

Relatório: Escrita direta a LASER

Rui Oliveira, 201202386

6 de Dezembro de 2015

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Data de término da realização da experiência: 23 de Novembro de 2016

Resumo

Neste trabalho experimental faz-se o estudo da técnica de escrita direta a LASER como técnica de fabrico de componentes óticos integrados. Foram estudadas as características de transmissão de guias de onda escritos por esta técnica em função da velocidade de escrita e o acoplamento de potencia ótica em guias de onda também fabricados por esta técnica em função da separação entre os guias que compõe o acoplador na sua zona de interação.

1 Introdução

O foco deste trabalho foi o uso de um "LASER fentossegundo" para fabricação de guias de onda e acopladores direcionais em lâminas de sílica usando escrita direta a LASER.

Um LASER fentossegundo é um LASER pulsado que emite pulsos ultra-curtos a uma certa frequência. Um pulso ultra-curto é um pulso cuja dimensão temporal é da ordem do ps ou fs . Um exemplo deste tipo de pulsos são ondas moduladas por gaussianas de largura temporal muito estreita, representados na figura 1. No caso do LASER usado neste trabalho experimental esta modulação é feita com recurso ao uso de uma célula acusto-ótica. Estas células baseiam-se no efeito acusto-ótico que consiste na modulação da permissividade elétrica de um material a partir da geração de ondas acústicas nesse material. Em particular, neste tipo de aplicação, o processo consiste num material piezo-elétrico que atua mecanicamente

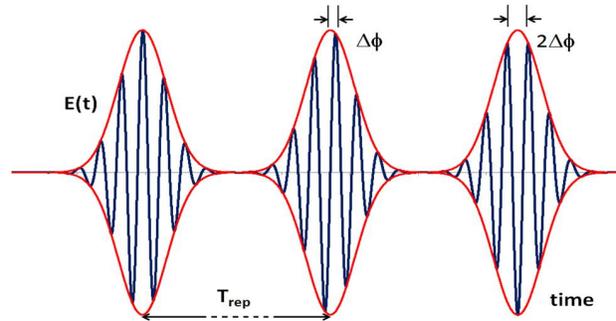


Figura 1: Representação $E(t)$ exemplificando pulsos ultra-curtos[1].

sobre um meio transparente gerando ondas acústicas que causam a variação do índice de refração num material transparente que geram a modulação da onda elétrica do LASER. Esta modulação resulta da formação de ondas estacionárias no meio transparente criando um *grating* de difração. Várias formas de modulação podem ser atingidas, como por exemplo a variação de orientação do feixe laser (figura 2) ou a

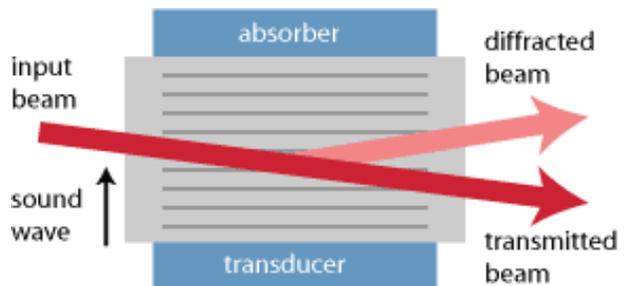


Figura 2: Mudança de direção de um feixe LASER por uma célula acusto-ótica[2]

mudança de direção associada à mudança de polari-

zação (figura 3).

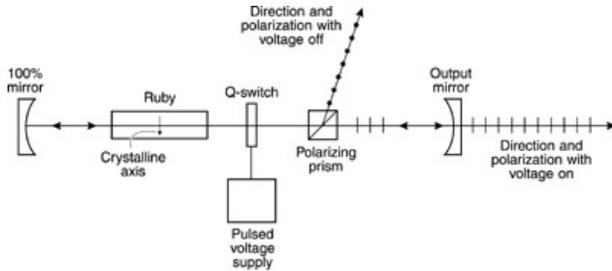


Figura 3: Mudança de direção e polarização de um feixe LASER por via de uma célula acusto-ótica[3].

A escrita direta a LASER é uma técnica poderosa de micro-fabricação de dispositivos em ótica integrada. Quando um LASER fs é focado no interior de um material transparente a densidade volúmica de energia pode atingir uma ordem tal que, por via de efeitos não lineares, há a criação de uma mudança permanente no índice de refração local[4]. Isto permite a criação de dispositivos óticos em 3D com as mais diversas funcionalidades. Neste trabalho experimental, o foco foram guias de onda e acopladores direcionais. Um esquema da técnica e do resultado da escrita de um guia de onda pode ser vista nas imagens da figura 4. Um acoplador direcional é um

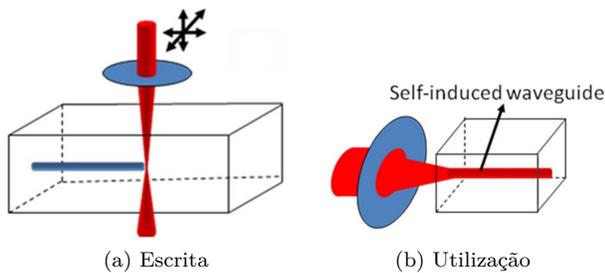


Figura 4: Método de escrita para um guia de onda em ótica integrada e exemplo de aplicação[5].

dispositivo constituído por dois guias de onda "próximo" um do outro à escala micro-métrica, de forma a que a luz propagando em cada guia acople ao outro e se "misture" numa determinada razão, dada pelos parâmetros físicos do sistema. Este é um dispositivo conhecido em fibra ótica (figura 5) mas que pode ser

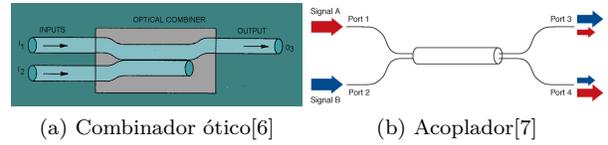


Figura 5: Acopladores direcionais em fibra ótica

feito em ótica integrada usando esta técnica de fabricação. Um esquema deste tipo de dispositivos em ótica integrada pode ser visto na figura 6.

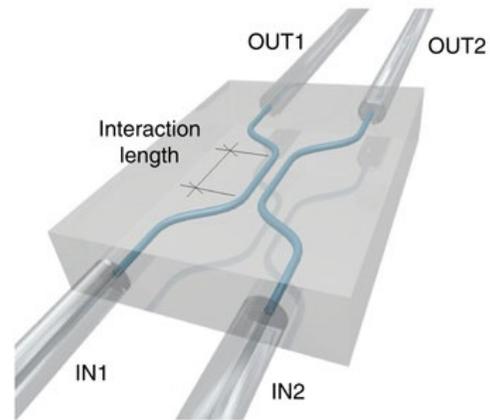


Figura 6: Acoplador em ótica integrada[8]

2 Execução experimental

2.1 Preparativos experimentais

O setup experimental para este trabalho consiste no sistema do LASER fs e num carril para deslocar a amostra sobre o mesmo. O LASER é inicialmente emitido horizontalmente sobre a mesa ótica de trabalho pelo que parte do setup envolve componentes para subir a cota do laser (periscópio constituído por dois espelhos a 45°). Outros componentes habituais são o expansor de feixe, construído com duas lentes convergentes com pontos focais diferentes (figura 7)

e polarizadores (ou lâminas de meio comprimento de

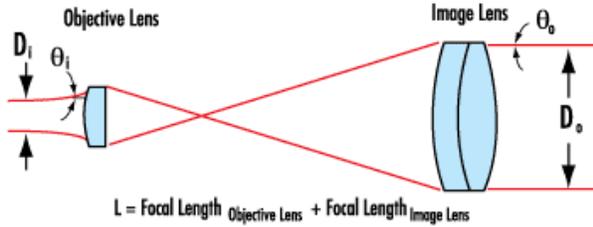


Figura 7: Expansor de feixe[9]

onda, no caso de se tratar de um feixe já polarizado), dado que a polarização ótima para a escrita deve ser tal que seja coincidente com a direção da escrita. Um esquema do setup utilizado pode ser visto na figura 8. O feixe de luz acima do espelho dicróico que incide na

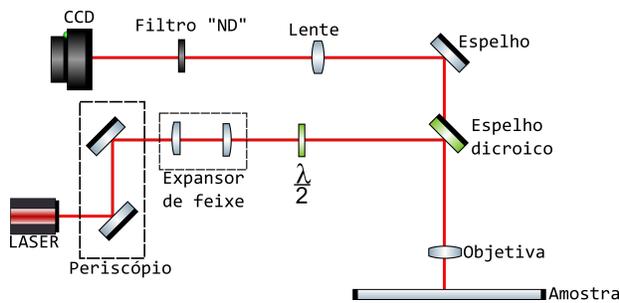


Figura 8: Setup experimental

câmara permite fazer a calibração da profundidade de escrita. Observando o foco de luz no monitor é possível saber se se esta no topo (ou fundo) da lâmina. A partir desse ponto focal é possível com um parafuso micrométrico graduado escolher a profundidade de escrita.

Uma primeira fase do trabalho, ainda antes de qualquer estudo concreto da escrita direta a LASER foi a calibração do LASER e a limpeza e alinhamento dos componentes óticos do sistema. O LASER usado permite calibração da potência ótica numa escala que não à saída do mesmo. O procedimento de calibração da potência segue os seguintes traços gerais:

- Escolher o *duty-cycle* do LASER;

- Colocar o medidor de potência ótica no local onde se quer fazer a referência da potência;
- Usando o controlo da célula acusto-ótica procura-se o máximo ou o mínimo da potencia ótica;
- Introduzir os valores lidos de mínimo ou máximo de potência ótica no software.

A partir deste ponto a potência ótica pode ser regulada à vontade ente o mínimo e máximo calibrados usando o controlo do software.

Os componentes foram limpos com recurso a ar comprimido e papel de limpeza adequado. Os componentes foram alinhados usando uma baixa potência ótica do LASER e com recurso a uma régua e a um material fluorescente para que se pudesse seguir o caminho ótico usando os óculos de proteção.

2.2 Execução

Neste trabalho experimental decidiu-se estudar os guias criados em função da velocidade de escrita e estudar os acopladores direcionais em função da separação entre as zonas de interação.

Antevendo um problema de análise, os acopladores direcionais em vês de duas entradas e duas saídas tem apenas uma entrada e uma saída. Isto deve-se ao facto que numa operação simples de escrita (sem recurso a softwares de CAD) as entradas e as saídas dos acopladores direcionais ficariam muito próximas, causando dificuldades de análise (ordem de μm). Por isso o esquema usado para fabrico dos acopladores direcionais foi o da figura 9.

As velocidades de escrita usadas foram: $50\mu m s^{-1}$, $100\mu m s^{-1}$, $150\mu m s^{-1}$, $2000\mu m s^{-1}$, $200\mu m s^{-1}$, $250\mu m s^{-1}$, $300\mu m s^{-1}$, $350\mu m s^{-1}$ e $400\mu m s^{-1}$ por essa ordem. As separações usadas foram $10\mu m$, $20\mu m$, $5\mu m$, $7\mu m$ e $12\mu m$ também por essa ordem. A potência usada foi $125mW$ em ambos os casos e a profundidade de escrita foi de $100\mu m$. No caso dos acopladores a velocidade de escrita foi de $200\mu m$.

¹Este valor foi inserido por acidente em vez de $200\mu m s^{-1}$.

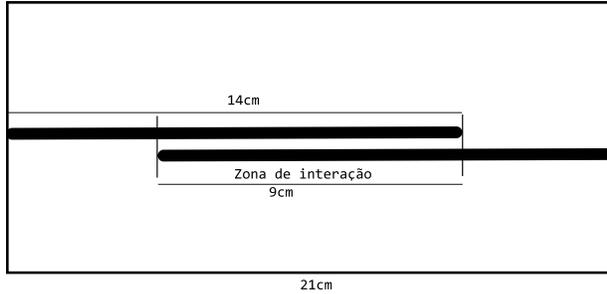


Figura 9: Esquema de fabricação de acopladores direcionais

3 Resultados e discussão

Os resultados dos guias de onda foram analisados em relação às perdas nos mesmos e os acopladores foram analisados face à potência transportada de um guia para o outro. O setup para esta análise consiste numa mesa com controlo de parafusos micrométricos e com controlo por piezoelétricos, um LASER vermelho, usado para alinhamentos, um LASER infravermelho usado para as medições e uma lupa para inspeção visual em alinhamentos. Primeiro alinhou-se a lâmina com as amostras de forma a ficar perpendicular às fibras óticas de entrada e de saída. Em seguida colocou-se uma gota de um líquido de adaptação de índices de refração na ponta das fibras para garantir um bom acoplamento entre as fibras óticas e a lâmina de sílica. Para haver uma referência das perdas inerentes ao circuito ótico, sem contar com a lâmina de sílica, encostaram-se as duas fibras óticas e usando uma potencia ótica de $1mW$ ($0dBm$) obteve-se $869\mu W$ ($-0.6dBm$). Este valor é tomado como referência para os resultados pelo que os valores dos gráficos vêm referenciados em função deste valor de acordo com a expressão $x' = 10 \log(\frac{x}{869})$ em que x é uma potência em μW e x' o equivalente em dB . De notar que os resultados foram obtidos procurando manualmente o máximo absoluto de potência ótica em cada análise, o que nem sempre foi fácil: a fibra ótica usada é mono-modo e, como foi observado (e como é discutido mais à frente neste relatório), os guias escritos também. O modo de propagação na fibra e nos guias tem apenas um máximo, pelo que

ao se encontrar um máximo, sabe-se garantidamente que é o máximo absoluto que se esta a encontrar. Mas encontrar este máximo muitas vezes foi limitado pela falta de sensibilidade nos parafusos micrométricos, e pelo curto curso dos controlos piezoelétricos.

Quanto à velocidade de escrita os resultados podem ser vistos no gráfico da figura 10. A primeira

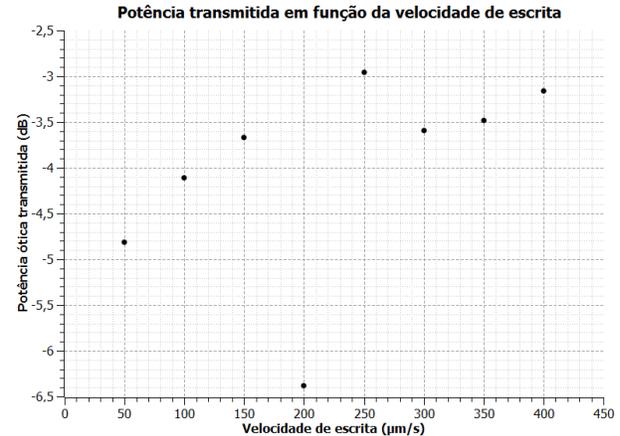


Figura 10: Resultados da análise da potência transmitida num guia em função da velocidade de escrita

nota vai para o ponto nos $200\mu m/s$. Este ponto apresenta uma baixa potência transmitida. Este facto não será devido ao facto de o guia estar mal escrito em si, mas devido aos problemas na procura do máximo discutidos anteriormente. O resultado a $2000\mu m/s$ foi excluído do gráfico por ficar muito longe do resto da escala do gráfico, mas para referência o valor lido foi de $-3.68dB$. Observa-se um máximo nos $250\mu m/s^{-1}$, que sugere a existência, pelo menos localmente, de uma velocidade ótima de escrita. Retirando o ponto que terá sido mal medido, observa-se também linearidade até $250\mu m/s^{-1}$.

Os resultados para os acopladores direcionais podem ser vistos no gráfico da figura 11. A interpretação destes pontos é menos trivial. Primeiro, considere-se a forma do perfil da fibra que pode ser vista na figura 12. A luz fora do núcleo é que provocará acoplamento ao segundo guia de onda. Considerando por simplicidade um acoplamento perfeito, a curva que dá o acoplamento em função da separação

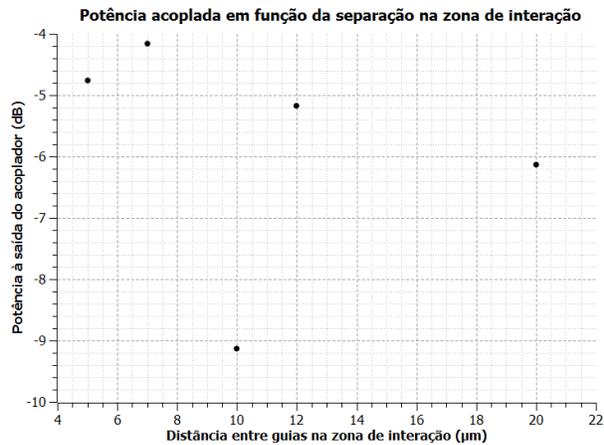


Figura 11: Resultados das medições para os acopladores direcionais

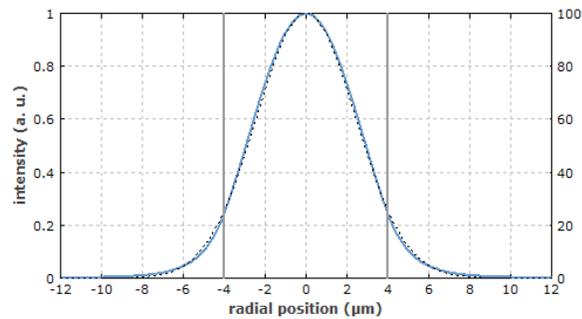


Figura 12: Perfil modal de uma fibra mono-modo com $8\mu m$ de diâmetro.[10]

dos guias terá a forma da convolução das "caudas" deste perfil. Estas "caudas" em guias mono-modo obedecem a uma função de Bessel modificada de segunda espécie de ordem 0 e a forma desta convolução pode ser facilmente calculada numericamente, e pode ser vista na figura 13. Retirando o ponto em $10\mu m$, observa-se alguma semelhança entre as função e os dados registados. Não foi feito um ajuste aos dados por falta de software com as capacidades necessárias.

Como mencionado anteriormente, os guias são mono-modo. A verificação experimental do facto encontra-se na imagem da figura 14. Estas imagens foram obtidas a partir de uma iluminação do guia

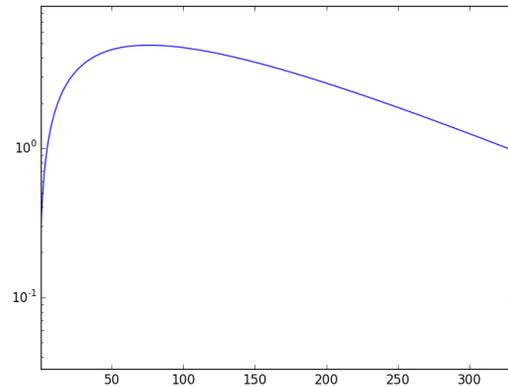


Figura 13: Auto-convolução de uma função de Bessel modificada de segunda espécie de ordem 0. A função foi calculada num domínio arbitrário [1, 8] para evitar a divergência da função em 0. Eixos arbitrários (eixo y em escala logarítmica).

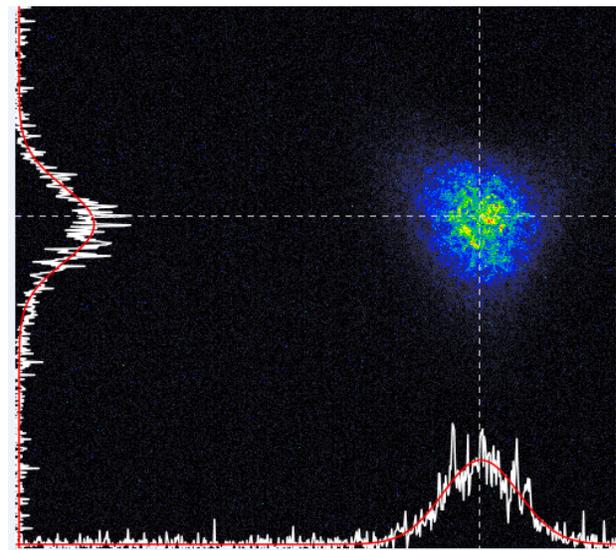


Figura 14: Perfil do modo guiado pelos guias escritos

com um LASER IR @ 1500nm e visualizados com uma câmara IR. A câmara funciona com base num *coating* fluorescente, pelo que alguns artefactos na imagem devem-se a defeitos no *coating* e não defeitos

da propagação em si. O software usado para analisar o perfil dos guias foi o LaseView. A análise do segundo guia escrito mostra um perfil gaussiano nas duas direções e as medições foram de $36.82mm$ de largura a meia altura segundo o eixo x e de $36.17mm$ na direção y . Há que ter em consideração que estas medições foram feitas através da ampliação da saída do guia por uma objetiva de 20x com a câmara a alguma distância (não medida). Os outros foram visualmente semelhantes.

4 Conclusões

Com este trabalho ficaram verificadas algumas das capacidades da escrita direta a LASER em ótica integrada. Com um setup relativamente simples consegue-se fazer escrita em três dimensões de diversos elementos óticos. Um trabalho mais extenso de variação mais fina dos parâmetros e uma análise mais cuidada seriam os passos lógicos seguintes. Ainda assim, o objetivos principais consideram-se cumpridos: foram adquiridos conhecimentos desde a limpeza e alinhamento de componentes óticos à verificação do uso da técnica de escrita direta com LASERs femto-segundo e à análise dos mesmos. Os guias escritos funcionam como meios de condução de luz e os acopladores de facto trocam luz entre eles.

Referências

- [1] “Ultrashort pulses (figure).” [Online]. Available: http://iramis.cea.fr/Images/astImg/1731_2.jpg
- [2] “Acousto-optic cell changing orientation of laser beam (figure).” [Online]. Available: <https://www.rp-photonics.com/img/aom.png>
- [3] “Change in direction and polariazation using acousto-optic cells (figure).” [Online]. Available: http://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-999-LaserCourse/C04-M07-ElectroOptic+AcoustoOpticDevices/7_fig12.jpg
- [4] H. Huang, L.-M. Yang, and J. Liu, “Femtosecond fiber laser direct writing of optical waveguide in glasses,” in *NANOPHOTONICS AND MACROPHOTONICS FOR SPACE ENVIRONMENTS V*, ser. Proceedings of SPIE, E. Taylor and D. Cardimona, Eds., vol. 8164, SPIE. 1000 20TH ST, PO BOX 10, BELLINGHAM, WA 98227-0010 USA: SPIE-INT SOC OPTICAL ENGINEERING, 2011, Proceedings Paper, conference on Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments V (NMSE), San Diego, CA, AUG 22-23, 2011. [Online]. Available: http://www.polaronyx.com/publications/Femtosecond_fiber_laser_direct_writing_in_glasses.pdf
- [5] “Writing and using waveguides written using fs lasers (figure).” [Online]. Available: http://spie.org/Images/Graphics/Newsroom/Imported-2011/003673/003673_10_fig2.jpg
- [6] “Optical combiner (figure).” [Online]. Available: <http://www.tpub.com/neets/tm/30NVM085.GIF>
- [7] “Fiber optics coupler (figure).” [Online]. Available: <https://www.thorlabs.de/images/TabImages/FiberGraph4Mark.jpg>
- [8] “Integrated optics coupler (figure).” [Online]. Available: <http://www.nature.com/ncomms/journal/v2/n11/images/ncomms1570-f1.jpg>
- [9] “Beam expander (figure).” [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/images/articles/3a.gif>
- [10] “Single-mode fiber optics profile (figure).” [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/img/bp_in_sm_fiber1.png