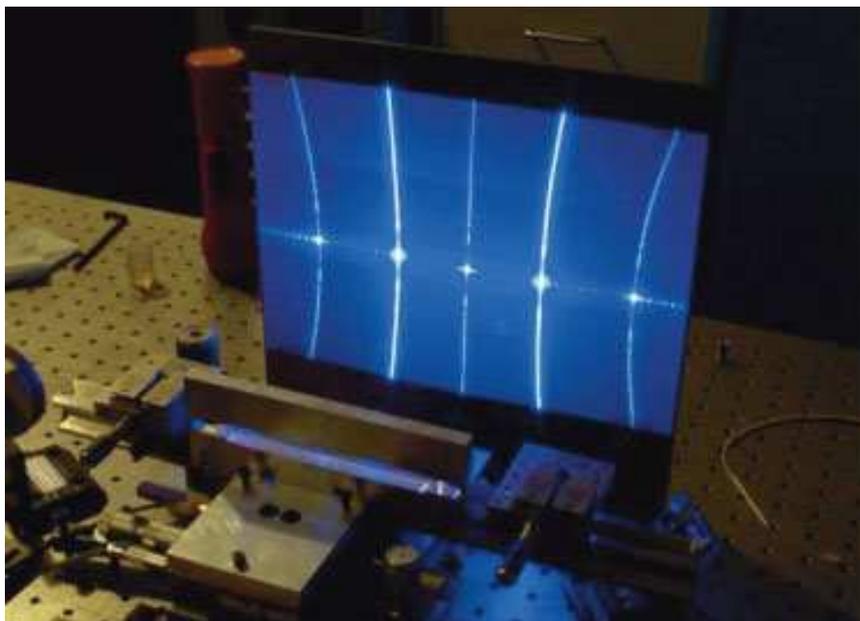


Figura 29: Ordens de difração com máscara de fase em rede do tipo I e demais tipos, adaptado de (CANNING, 2008).

Acredita-se que durante a mudança do índice de refração quando da formação da rede, surgem tensões locais e cogita-se que estas são responsáveis pela baixa estabilidade térmica deste tipo de rede (tipicamente até 320 °C). O decaimento térmico destes tipos de rede está associado com a relaxação das mudanças foto-induzidas no índice de refração efetivo das partes irradiadas da fibra por radiação (UV). Deste modo, é estabelecida uma degradação total e irreversível das redes de Bragg inscritas em fibras de sílica dopadas com germânio. Entretanto, supõe-se que a mudança no índice de refração pode ser devido a algumas razões, tais como: variações nas distribuições eletrônicas dos defeitos, variações na densificação, variações de aumento de tensões (VASIL'EV, 2005).

Um dos inconvenientes das redes do tipo I induzidas por laser UV é que estas são completamente apagadas em temperaturas ao redor da temperatura de 800 °C.

O pesquisador Smelser e seus colaboradores vêm estudando a fabricação de redes do tipo I utilizando laser IV ultra-rápido. Nas redes do tipo I é possível melhorar sua estabilidade térmica, aumentando-se o tempo de exposição da radiação UV (SMELSER *et al*, 2008).

Outra técnica para ampliar a estabilidade térmica das redes do tipo I é usar um processo térmico de recozimento na estrutura amorfa do vidro para melhorar a potência das redes. Após esta sequência de estabilização térmica (recozimento), as redes podem operar com segurança em temperaturas de até 400 °C.

Existe uma possibilidade de re-arranjo da estrutura intrínseca do vidro que permite fabricar redes com capacidade de trabalhar acima de 400 °C sem perda de potência, com um correto delineamento dos espectros de reflexão. Estas vantagens não são possíveis com os outros tipos de rede de Bragg (ASLUND *et al*, 2009).

As redes convencionais do tipo I desenvolvidas inicialmente para telecomunicações são preparadas termicamente para operar abaixo de 100 °C, em algumas situações especiais até no máximo 200 °C. Elas têm a vantagem de apresentarem baixas perdas de inserção e podem ser inscritas com um perfil espectral refinado (alta precisão) entre outros aspectos que favorecem sua utilização em sensoriamento. Depois que foram descobertos outros métodos de fabricação de redes de Bragg, estes tipos de rede passaram a ter outro papel em sensoriamento ou em aplicações com laser. Ainda continuam sendo um dos tipos mais usados, pois são relativamente fáceis de serem inscritas com pouca complexidade em diferentes tipos de fibras (PHING *et al*, 2009).

### **3.6.2 Redes do Tipo In (Tipo II A)**

As redes do tipo In (tipo II A) são inscritas em fibras com alta concentração molar de GeO<sub>2</sub> com valores acima de 20 %. A amplitude da modulação do índice de refração induzido para a primeira ordem de difração num primeiro momento aumenta, depois decresce quase a zero e, posteriormente, aumenta de novo, tendendo a saturar. Ao se analisar a segunda ordem de difração é possível notar que neste tipo de rede o deslocamento do comprimento de onda ressonante durante a inscrição indica que o índice de refração se torna negativo no máximo do padrão de interferência da radiação (UV) num segundo estágio de crescimento

da reflexão. O efeito do decréscimo no índice de refração induzido pela radiação (UV) é denominado de fotossensibilidade II A. Sabe-se que as redes deste tipo estão intimamente relacionadas às variações elásticas dos estados de tensão a que a estrutura do vidro é submetida quando irradiada. Isto é comprovado pelo fato de que estes tipos de rede são fabricados mais rapidamente se for aplicado um estado de tensão (tração) na fibra ótica durante a inscrição da rede de Bragg. Estas redes não são inscritas em toda a seção de gravação na fibra, mas apenas em uma fina camada próxima da superfície livre, não havendo garantia que a distribuição de tensões seja a mesma em toda a fibra.

Observou-se experimentalmente que estes tipos de rede possuem uma resistência térmica de aproximadamente 500 °C e, com a otimização da intensidade, pode-se chegar a 700 °C, conforme observado na Figura 30. O decréscimo na intensidade resulta numa melhora da resistência térmica, exceto em situações onde o alívio de tensão ocorre através do rompimento ou no início do processo de dano da rede.

Apesar de serem necessárias fluências superiores às das redes tipo I, os ajustes e aumento da resistência térmica das redes tipo In (tipo II A) foram importantes para continuar os estudos sobre este assunto. Estas objetivaram a fabricação de redes para temperaturas elevadas com baixas atenuações, quando comparadas com as redes tipo II, através das tecnologias convencionais de inscrição de redes de Bragg.

O pesquisador Lindner e sua equipe conseguiram resultados satisfatórios de fabricação de redes do tipo II A sem hidrogenação para temperaturas de até 600 °C utilizando laser de pulso de nanossegundo (LINDNER *et al*, 2010).

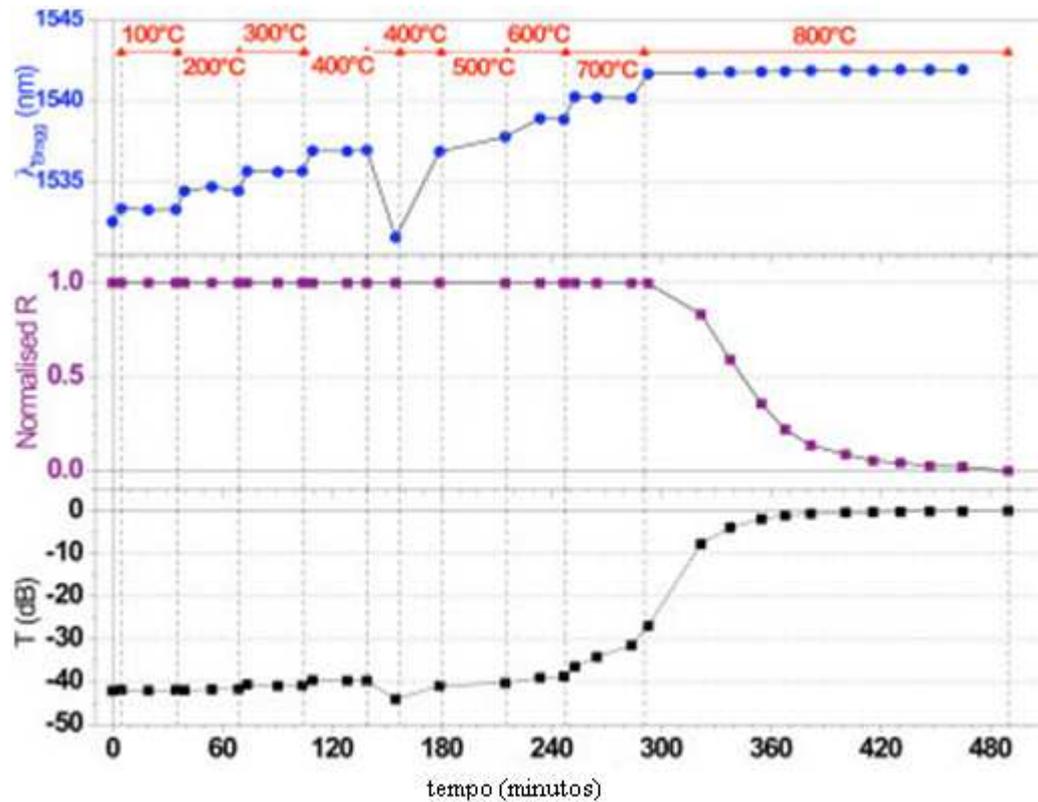


Figura 30: Recozimento isócrono da rede tipo In (tipo II A) para altas temperaturas, adaptado de (GROOTHOFF, 2004).

### 3.6.3 Redes do Tipo IH (Hidrogenadas)

Nestes tipos de rede se emprega a forma mais comum de sensibilização que é carregar as fibras óticas com hidrogênio (hidrogenação). O processo de reação do hidrogênio com os elementos da fibra é irreversível e a maior parte das mudanças no índice de refração está associada às variações espectrais dos defeitos, sugerindo um maior alívio de tensões com uma diminuição da faixa de relaxação estrutural. Apesar da duração do tempo de exposição, a hidrogenação surgiu para ampliar as variações do índice através de um processo com laser de femtossegundo, usando grandes comprimentos de onda e abaixo do limiar de dano do vidro.

Sabe-se que o hidrogênio é um elemento químico que fica dissolvido neste tipo de vidro. Deste modo, ocorrem complexas reações catalíticas que são sensíveis às variações de temperatura. Por exemplo, a formação de hidróxido de germânio (GeOH) pode ocorrer na presença de hidrogênio abaixo de 300 °C, mas

já para o hidróxido de silício (SiOH), isto só é possível acima de 500 °C. Com os exemplos anteriores observa-se a complexidade e variabilidade dos processos químicos envolvidos nestes tipos de redes produzidas em fibras hidrogenadas. A mais concreta manifestação desta complexidade química nos processos de hidrogenação está relacionada às curvas de relaxamento de recozimento que apresentam características exponenciais (CANNING, 2010).

### **3.6.4 Redes do Tipo I Hp (Tipo I A)**

Estes tipos de rede surgiram a partir de estudos relacionados com os processos de hidrogenação para a formação das redes do tipo II A. Verificou-se um significativo deslocamento espectral positivo neste tipo de redes. As mudanças no índice de refração em redes inscritas em fibras hidrogenadas são mais facilmente compreendidas através das variações de absorção das radiações (UV) associadas às bandas de defeitos, quando analisadas pelas transformações Kramers-Kronig. Neste caso, não se leva em conta as mudanças de polaridade abaixo da faixa da sílica relativas às mudanças estruturais do vidro.

Eventualmente, mesmo em redes hidrogenadas podem surgir alívios de tensões (provenientes das ligações de hidrogênio) que são importantes para possibilitar qualquer variação grande no índice de refração e que impeçam a formação de redes do tipo In (tipo II A).

Entretanto, o alívio de tensões nos arredores do vidro não expostos às regiões de alta intensidade (franjas periódicas), propiciam a relaxação além da região de exposição. Desta forma, acontece um significativo deslocamento do espectro de comprimento de onda. Estas redes foram chamadas de tipo I Hp (tipo I A) e possuem propriedades físicas bem similares às redes do tipo II A. Uma das características mais relevantes é que elas podem ser utilizadas em medições de elevadas temperaturas alcançando até 500 °C.

### **3.6.5 Redes do Tipo I Hs (Hipersensibilizadas)**

O processo de hipersensibilização é realizado em redes convencionais onde a fotossensibilidade intrínseca do vidro é permanentemente acentuada através do hidrogênio e uma pré-exposição de hidrogênio. Estabelece-se um estágio inicial

(usualmente hidreto) para melhorar como um todo a fotossensibilidade nas fibras óticas. Posteriormente, a difusão do hidrogênio para fora da fibra ocasiona uma melhora da resposta fotossensível para a fabricação de componentes óticos. Afasta-se então a possibilidade de outras situações indesejáveis como as bandas de absorção não programadas, difusões de hidrogênio não planejadas e variações no índice de refração (CANNING, 2010).

A hipersensibilização é um termo mais genérico que a descrição acima, sendo que também pode ser utilizada em menor escala em vidros dopados sem hidrogênio. Neste método de fabricação de redes se podem usar fontes óticas não coerentes de baixa intensidade, como o caso de lâmpadas (UV). Através das baixas energias de uma fonte ótica é possível confirmar que os primeiros elementos formados nas reações iniciais do hidrogênio são os hidretos. Quando se utiliza o hidrogênio para realizar a hipersensibilização, existe uma variedade enorme de possibilidades. Uma delas é realizar um aquecimento rápido em uma fibra hidrogenada a altas temperaturas (superior a 900 °C). O benefício do hidrogênio incorporado à fibra pode minimizar ou em alguns casos até remover as indesejáveis formações do radical hidroxila (OH<sup>-</sup>). Este processo permite que haja um aumento da fotossensibilidade permanente, embora isto também possa ser realizado em temperaturas inferiores, utilizando um intervalo de tempo muito mais longo (CANNING, 2010).

Mais recentemente, as fibras óticas de silicato de fósforo submetidas à hipersensibilização em baixas temperaturas vêm sendo estudadas e apresentaram vantagens semelhantes à da foto-hipersensibilização na maioria dos casos. O processo consiste em substituir a sensibilização inicial realizada através de radiação, por um processo de aquecimento à temperatura de 80 °C durante a fase de hidrogenação da fibra. Todavia, a hipersensibilização térmica a baixas temperaturas é um processo de muito baixa energia e ainda existem dúvidas com relação à estabilidade intrínseca do material, apesar dos experimentos realizados produzirem curvas de respostas linearizadas com grandes variações no índice de refração para menores fluências comparadas com as fibras óticas carregadas completamente com hidrogênio (CANNING, 2001).

Na sequência da Figura 31 observar-se como ocorre o processo de hipersensibilização. No item (a) ocorre o carregamento de hidrogênio H<sub>2</sub>, tipicamente com pressões maiores que 200 atm e temperaturas de 373 K. A

hipersensibilização pode ser alcançada em alguns tipos de vidro durante este carregamento. No item (b), para que ocorra efetivamente a foto-hipersensibilização da fibra com hidrogênio, aplica-se uma exposição com laser apropriado (simplex fóton 193 nm, 244 nm, 266 nm ou 355 nm, também se pode usar multi-fóton 386 nm, 488 nm ou 876 nm). Além destes tipos de lasers, a sensibilização térmica pode ser realizada por outras fontes de calor, como um laser de CO<sub>2</sub>. No item (c) são apresentadas as moléculas de H<sub>2</sub> remanescentes que podem se difundir para o exterior da fibra. E finalmente, no item (d), a rede pode ser inscrita no meio óptico já hipersensibilizado.

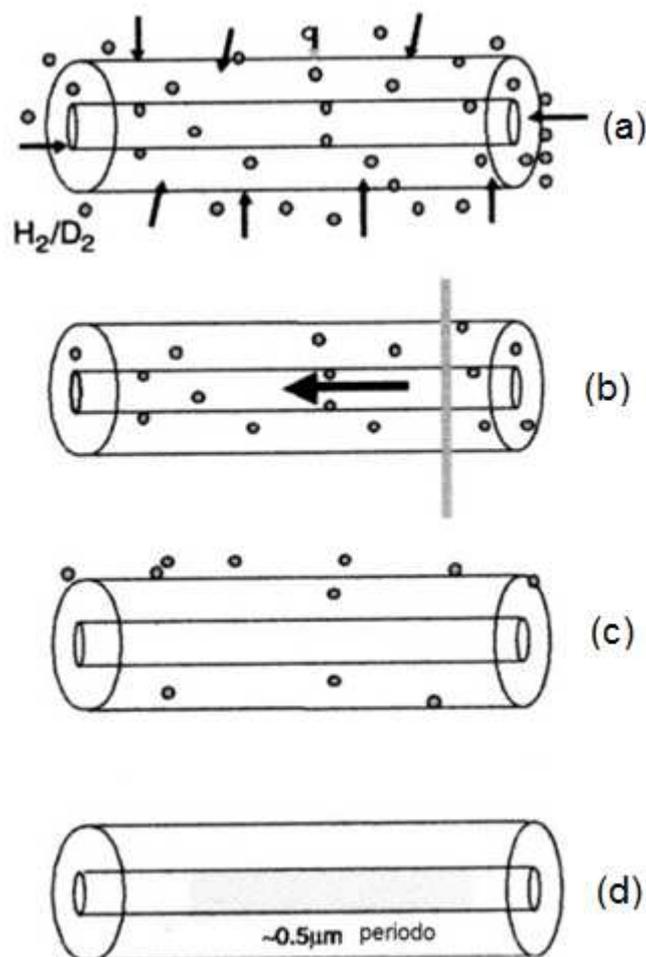


Figura 31: Sequência do processo de hipersensibilização para redes do tipo I Hs, adaptado de (CANNING, 2006).

### 3.6.6 Redes do Tipo I d (Densificação)

O processo de densificação é obtido acessando diretamente a faixa limite do vidro, através do enfraquecimento e quebra direta da ligação Si-O. O processo é realizado logo abaixo do limiar de dano, porém, com energia suficiente para irradiar dois fótons com 193 nm e por isso não pode ser considerado como uma rede do tipo II.

O processo de fabricação da fibra produz tensões intrínsecas que podem resultar em uma relaxação da sílica quando se aplica uma energia suficiente. A alta intensidade da radiação por laser pode estimular a sílica e permitir que ela tenha um alívio na sua estrutura produzindo assim o processo de densificação. Quando a sílica absorve altas intensidades de radiação ela se funde localmente ao redor deste estado de excitação, que momentaneamente se resfria, acarretando um estado de tensão intrínseco. Com este processo geralmente ocorre um aumento da densidade do material. A magnitude da densificação depende da duração do pulso de excitação: pulsos longos de laser “*exciplex*” de nanossegundos cobrirão grandes volumes do vidro; pulsos curtos de laser de femtossegundos não cobrem grandes volumes, pois o tempo de decaimento do fóton só produz uma imediata relaxação da estrutura do vidro (GROOTHOFF, 2008).

Na densificação não se observa grande perda difrativa ou ruptura. Entretanto, comparado com outros métodos, as fluências cumulativas tendem a ser consideráveis, especialmente se a densidade de energia for grande o suficiente para desfazer as ligações e permitir, de forma controlada, um resfriamento rápido do vidro. Comparadas com as redes danificadas (tipo II), as redes do tipo I d apresentam atenuações menores, embora as perdas por espalhamento tendam a ser superiores que as das redes do tipo I.

Mais recentemente, com a descoberta das fibras de cristais fotônicos e o emprego do laser de femtossegundo, se consegue trabalhar logo abaixo do limiar de dano, sendo possível obter resultados satisfatórios em fibras convencionais. Contudo, o método de densificação é mais adequado para ser utilizado na fabricação de redes de Bragg em fibras de cristais fotônicos (CANNING, 2008).

### 3.6.7 Redes do Tipo II (Danificadas)

As redes do tipo II (danificadas) são formadas ao se aumentar a energia um pouco acima do limiar de dano de um determinado tipo de vidro. Nesta estrutura ocorre um alívio de tensões através de uma ruptura local, permitindo que sejam inscritas redes ultra-estáveis (sobrevivem acima de 900 °C). Sua confecção é realizada utilizando laser ArF com um único pulso para inscrição na fibra ótica. Deste modo, se consegue posicionar melhor o dano localizado e consequentemente obter uma superior qualidade de inscrição com o aumento do controle das perdas por espalhamento. Estas são algumas das vantagens de se inscrever estes tipos de redes por intermédio de laser de femtossegundo. De um modo geral, estes tipos de rede apresentam propriedades similares às redes do tipo II inscritas com 193 nm. Ultimamente, o método de absorção multi-fóton usando pulsos ultra-curtos (100 - 600 fs) vem se popularizando cada vez mais para fabricar redes de período longo (LPG) ou redes de Bragg (FBG), com o uso da banda de absorção (redes do tipo I) ou diretamente no limite da faixa do vidro (redes do tipo II) (ASLUND *et al*, 2010).

Uma vantagem de se usar femtolaseres para produzir o dano localizado nas fibras é que as variações térmicas são produzidas em fração de segundos, além da possibilidade de se inscrever no núcleo da fibra através do revestimento e em estruturas tridimensionais como cristais fotônicos, conforme a Figura 32. Esta tecnologia vem se apresentando como uma alternativa promissora para fabricação de componentes e estruturas óticas altamente estáveis, apesar de não estar totalmente consolidada a sua capacidade de controlar o processo de fabricação abaixo do limiar de dano (ASLUND *et al*, 2008; LI *et al*, 2008).

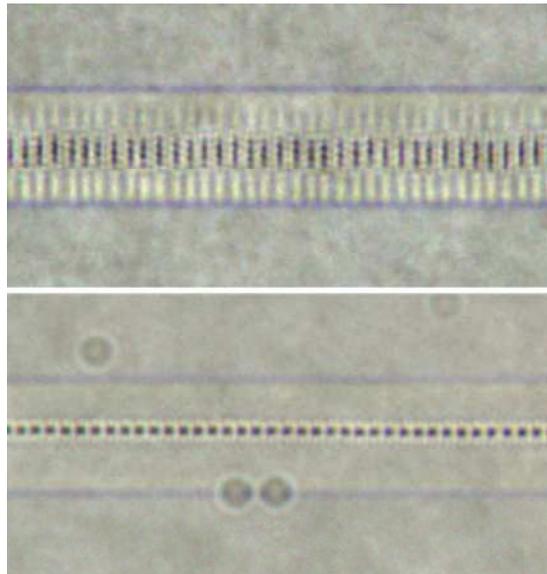


Figura 32: Rede inscrita ponto a ponto por femtossegundo. O item (a) mostra a filamentação na direção do pulso de irradiação. O item (b) mostra a mudança localizada do índice de refração, adaptado de (CANNING, 2008).

### 3.6.8 Redes do Tipo R (Regeneradas)

Recentemente vem crescendo uma demanda por medições de altas temperaturas através do sensoriamento ótico. Desta forma, diversas técnicas de fabricações de redes de Bragg como as citadas nos itens anteriores vêm sendo aprimoradas a fim de atender estas novas necessidades atuais. A escolha correta do tipo de rede, assim como a técnica de variação do índice de refração são pontos de suma relevância para o sucesso da medição em altas temperaturas.

Em função destes novos desafios, Canning *et al*, desenvolveram uma nova metodologia de modulação do índice de refração que permite uma melhor estabilidade das redes de Bragg em altas temperaturas empregando a radiação de um laser de 193 nm para inscrição e pós-processamento secundário de temperatura. Neste novo método é necessária uma rede de base do tipo I, que é processada inicialmente à temperatura em torno de 950 °C. Posteriormente, é observado o crescimento de uma segunda rede que é altamente estável até temperaturas de 1295 °C e, pela maneira como o processo se dá, foram denominadas de redes regeneradas, de acordo com a Figura 33. Estas redes possuem a vantagem de apresentarem perdas (atenuações) próximas às do tipo I.

Infelizmente, a variação local do índice de refração é uma ordem de magnitude menor que as redes de base do tipo I.

Até o momento vem se estudando mais as redes regeneradas em fibras de silicato de germânio co-dopadas com boro e hidrogenadas (CANNING, 2008; BANDYOPADHYAY *et al*, 2008).

Também já foram obtidos resultados satisfatórios de variação do índice regenerado, mas, usando pulsos de laser de nanossegundo com 248 nm para a inscrição da rede de base em uma fibra de germânio de alta fotossensibilidade sem boro e hidrogênio (LINDNER *et al*, 2009).

Para compreender e alcançar a estabilização térmica da rede prioritariamente é importante conhecer os processos de relaxação envolvidos nas mudanças do índice de refração nas redes de base do tipo I, que são caracterizados por uma complexa distribuição de várias relaxações em diferentes tempos e estabilidades térmicas. Estas são características inerentes da preparação do vidro considerando um regime amorfo (CANNING *et al*, 2010).

O vidro é considerado um material meta-estável com uma larga distribuição de processos de relaxação ao longo do tempo. A maioria destes estados de relaxações são descritos através de uma distribuição exponencial de decaimento ou relaxação Debye em um meio dielétrico. Como consequência, a natureza do processamento térmico e a taxa de resfriamento rápido possuem um papel importante na determinação final da variação do índice de refração do vidro (CANNING, 2010).

Uma premissa importante para o desenvolvimento de redes de alta temperatura é considerar que estados de tensão induzem transformações no vidro de uma fibra ótica. Uma fibra ótica é constituída por um núcleo de vidro, geralmente com um dopante para aumentar o índice de refração que, por ocasião de um resfriamento rápido, induz estados de tensão, visto que o coeficiente de expansão térmica do núcleo é maior que o do vidro ao redor (casca) que tende a esfriar primeiro. O fato de pré-existirem estados de tensão na interface entre o núcleo e a casca induz e esclarece a origem de vários fenômenos como a fotossensibilidade.

O processo de regeneração consiste em inscrever uma rede do tipo I em uma fibra fotossensível hidrogenada e posteriormente realizar um pós-recozimento gradualmente em 900 °C, e além, em subseqüentes ciclos. Se esta abordagem é

correta, seria então possível processar termicamente uma fibra ótica e transformar uma rede comum do tipo I em uma rede regenerada ultra-estável até 1295 °C antes da fibra se romper. Apesar da deterioração e quebra da fibra em tais temperaturas, os pedaços que restaram intactos mostraram ser mais fortes que o vidro original. As explicações para este fato ainda não foram completamente esclarecidas, entretanto em estudos iniciais verificou-se microscopicamente que houve uma redução da concentração de Si na estrutura do vidro (CANNING *et al*, 2010; OLIVEIRA, 2010).

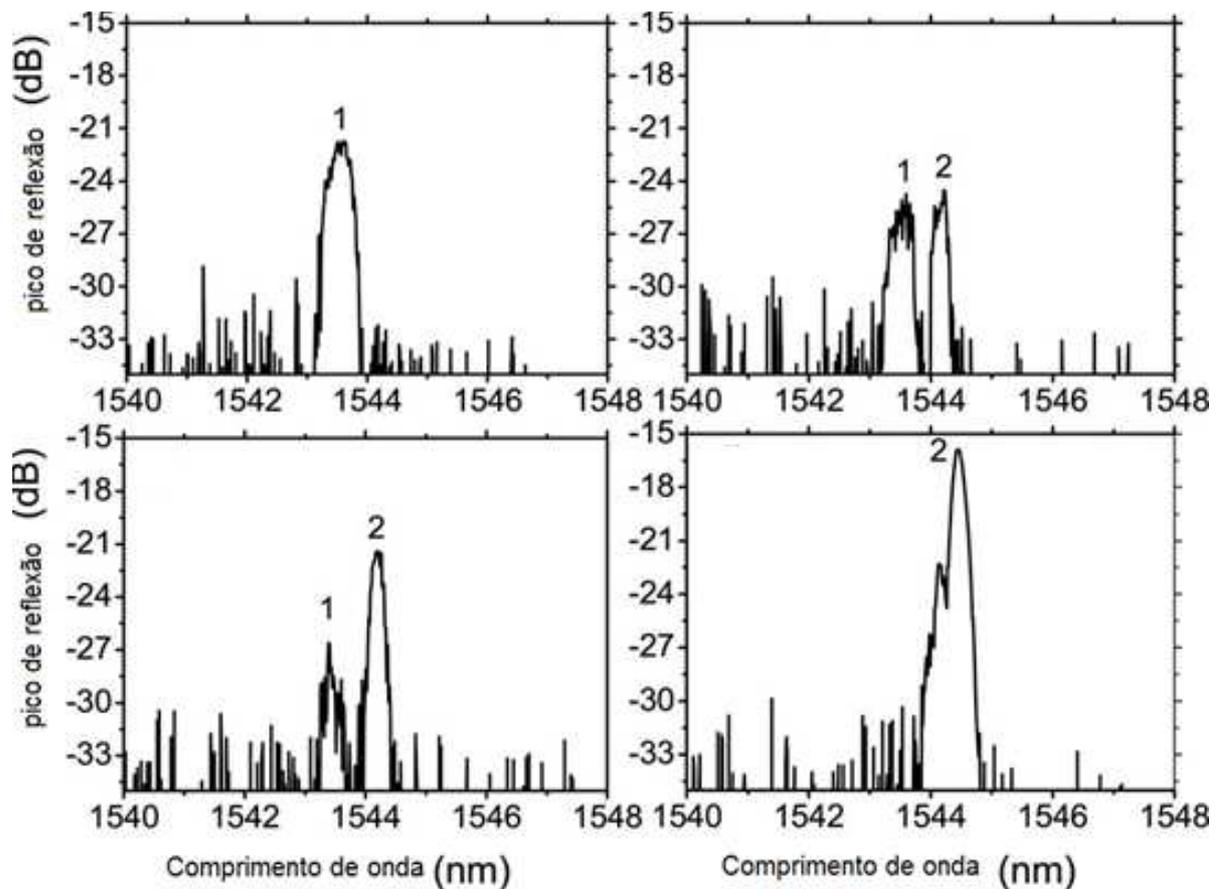


Figura 33: Sequência de crescimento de uma rede regenerada a partir de uma rede de base do tipo I (ponto 1) e transformação em rede regenerada em aproximadamente 900 °C (ponto 2), adaptado de (CANNING, 2009).

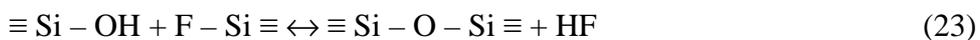
### 3.6.9 Redes de Composição Química (CCG)

As redes de composição químicas (CCG) são formadas através da mudança local e periódica da concentração de um ou mais dopantes no núcleo de uma fibra ótica.

A modulação do índice de refração do núcleo se dá mais pela variação da composição química da estrutura do que pelos defeitos eletrônicos originados pela radiação ou pelos estados de tensão das ligações entre átomos. A concentração de um determinado dopante altera o índice de refração do núcleo, produzindo uma estrutura periódica. Posteriormente, é realizado um tratamento térmico homogêneo sobre toda a estrutura resultando numa redistribuição periódica dos dopantes por difusão diferencial.

Uma vez criada a modulação no índice e o processo de difusão alcance o equilíbrio, a estabilidade térmica do sistema é governada pelas propriedades de difusão do dopante modulado remanescente e possivelmente por outras reações químicas. Estas reações químicas podem ser aquelas que venham a induzir a modificação das ligações na estrutura do vidro (FOKINE, 2004).

Como exemplo das propriedades de difusão química se pode citar a difusão do elemento flúor na sílica contendo grupos de hidroxila (OH). A redução do grupo hidroxila é feita pela difusão hidrogênio-flúor que possui maior mobilidade que o flúor retido sozinho. Percebe-se, então, que a difusão é maior em sistemas que possuem grupos hidroxilas (HELLSING *et al*, 2003) de acordo com a equação (23).



Grupos de hidroxila se propagam através da reação e formação da molécula de água que se realiza pela difusão intersticial. Posteriormente, reage com a estrutura da sílica para formar a reação de acordo com a equação (24).



A difusão da molécula da água é muito maior para as redes de oxigênio. Já a difusão efetiva do oxigênio é maior em regiões que possuem os grupos hidroxila.

Para criar CCGs moduladas com flúor ou oxigênio, de acordo com as equações (23) e (24), é necessário que haja uma formação periódica do grupo hidroxila no núcleo da fibra. Desta forma, a concentração periódica do grupo hidroxila resultará em uma maior difusão periódica efetiva do flúor e do oxigênio.

Emprega-se o mesmo processo de gravação interferométrico por ultravioleta das fibras de sílica convencionais hidrogenadas co-dopadas com germânio-flúor do tipo I, expondo-se o núcleo da fibra à radiação UV a fim de formar os grupos hidroxila com posterior processamento térmico. O germânio tem a finalidade de produzir a estrutura do índice de refração do núcleo e aumentar a concentração dos grupos de hidroxila induzidos pela radiação UV. Após a radiação e a difusão para fora do hidrogênio residual, as redes são colocadas dentro de um forno aumentando-se gradativamente a temperatura numa taxa de 20 - 25 °C/min até atingir 1000 °C. Para aumentar a eficiência na formação das CCGs é realizado um recozimento na faixa de 600 °C a 700 °C, com posterior aquecimento até 1000 °C (FOKINE, 2002; YU, 2008).

No início do processo de produção das CCGs o aumento na temperatura acarreta uma redução gradativa na refletividade da rede (comportamento de uma FBG normal) até um valor que a refletividade é zero. Continuando o processo de aumento da temperatura, surge uma nova rede que cresce até alcançar um valor de saturação. Esta segunda rede criada é denominada de rede de composição química (CCG) de acordo com a Figura 34.

Então, a característica principal deste tipo de rede é a possibilidade de realizar medições do espectro ótico a temperaturas elevadas alcançando temperaturas de até 1000 °C, fato este que é um diferencial bem significativo de ser considerado em aplicações industriais para altas temperaturas, já que até o momento não foram obtidos bons resultados nestas demandas de medição empregando as redes de Bragg ditas convencionais (FOKINE, 2004).

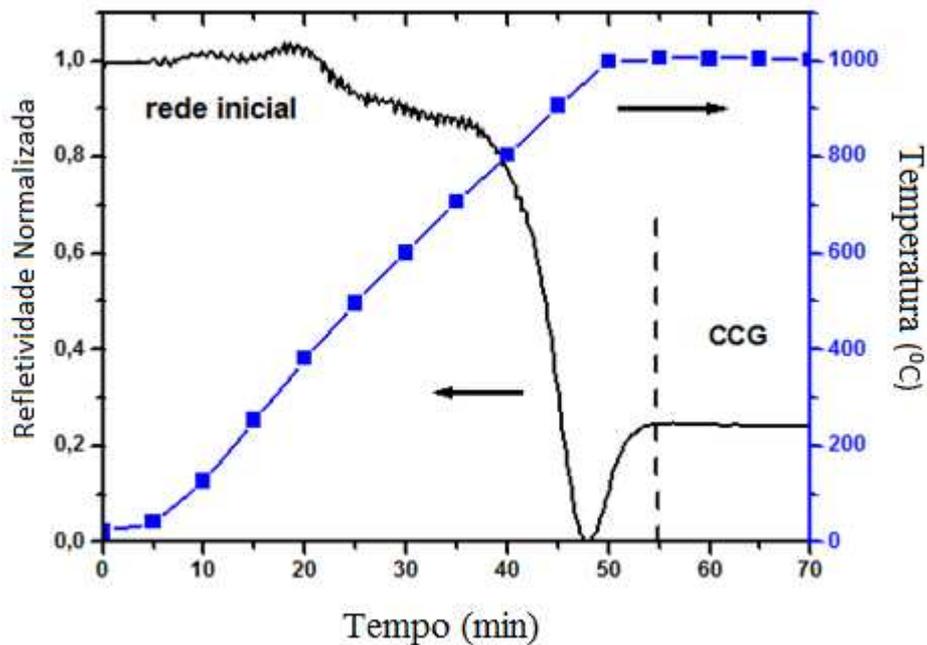


Figura 34: Dinâmica da refletividade de uma CCG durante tratamento térmico, adaptado de (FOKINE, 2004).

Ao se aumentar a temperatura, uma perda gradativa é produzida na refletividade da rede de base do tipo I e que ao final é completamente apagada. Em seguida ao apagamento da rede, uma nova rede surge, evidentemente com menor refletividade ótica e então satura. Esta segunda rede produzida foi oficialmente batizada de rede de composição química (CCG). O valor final do índice de refração da CCG dependerá dos processamentos térmicos de recozimento prévio e tratamento de aquecimento a 1000 °C. O estudo da dependência entre o recozimento prévio e o aquecimento posterior a 1000 °C mostrou que existe uma temperatura ótima de recozimento em torno de 600 °C a 700 °C. O processamento térmico é realizado pelo recozimento inicial da rede a uma dada temperatura fixa, seguido por um aquecimento ao redor de 1000 °C, até que o índice de refração fique saturado (FOKINE, 2004).

Atualmente, as CCGs estão sendo usadas para medições de sensoriamento em deformação e temperatura numa faixa até 900 °C. As respostas das curvas de temperatura se apresentaram como não-lineares na faixa de 24 °C até 900 °C. Contudo, para as medições de deformação à temperatura constante, os deslocamentos dos comprimentos de onda foram lineares (LI, 2009).

### 3.6.10 Redes de Cristais Simples de Safira

Diversos pesquisadores no mundo vêm estudando as técnicas para ampliar a estabilidade térmica das estruturas das redes através de diferentes formas, como se pode observar até o momento. Entretanto, existem algumas limitações a serem superadas que envolvem a fabricação de redes por indução UV que necessitariam ter melhor estabilizações das variações do índice de refração em temperaturas entre 800 °C a 1000 °C. Estas instabilidades térmicas estão associadas à temperatura de transição do vidro da fibra. Em temperaturas elevadas, os centros de cor iniciam uma difusão reversa que propicia um aumento de atenuação e a sílica inicia um autorrecozimento. As degradações óticas e mecânicas se iniciam a partir da temperatura de 800 °C com a fragilização da estrutura do vidro. Exceções são as redes de composição química, as redes do tipo II e, mais recentemente, as redes regeneradas (GROBNIC *et al*, 2006; BUSCH *et al*, 2009).

Na busca por novas alternativas com o objetivo de superar as restrições da sílica para ultra alta temperatura é que se começou a estudar outros materiais com maior estabilidade térmica intrínseca, chegando-se aos cristais simples de safira ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O ponto de fusão da safira pura é de 2050 °C, quase o dobro da sílica e pode satisfatoriamente atuar como meio ótico até a temperatura de 1600 °C.

A fibra de safira é confeccionada a partir de um mineral natural, também conhecido como óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Uma das características favoráveis da fibra de safira é de poder operar em ambientes severos quimicamente, assim como em ultra altas temperaturas sem sofrer alterações. É um material simultaneamente frágil e duro tendo sua resistência e flexibilidade reduzidas em elevadas temperaturas. Desta forma, se deve tomar muito cuidado com o manuseio das fibras de safira, pois estas podem sofrer danos superficiais e, conseqüentemente, diminuição da resistência mecânica. As redes de safira ainda não se estabeleceram largamente no mercado em função do processo de crescimento do cristal ocasionar maiores perdas e custos de produção elevados se comparados com as fibras de sílica. As fibras de safira são utilizadas como guia de luz numa faixa de 240 nm a 4000 nm com uma atenuação de 0,0034 dB/km em 1780 nm. Os principais mecanismos de atenuação nas fibras de safira são o espalhamento Brillouin e Multi-fóton. Fibras de safira podem apresentar impurezas, centros de cor, perturbações superficiais, vazios que contribuem para os espalhamentos e

perdas intrínsecas produzindo diferenças entre os valores teóricos e experimentais em diversas situações (SHEN *et al*, 1999; XIAO *et al*, 2003).

Ao contrário da fibra de sílica, as fibras de safira são confeccionadas sem casca, fato que produz um indesejável número de características que serão descritas a seguir.

a) Fibras de safira são cristais simples e não podem ser fabricados como uma estrutura núcleo-casca, da mesma forma que as fibras de sílica, através de um sistema bastão e tubo. Isto porque as correntes convectivas na zona de fusão destroem a estrutura geométrica do bastão de base (KIST, 1995).

b) Contaminantes sobre a superfície sem casca da fibra com um índice de refração maior que o do núcleo da fibra provocarão perdas por radiação interferindo na reflexão interna total. Da mesma forma, se o índice de refração do contaminante for menor do que o do núcleo e diferente daquele do ar, ocorrerão espalhamentos nos pontos de descontinuidade (LABELLE, 1986).

c) Implementar um revestimento na fibra de safira permitiria uma operação em modo simples, aperfeiçoando as propriedades de guiamento da luz, prevenindo as perdas por radiação e melhorando a resistência mecânica do suporte do núcleo da fibra. Entretanto, as dificuldades no momento é encontrar um material que possa revestir o núcleo e suportar temperaturas de 1600 °C em curtos períodos de tempo. Este material também deveria possuir um coeficiente de expansão térmica próximo àquela do núcleo a fim de não produzir tensões internas.

Atualmente, sem o revestimento as fibras de safira podem ser consideradas como um núcleo que guia a luz. Como consequência, estas fibras conseguem propagar um grande número de modos, com uma ampla faixa de índices de refração efetivos (GROBNIC, 2004).

A configuração para fabricação das fibras é baseada em um sistema a laser de safira Ti. Com duração dos pulsos de 180 fs e largura espectral de 10 nm, utiliza uma máscara de fase que possui um período de  $\Lambda$  de aproximadamente 1758 nm. O feixe do laser é focalizado através de uma lente cilíndrica e de uma máscara de fase sobre a fibra de safira. Esta fibra é colocada a uma distância de

1 mm da máscara de fase tomando muito cuidado com o alinhamento entre a fibra e a máscara, de acordo com a Figura 35 (BUSCH *et al*, 2009).

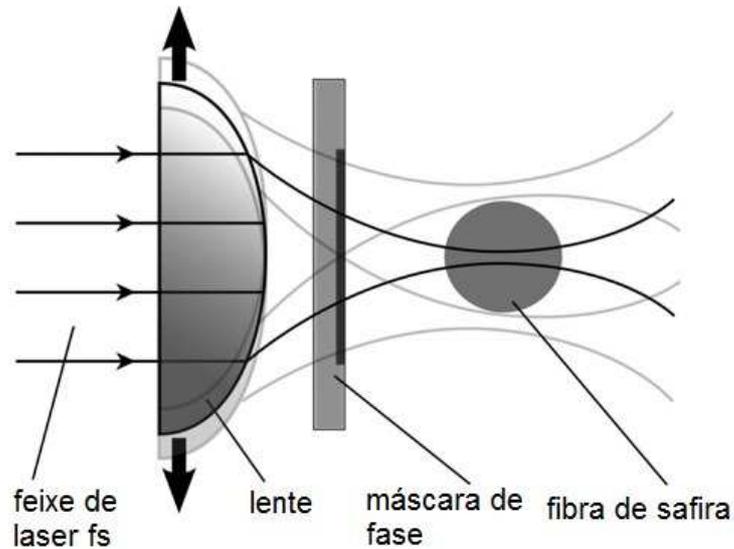


Figura 35: Esquema de fabricação de uma fibra de safira com femtolaser e máscara de fase, adaptado de (BUSCH *et al*, 2009).

### 3.7 Sensibilidade do Comprimento de Onda de Bragg

Como a pesquisa está voltada apenas para as medições de temperatura, não será abordado o desenvolvimento matemático para os efeitos mecânicos devido à tensão longitudinal que também ocorrem nas fibras óticas e foi mencionada no capítulo 2 através da equação (22).

Os efeitos da temperatura estão relacionados com o comprimento de onda de Bragg  $\lambda_b$  de forma duplicada. Inicialmente, a expansão térmica ocasiona uma variação espacial na modulação do índice periódico  $\Lambda$ , que produz um deslocamento do  $\lambda_b$ . Posteriormente, as variações de temperatura resultam em uma mudança no índice de refração, acarretando também um deslocamento no  $\lambda_b$ .

Ao se aplicar como base a equação (21) do capítulo 2, é possível reescrevê-la em função das variações de temperatura de acordo com a equação (25).

$$\lambda_b(T) = 2n_{\text{eff}}(T) \Lambda(T) \quad (25)$$

Derivando-se a equação (25) em função da temperatura (T) para uma deformação ( $\varepsilon$ ) = constante, obtém-se a equação (26).

$$d_{\lambda_b} = 2 \left( \Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (26)$$

Dividindo-se a equação (26) pela equação (22) do capítulo 2 para uma deformação ( $\varepsilon$ ) = constante, obtém-se a equação (27).

$$\frac{d_{\lambda_b}}{\lambda_b} = \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) dT \quad (27)$$

Ao se substituir  $\frac{dn_{eff}}{n_{eff}dT} = \xi$ , onde  $\xi$  é o coeficiente termo-ótico da sílica, que é aproximadamente igual a  $8,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  para um núcleo dopado com germânio, e  $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha$ , onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do vidro, que é igual a  $0,55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , se pode reescrever a equação (27) originando a equação (28).

$$\frac{d_{\lambda_b}}{\lambda_b} = (\alpha + \xi)dT = K_T dT \quad (28)$$

onde,

$(\alpha + \xi) = K_T$  significa a sensibilidade à temperatura da rede de Bragg.

Os valores do  $\xi$  coeficiente termo-ótico e do  $\alpha$  coeficiente de expansão térmica do vidro podem variar em função da concentração do dopante (ex: germânio), ocasionando uma variação da sensibilidade à temperatura da rede de Bragg  $K_T$ .

Logo, a variação do comprimento de onda de Bragg  $\lambda_b$  só para temperatura, onde a deformação ( $\varepsilon$ ) = constante é calculado a partir da equação (29).

$$\frac{\Delta_{\lambda_b}}{\lambda_b} = (\alpha + \xi)\Delta T = K_T \Delta T \quad (29)$$

Com as equações apresentadas anteriormente é possível determinar de uma forma geral, a variação do comprimento de onda da resposta espectral em função de uma dada temperatura. Por exemplo, para uma rede de Bragg com ressonância centrada num comprimento de onda de 1540 nm, obtém-se um valor de sensibilidade de 13,6 pm/(°C), calculando-se este resultado através da equação (30).

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = (\alpha + \xi) \lambda_b \quad (30)$$

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = (0,55 \times 10^{-6} + 8,3 \times 10^{-6})1540$$

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = 0,0136 \frac{nm}{^\circ C} = 13,6 \frac{pm}{^\circ C}$$