Escrita Direta de Guias de Onda por Laser Femtosegundo

Filipe M. M. Marques

26 de maio 2018

Resumo

Neste trabalho experimental faz-se o estudo do método de escrita direta por laser femtosegundo como técnica de fabrico de componentes óticos integrados em sílica fundida. Fabricaram-se sete guias lineares a diferentes profundidades. Foram estudadas as características de transmissão de guias de onda fabricados por esta técnica.

1 Introdução

A Tecnologia Ótica está presente em vários setores da sociedade atual. Enquanto as fibras óticas gozam já de elevado estatuto como meio de transporte de informação por excelência, circuitos de ótica integrada encontram aplicações em comunicações, medicina e outras áreas.

As técnicas mais utilizadas na fabricação de circuitos de ótica integrada têm origem na indústria de semicondutores, envolvendo a deposição de camadas dielétricas e processamento litrográfico. No entanto, a fabricação de dispositivos por estes processos é lenta -requer diversos passos- e dispendiosa -necessita de ambiente de sala limpa-. Como alternativa, pode ser usada a escrita direta por laser femtosegundo.

A escrita direta por laser femtosegundo recorre a efeitos de absorção não-linear para modificar, em profundidade, a estrutura de materiais transparentes. Esta técnica permite a fabricação de grande variedade de dispositivos, como guias de onda, acopladores direcionais, junções Y, gratings, entre outros, com elevada velocidade de produção e alta resolução. Permite ainda a conceção de estruturas tridimensionais (3-D). Neste documento será analisado um sistema de escrita direta por feixe femtosegundo. Serão relatadas a fabricação e caracterização de guias por este método.

2 Fabricação de Dispositivos de Ótica Integrada por Laser Femtosegundo

2.1 Laser Femtosegundo

Um laser femtosegundo emite pulsos óticos com dimensão temporal da ordem dos femtosegundos $(1 fs = 10^{-15} s)$. Pulsos deste tamanho são obtidos pelo método de *mode locking*, no qual se impõem relações de fase entre os diversos modos longitudinais da cavidade. No entanto, estes pulsos têm pouca energia, sendo necessária a sua amplificação por "*chirped pulse amplification*" (CPA), como demonstrado na Figura 1. O resultado final são pulsos ultra-curtos de elevada potência.



Figura 1: Esquema do método de "chirped pulse amplification" [3]

2.2 Escrita Direta por Laser Femtosegundo

Quando um feixe laser femtosegundo é focado num material, transparente no comprimento de onda do feixe, ocorre absorção não-linear confinada num volume muito pequeno. Como resultado da absorção, o material pode sofrer mudanças estruturais ou de fase, originando uma alteração permanente localizada do índice de refração. Dando uso a esta variação de índice é possível guiar luz.

Para escrever estruturas dentro de um material basta transladar o ponto focal. Há duas configurações possíveis para escrita direta (Figura 2). Na configuração transversal o substrato é deslocado perpendicularmente ao feixe, enquanto que na configuração longitudinal é deslocado na direção dos pulsos laser. Neste projeto dá-se uso à configuração transversal.



Figura 2: Configurações de Escrita Direta: a) Transversal e b) Longitudinal. [4]



Figura 3: Sistema Ótico utilizado na escrita direta de guias por laser femtosegundo

3 Execução Experimental

3.1 Fabricação

Setup

Utilizou-se o setup apresentado na Figura 3.

O Laser utilizado é o modelo Sastuma HP da Amplitude Systèmes. Este tem comprimento de onda central 1030 nm, sendo possível gerar segundo e terceiro harmónicos, de 515 nm (o utilizado na escrita direta) e 343 nm, respetivamente. A duração dos pulsos emitidos é < 350 fs. A sua potência é controlada por software externo, através de uma lâmina de $\lambda/2$ e dois filmes finos polarizadores no ângulo de Brewster: rodando a lâmina de $\lambda/2$, é possível controlar a divisão de potência entre as duas polarizações, sendo apenas uma aproveitada para a escrita.

Até atingir o substrato, o feixe é expandido por duas lentes plano-convexas e passa por uma lâmina de $\lambda/2$ para ser escolhida a polarização de escrita. De seguida, reflete num espelho dicróico e segue para a objetiva que o foca no substrato. A tridimensionalidade das estruturas de escrita é garantida por carruagens XY controladas externamente; a profundidade do foco é definida por outra carruagem em Z, que controla o posicionamento da objetiva.

A visualização em tempo real do processo é possível através de um CCD que reúne a luz que é refletida na amostra, passa pelo espelho dicróico e é focada no CCD.

Calibração

Sendo este um sistema ótico complexo, são necessários alguns cuidados na sua calibração. Neste caso foi apenas necessário alinhar o substrato, por forma a que esta esteja paralela à mesa ótica e perpendicular ao feixe. O substrato é colocado nas carruagens XY, e fixado por vácuo. De seguida, analisando a imagem do CCD, foca-se o feixe (com baixa intensidade) na superfície do substrato. Repetindo este processo noutros pontos é possível nivelar a amostra.

Sequência experimental

Pretendeu-se testar efeitos de profundidade em guias de onda. A Figura 4 apresenta um esquema dos guias, escritos nas seguintes condições:

- Potência: $P \simeq 123, 6 \, mW$ (medida com potenciómetro)
- Polarização: segundo a direção de escrita.
- Velocidade de escrita: $v = 200 \, \mu m/s$
- Escrita segundo -yy.

É importante referir que, durante a escrita dos guias à mesma abcissa (guias 2 a 4), a imagem no CCD não era a esperada: isto deveu-se à interferência devido à alteração de índice de refração promovida pelos guias escritos anteriormente. Outro aspeto a ter em conta é a profundidade "real" dos guias: como o índice de refração do substrato é superior ao do ar, o feixe laser vai sofrer refração a entrar no meio e o foco estará mais perto da superfície do que o previsto.



Figura 4: Esquema dos guias de onda. A numeração corresponde à ordem de escrita

3.2 Caracterização

Um guia de onda pode ser caracterizado pelas suas perdas de propagação e perfil modal. Por questões logísticas, não foi possível caracterizar os guias descritos acima. Analisou-se, sim, um substrato com cinco guias lineares e um acoplador direcional.

Foram utilizados dois *setups* de medição (Figuras 5 e 6). Em ambos os casos utilizaram-se dois lasers: um laser vermelho ($\lambda = 633 nm$) para alinhamento e um laser sintonizável (Santec TSL_210V) na região do infravermelho. Este último foi usado pois a sílica apresenta atenuação mínima na janela dos 1, 5 μm .

3.2.1 Perdas de Inserção

O setup representado na Figura 5 permite a medida das perdas totais de inserção no guia. A radiação de uma fonte lase é injetada numa fibra ótica monomodo. Esta fibra é acoplada ao guia a caracterizar, por intermédio de carruagens micrométricas com controlo piezoelétrico. A radiação à saída do guia é acoplada a outra fibra monomodo, sendo medida por um potenciómetro EXFO Optical Test System IQ-203. É usado index-matching para reduzir reflexões de Fresnel e, assim, melhorar as medições.



Figura 5: Setup para medição das Perdas de Inserção.

As perdas são calculadas por $PI = 10log_{10}(\frac{P_{out}}{P_{ref}})$ (dB), onde P_{out} é a potência medida como especificado acima, e P_{ref} é a potência medida pelo mesmo método, mas retirando a amostra e acoplando as duas fibras. Esta medida inclui as perdas por propagação no guia, bem como as perdas por acoplamento fibraguia.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para os diferentes guias.

# Guia	1	2	3	4	5
PI(dB)	-1,74	-2,38	-1,67	-2,19	-6,27

Tabela 1: Perdas de Inserção

Como se pode ver, as perdas são da ordem dos dB, o que está em concordância com os resultados de [5].

3.2.2 Perfil Modal

Para determinar as perdas de acoplamento é necessário conhecer as distribuições modais, tanto da fibra como do guia de onda a caracterizar. O setup utilizado (Figura 6), é semelhante ao anterior, mas a radiação à saída do guia passa por uma objetiva e é lida num CCD. O CCD não tem, de origem, sensibilidade ao comprimento de onda de radiação utilizado, pelo que lhe foi aplicado um coating fluorescente.



Figura 6: Setup para caracterização do perfil modal.

A Figura 6 apresenta os perfis modais a) da fibra e b) de um dos guias caracterizados (o perfil dos outros guias é semelhante), obtidos pelo software LaseView. Como se pode ver, o perfil dos guias é semelhante ao perfil da fibra, que segue uma distribuição gaussiana. É também possível concluir que os guias são monomodo.

Para distribuições gaussianas, a eficiência de acoplamento é dada por:

$$\eta = \frac{4}{\left(\frac{W_x}{d} + \frac{d}{W_x}\right)\left(\frac{W_y}{d} + \frac{d}{W_y}\right)}$$

onde W_x e W_y são as larguras das gaussianas ,a 1/e do máximo, nas duas direções ortogonais do modo, e d é a largura do modo da fibra definido da mesma forma.

As perdas de acoplamento de uma interface podem ser obtidas a partir da eficiência de acoplamento, por:

$$CL = 10 \log_{10}(\eta)$$

Os resultados estão apresentados na Tabela 2.



Para distribuições gaussianas, a eficiência de aco- Figura 7: Perfis modais de: a) fibra e b) um dos guias.

# Guia	1	2	3	4	5
η	0,84	0,93	0,86	0,98	0,99
CL (dB)	-0,78	-0,32	-0,66	-0,07	-0,04

Tabela 2: Perdas de Inserção

3.2.3 Perdas em função do comprimento de onda

O setup apresentado na Figura 8 permite analisar o espetro de um acoplador direcional. Relativamente ao esquema da Figura 5, substituiu-se apenas o laser por uma fonte de espetro largo, sendo a radiação à saída de um dos braços do acoplador direcionada a um OSA (Optical Spectrum Analyser)



Figura 8: Setup para caracterização em comprimento de onda (Acoplador direcional).

A Figura 9 apresenta o espetro dos dois braços do acoplador. Como se pode ver, há transferência de energia entre os braços, notando-se complementaridade: o máximo de potência de um braço corresponde ao mínimo de energia do outro.

4 Conclusão

Neste trabalho explorou-se o método escrita direta de guias de onda em substrato de vidro, por laser femtosegundo. Foram fabricados sete guias, a profundidades diversas, com potência de feixe de $123 \, mW$ e $200 \, \mu m/s$ de velocidade de escrita.

A caracterização incidiu num outro conjunto de guias. Mediram-se as perdas de inserção, sendo estas da ordem das unidades de dB. Observou-se que os guias apresentam perfil de intensidade gaussiano, sendo a mínima eficiência de acoplamento de 0,84, resultando em perda de acoplamento máxima de 0,78 dB.

O método utilizado permite a fabricação de guias de onda tridimensionais no interior de materiais transparentes, como sílica fundida, com alta resolução espacial.



Figura 9: Espetro dos dois braços de um acoplador feito por escrita direta por laser femtosegundo.

Referências

- Introduction to macroscopic power scaling principles for high-order harmonic generation

 Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/a-Principleof-chirped-pulse-amplification-to-avoid-damageand-nonlinear-effects_fig1_311484436 [accessed 8 May, 2018]
- [2] Itoh K, Watanabe W. Integration of Three-Dimensional Waveguides by Femtosecond Laser Pulses. IPAP Books 2 2005; 355-360
- [3] Gattass RR, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. Nature Photonics 2008; 2:219-225.
- [4] João Maia. Femtosecond Laser Micromachining and Applications in Microfluidics and Optofluidics. Master's thesis, 2016
- [5] Vítor Amorim. Fabrication of Integrated Optical Devices in Fused Silica by Femtosecond Laser Direct Writing. Master's thesis, 2016