

Escrita de dispositivos ópticos integrados com laser de femtosegundos

Luís A. Fernandes^{1,2}, Jason R. Grenier², Peter R. Herman², J. Stewart Aitchison², Paulo V. S. Marques¹

1. INESC Porto, Dep. Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto

2. Institute for Optical Sciences, and the Dep. of Electrical and Computer Eng. University of Toronto, 10 King's College Rd., Toronto, Ontario, M5S 3G4, Canadá

lfernandes@fc.up.pt

Resumo

O incessante desenvolvimento nos processos de fabrico conducente a um elevado grau de miniaturização tem sido perseguido ao longo das décadas com grande persistência e para aplicação nas mais diversas áreas do conhecimento. Desde o aparecimento dos lasers, a utilização destas fontes de radiação em processos de micromaquinação e escrita directa tem evoluído de forma substancial; mais recentemente, o desenvolvimento de osciladores e lasers amplificados pulsados a emitir num regime femtosegundo tem sido responsável pelo aparecimento de um vasto conjunto de aplicações que requerem a utilização de processos de escrita com resolução submicrométrica e possibilidade de escrita tridimensional. Este artigo descreve sumariamente as características gerais do processo, bem como algumas das aplicações desenvolvidas em óptica.

Introdução

O processamento com lasers tem sido um campo bastante explorado desde os anos 60 com resultados bastante positivos na modificação e estruturação de diversos tipos de materiais. Estes processos foram introduzidos logo após o aparecimento de lasers fiáveis e baseavam-se em processos de absorção linear, onde o comprimento de onda de emissão laser utilizado se situa sobre uma banda de absorção do material exposto.

A absorção não linear em materiais dieléctricos permite a definição de circuitos ópticos integrados em três dimensões.

O desenvolvimento de lasers pulsados ultracurtos (sub-picosegundo) foi determinante para a introdução dos processos de micromaquinação tridimensional de alta resolução, através de interacções não-lineares entre a radiação e a matéria. Para

despoletar estas interacções são requeridas intensidades elevadas, que podem ser criadas utilizando lasers de impulsos ultracurtos focados num volume de dimensões reduzidas [1]. Geralmente são utilizados lasers a emitir comprimentos de onda aos quais os materiais são transparentes para permitir alterações localizadas em profundidade e possibilitando assim a criação de estruturas tridimensionais (Figura 1). Este processo representa um avanço importante na fabricação de estruturas tridimensionais, uma vez que os processos convencionais baseiam-se essencialmente na aplicação sucessiva de etapas de deposição, processos fotolitográficos, seguida de processos de erosão selectiva e eliminação de camadas sacrificiais [2].

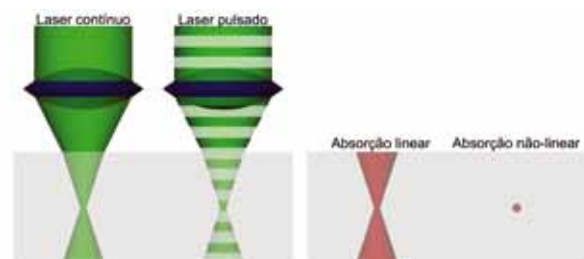


Fig. 1 - Comparação do processo de absorção linear produzido por um laser contínuo com o processo de absorção não-linear produzido por um laser pulsado.

A alta resolução geralmente inerente aos processos de absorção não-linear resulta do facto de que apenas a parte central do volume focal tem intensidade suficiente para ultrapassar o limiar do efeito pretendido. A focagem é fundamental para aumentar a densidade de energia, dependendo, naturalmente, do tipo de laser (duração dos impulsos, taxa de repetição, comprimento de onda, etc) [3].

O processo de modificação de materiais utiliza lasers de dois tipos; num primeiro grupo, osciladores laser que tipicamente emitem impulsos com taxas de repetição em torno dos 80 MHz e energia (por impulso) da ordem de alguns nanojoules até dezenas de nanojoules. No segundo grupo podem encontrar-se os sistemas amplificados, que utilizam energias por impulso da ordem dos milijoules e taxas de

repetição das ordem das centenas de quilohertz, sendo estes os sistemas mais utilizados. A principal diferença entre ambos resulta do facto de que nos sistemas com alta taxa de repetição, o período de tempo entre impulsos é inferior ao tempo de dissipação térmica, pelo que existe um efeito cumulativo não desprezável que determina, na forma e volume, a região afectada pela exposição ao laser.

Os lasers mais comuns são os de titânio:safira (laser de estado sólido) que emitem no infravermelho próximo (~ 0.80 a 1.0 μm). No entanto, na última década surgiram sistemas laser baseados em fibra óptica dopada com itérbio a emitir impulsos com duração da ordem das centenas de femto-segundos a 1.044 μm e que são sistemas bastante mais simples de utilizar, uma vez que não necessitam de alinhamentos constantes, como geralmente acontece no caso dos sistemas mais tradicionais.

Os materiais fotopolimerizáveis são um dos tipos de materiais mais estudados. A fotopolimerização de uma solução monomérica em profundidade utiliza a absorção de vários fótons para induzir a alteração química necessária. Concluído o processo, o material não exposto é simplesmente removido por dissolução, revelando assim a estrutura que se pretende, como exemplificado na Figura 2.

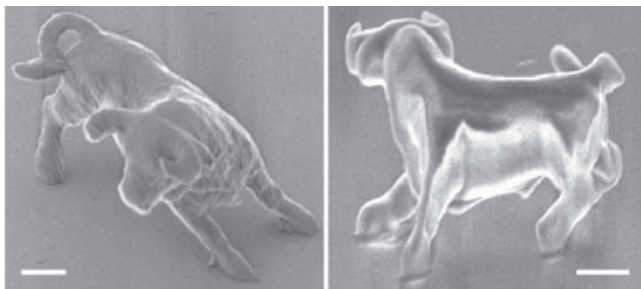


Figura 2 - Estruturas tridimensionais complexas formadas por fotopolimerização selectiva [4]. A escala na imagem é equivalente a 2 μm . (© Nature Publishing Group)

A dimensão mínima das estruturas reportadas é de cerca de algumas dezenas de nanómetros, e depende essencialmente das características do feixe laser utilizado bem como do material exposto. Este valor é muito inferior ao "limite de difracção" em processos similares baseados num regime de absorção linear, já que o processo de fotopolimerização é induzido selectivamente e confinado à zona central do volume focal onde o limiar de intensidade é ultrapassado.

O trabalho reportado nos últimos anos também incidiu sobre materiais amorfos e cristalinos, como sílica e niobato de lítio, respectivamente. Nestes materiais, as modificações induzidas são bastante diferentes: a exposição ao laser provoca a foto-ionização do material, promovendo a passagens de electrões da banda de valência para a banda de condução, sendo que a exposição de materiais transparentes requer a absorção de múltiplos fótons que permitam ultrapassar a energia da banda proibida. Deste processo resulta a transferência de energia para a matriz por processos que ainda não se compreendem completamente; contudo, é claro que existem vários regimes de exposição. A baixa energia ocorre uma fusão localizada do material, responsável por uma alteração do índice de refração isotrópica no volume de interacção; no outro extremo, onde são utiliza-

das intensidades bastante mais elevadas, podem ocorrer micro-explosões dentro do material, o que pode originar o aparecimento de pequenos volumes ócos no interior na região de forte interacção. Estes aspectos podem ser utilizados para gravação de dados em volume com enormes ganhos em densidade de dados [5]. De salientar que as alterações de índice de refração podem resultar quer de alterações físico-químicas do material, após a formação do plasma, quer de alterações dos estados de tensão dentro do material. Na Figura 3 foram desenhados os logótipos do INESC-Porto e da Universidade de Toronto dentro de uma amostra de sílica.



Fig. 3 - Logótipos escritos por ablação com laser pulsado, 20 μm abaixo da superfície de uma lâmina de sílica.

A aplicação mais comum desta tecnologia é a micromaquinação em alta resolução de um grande conjunto de estruturas que podem ser utilizadas nos mais diversos domínios. No caso dos materiais poliméricos e aplicações em óptica, existe um grande interesse na fabricação de nano-estruturas que exibam uma banda óptica proibida, à semelhança do que acontece com o caso das bandas de energia electrónicas proibidas para os electrões em materiais semicondutores. Contudo, os materiais poliméricos têm um índice de refração relativamente baixo, pelo que a estrutura polimérica serve, na maior parte das situações, apenas como molde para a replicação da mesma estrutura (ou do seu negativo) em materiais com índice de refração mais elevado, como é o caso do silício. Neste caso a estrutura é replicada utilizando métodos de dupla inversão (ou o seu negativo por inversão simples) [6].

Outro exemplo bastante explorado na microfabricação em materiais amorfos relaciona-se com a alteração localizada do índice de refração de lâminas de sílica pura para o desenvolvimento de dispositivos em óptica integrada. Neste caso, o aumento do índice de refração localizado ao longo de um determinado caminho permite a fabricação de guias de onda que guiam a radiação por um processo semelhante ao da propagação em fibras ópticas. Os processos convencionais utilizam a modificação do índice de refração pela deposição de diversas camadas, e a sua estruturação lateral utilizando processo fotolitográficos, seguidos, tipicamente, de processos de difusão ou erosão em plasmas reactivos, um processo bastante moroso! No caso da exposição com lasers de femtosegundos, o aumento localizado do índice de refração é induzido directamente, permitindo as condições de guiagem necessárias à fabricação de dispositivos ópticos integrados, sem necessitar de etapas adicionais. A fabricação de dispositivos em sílica pura pode ir um pouco mais longe; a exposição do material a radiação femtosegundo induz anisotropia na taxa de

erosão quando exposto à acção do ácido fluorídrico, fazendo com que surjam cavidades ou relevos nos substratos utilizados, o que pode ser utilizado para o desenvolvimento de componentes essenciais em microfluídica [7]. Deste modo podem ser criadas estruturas para manipulação de fluidos integradas com circuitos ópticos.

Aplicações em óptica integrada

De uma forma geral, a maioria dos dispositivos ópticos integrados fabricados por processos fotolitográficos, podem ser microfabricados por escrita directa com laser femtosegundos, e com a vantagem de se poder obter dispositivos tridimensionais. Por outro lado, a escrita directa permite a integração de diversos componentes a partir de um único processo e tipo de material, o que traz também vantagens em termos de estabilidade e reprodutibilidade dos dispositivos. Dada a característica não linear destes processos, torna-se fundamental estudar e controlar criteriosamente os parâmetros da escrita que determinam a qualidade final dos dispositivos. Nomeadamente, determina-se a intensidade necessária para atingir o limiar do efeito e qual a intensidade máxima antes que ocorra a destruição do material. Dentro desta gama é possível encontrar um conjunto de parâmetros óptimos para a produção de guias com poucas perdas, dependendo destes parâmetros das características e funcionalidades do dispositivo, como sejam o comprimento de onda de operação e características modais.

O sistema utilizado para a obtenção dos resultados apresentados nesta secção foi um laser em fibra dopada com itérbio (IMRA) a emitir impulsos de 300 fs a 1044 nm, com 1 μ J de energia por impulso. Contudo, para aumentar a eficiência do processo utilizou-se um cristal duplicador de frequência para obtenção de impulsos a 522 nm. As perdas registadas devido à geração de segundo harmónico ter uma eficiência de 55% são compensadas pelo aumento de energia por fóton e pela redução da dimensão do volume focal [8]. Os impulsos são então focados 75 μ m abaixo da superfície de uma lâmina de sílica pura através de uma lente esférica com abertura numérica de 0,55. O posicionamento da amostra no plano horizontal e da lente de escrita na posição vertical são asseguradas por plataformas de translação da Aerotech, permitindo uma resolução no posicionamento de 3 nm e velocidades típicas de deslocamento da amostra de 300 μ m/s.

A sílica é dos materiais mais estudados em escrita directa com laser de femtosegundos, mas outros materiais importantes tais como os vidros borossilicato, vidros dopados com terras raras (para a produção de dispositivos com ganho óptico e para a fabricação de lasers integrados), diversos cristais, como o niobato de lítio (devido ao seu elevado efeito electro-óptico), etc, têm sido explorados para a produção de dispositivos funcionais.

Em quase todas as aplicações, é necessária a integração destes dispositivos com outros sistemas já existentes, como seja o acoplamento a fibras ópticas. Para conseguir um valor mínimo de perdas é necessário que as características dos guias fabricados sejam compatíveis com as fibras. Para conseguir este objectivo, é necessário determinar os parâmetros de fabricação que resultam num bom ajuste entre o perfil modal dos guias e das fibras ópticas de acoplamento. Na Figura 4 compara-se o perfil modal de um guia de onda com o perfil modal da fibra mais comum para aplicações em telecomunicações (SMF-28). Existe uma boa correlação entre ambos os perfis modais, o que resulta em perdas de acoplamento da ordem de 0,2 dB e perdas de propagação nos guias na ordem de 0,5 dB/cm ($\lambda=1550$ nm).

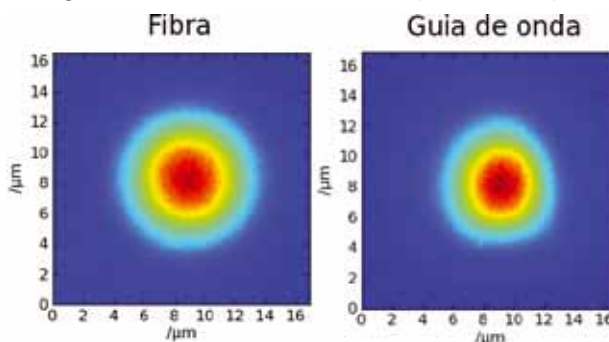


Fig. 4 - Perfis modais a 1550 nm de uma fibra SMF-28 (esquerda) e de um guia de onda em substrato de sílica pura (direita) com diâmetros modais de 10,4 μ m e 8,7 μ m, respectivamente.

A fabricação de guias de onda com lasers de femtosegundo resulta num volume modificado com uma secção bastante assimétrica, o que provoca que na maioria dos casos os guias fabricados sejam birrefringentes ($B \sim 10^{-4}$, definida como a diferença de índice de refração efectivo entre as componentes paralela e perpendicular de um modo guiado).

Escrita directa de redes de Bragg

As redes de Bragg são componentes importantes em óptica guiada, na medida em que permitem obter elevada selectividade espectral através duma modulação periódica do índice de refração no volume de interacção da radiação que se propaga (tipicamente com períodos sub-micrométricos ao longo da direcção de propagação para funcionamento a comprimentos de onda abaixo dos 1,6 μ m). A rede de Bragg funciona como um espelho bastante selectivo em termos espectrais (Figura 5), e em que o comprimento de onda central da radiação reflectida depende do período da modulação do índice de refração e do índice de refração efectivo do modo que se propaga.

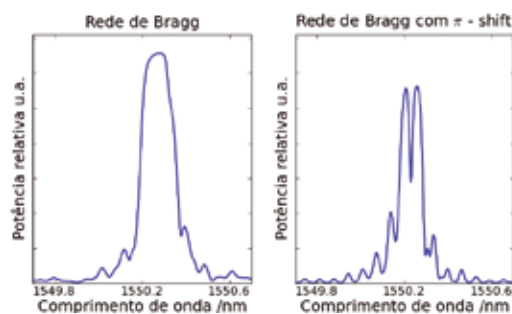


Fig. 5 - Espectro de uma rede de Bragg normal e de uma rede de Bragg com um salto de fase de π .

A fabricação de redes de Bragg integradas com laser femtosegundo é feita num único passo ao contrário do que acontece na escrita de redes Bragg em fibra óptica, onde o núcleo desta é alterado posteriormente ao processo de fabrico da fibra para produzir a rede. Com o uso de tecnologia de laser ultra-rápido, e devido à grande resolução espacial do processo, o núcleo do guia é produzido e ao mesmo tempo modulado para obter a rede de Bragg [9]. Este processo de escrita ponto-a-ponto é feito através do controlo da potência do feixe de escrita ao longo do tempo (e do espaço), utilizando um modulador acusto-óptico no caminho de propagação do feixe de escrita; deste modo podem ser implementadas funções de modulação arbitrárias, das quais se destacam as redes com *chirp* (variação do período ao longo do comprimento) [10], redes com saltos de fase (Figura 5, direita) e apodizadas (variação da amplitude de modulação do índice de refração ao longo do comprimento) [11]. Estas redes podem encontrar aplicação em cavidades ressonantes para lasers integrados, em sensores e produção de filtros espectrais para manipulação temporal e/ou espectral de impulsos de luz.

Acopladores direccionais

Outro dispositivo importante em óptica integrada é o acoplador direccional, que consiste tipicamente em dois guias de ondas próximos, de tal modo que existe interacção entre eles. Estas estruturas podem ser utilizadas como divisores de potência, ou como multiplexadores de comprimento de onda (devido ao facto de que a constante de acoplamento entre guias adjacentes é função do comprimento de onda)

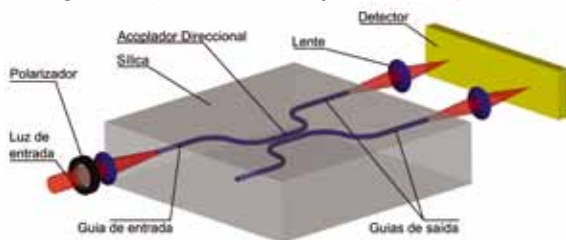


Fig. 6 - Representação esquemática de um acoplador direccional integrado. A polarização da luz à entrada é definida como Vertical e Horizontal relativamente ao plano do substrato.

Tirando partido da dependência da função de transferência destes dispositivos no comprimento de onda, no índice de refração e na birrefringência, foram desenhados acopladores direccionais para funcionar como separadores de polarização [12]. Como mostra a Figura 7, com um comprimento de interacção de cerca de 20 mm, foi possível obter separação completa da polarização para um determinado comprimento de onda.

Outros dispositivos que estão actualmente a ser desenvolvidos e que tiram partido da birrefringência dos guias de onda fabricados por este processo são os retardadores. Através do controlo dos parâmetros de fabricação dos guias é possível obter retardadores $\lambda/2$ e $\lambda/4$ para determinados comprimentos de onda. De futuro, o objectivo é usar estes componentes em conjunto para obter circuitos com aplicações em computação quântica.

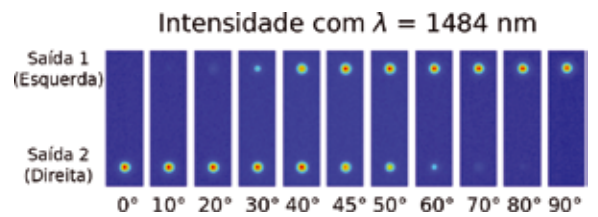


Fig. 7 - Imagens obtidas das saídas do separador de polarização baseado num acoplador direccional quando a orientação do polarizador de entrada varia entre 0°, Polarização Vertical, e 90°, Polarização Horizontal.

Em computação quântica são usados fótons, ou pares de fótons, entrelaçados para obter medidas de interferência quântica. A maioria destas experiências são realizadas em espaço livre e com componentes discretos, daí que o alinhamento destes componentes se torne crítico à medida que os sistemas se tornam mais complexos. A vantagem do uso de componentes integrados é que o alinhamento está intrinsecamente garantido. Por isso, para escalas de complexidade maiores, a fabricação dos componentes integrados é a única forma de obter dispositivos fiáveis, para além da vantagem óbvia de que o tamanho dos dispositivos é também bastante menor devido ao elevado grau de integração.

Óptica integrada com microfluídica

Como já foi referido, a solubilidade da sílica ao ácido fluorídrico aumenta consideravelmente nas regiões expostas ao laser de femtosegundos, permitindo a definição de canais microfluídicos no interior do substrato. Esta tecnologia possibilita uma integração bastante eficiente de canais microfluídicos com dispositivos ópticos integrados, como exemplificado na Figura 8, com todas as vantagens já referidas de estabilidade e fabricação tridimensional.

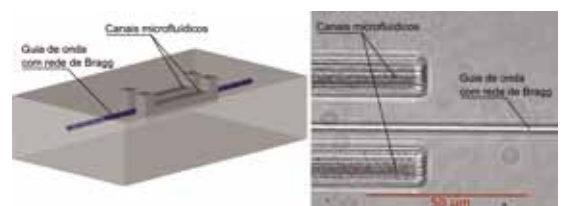


Fig. 8 - Guia de onda com rede de Bragg no meio de dois canais microfluídicos. Esquema (esquerda), imagem de microscópio (direita).

Sensores ópticos de índice de refração baseados em redes de Bragg e em campo evanescente [13], sistemas integrados complexos com canais microfluídicos para electroforese e detecção óptica de elementos químicos e biológicos através de cristais fotónicos [14], foram demonstrados utilizando escrita directa com laser de femtosegundos.

Escrita directa em fibras ópticas

Embora os substratos de eleição para o desenvolvimento de dispositivos em óptica integrada sejam planares, guias de onda podem também ser fabrica-

dos na bainha de fibras ópticas convencionais, interagindo com a radiação guiada no núcleo da própria fibra. Pela sua flexibilidade e fácil manuseamento, as fibras ópticas são ideais para aplicação de sensores em locais de difícil acesso ou onde o uso de sistemas electrónicos não é possível. No caso da escrita em fibras ópticas, um dos principais desafios está no alinhamento do sistema devido à geometria das fibras e à necessidade de alinhar com precisão micrométrica alguns centímetros da mesma. Dispositivos *Lab-on-a-fiber* têm o potencial de ser usados para medição *in vivo* de factores biológicos com possíveis aplicações em biotecnologia.

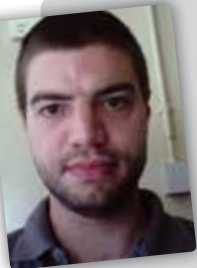
Conclusões

A escrita directa a laser para o processamento de materiais tem sido bastante explorada, e em especial a escrita directa com lasers pulsados femtosegundo tem assumido o carácter mais inovador ao

longo da última década.

Este artigo revê alguns dos aspectos fundamentais que permitem a fabricação de dispositivos ópticos integrados em sílica.

As perspectivas de desenvolvimento e o potencial desta tecnologia são enormes, pelo que certamente iremos assistir a um conjunto de demonstrações significativas e de aplicação nos mais diversos domínios do conhecimento.



Luís A. Fernandes terminou a licenciatura em Física Aplicada pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto em 2006. Desde 2007 é investigador do INESC Porto e iniciou o doutoramento em Física no mesmo instituto, em colaboração com o grupo de fotónica da Universidade de Toronto, para desenvolver escrita directa de circuitos ópticos

integrados com laser de femtosegundos. Em 2010 recebeu uma bolsa da SPIE for Optical Science and Engineering e dois prémios na conferência SPIE Photonics West. É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Optical Society of America, da SPIE e da IEEE Photonics Society; é membro da direcção da SPIE Toronto Student Chapter.



Jason R. Grenier concluiu o bacharelato em 2003 e o mestrado em 2006, ambos em engenharia electrotécnica na Universidade de Waterloo, Canadá. Actualmente é aluno de doutoramento no departamento de engenharia electrotécnica e do grupo de fotónica da Universidade de Toronto, dedicando-se à investigação em tecnologia de lasers de femtosegundos

e às suas aplicações em nanofabricação e em *lab-on-a-fibre*. É detentor de uma bolsa NSERC e de uma bolsa SPIE for Optical Science and Engineering. É membro da SPIE, da Optical Society of America e da IEEE Photonics Society, e presidente do SPIE Toronto Student Chapter.



Paulo V. S. Marques doutorou-se em Física pela Universidade do Porto em 2000. É Professor Auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da FCUP e Investigador da Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC-PORTO, unidade que actualmente coordena. Os seus trabalhos de investigação centram-se no domínio da óptica integrada e microfabricação, sensores integrados e escrita directa a laser. Tem publicados mais de 100 artigos em revistas e conferências internacionais e 4 patentes mundiais.



Peter R. Herman é professor no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Toronto. Lidera um vasto grupo de investigação em aplicações de tecnologias laser para nanofabricação 3D e sistemas ópticos integrados passivos e activos, cristais fotónicos, *lab-on-a-chip* biofotónica e sensores. Tem publicados mais de 200 artigos em revistas e conferências nesta área. É Fellow da Optical Society of America, membro da SPIE e co-chair da conferência SPIE Photonics West 'LASE'.



J. Stewart Aitchison é detentor de uma Nortel chair in Emerging Technology no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Toronto. O seus interesses científicos passam por processamento de sinal e comutação óptica, integração optoelectrónica e biosensores ópticos. De 2004 a 2007 foi director do Emerging Communications Technology Institute da Universidade de Toronto, onde trabalhou para a construção de espaço de micro e nano-fabricação de acesso livre. Desde 2007 é vice-director para a investigação da Faculdade de Ciências Aplicadas e Engenharias da Universidade de Toronto. É Fellow da Optical Society of America, Fellow do Institute of Physics, Londres e, desde 2010, Fellow da AAAS.

- 1 H. Misawa e S. Juodkakis, "3D Laser Microfabrication: Principles and Applications", Wiley (2006).
- 2 M. Madou, "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press (1998).
- 3 R. R. Gattass e E. Mazur, Nature Photonics 2, 219 (2008).
- 4 S. Kawata, H. Sun, T. Tanaka, e K. Takada, Nature 412, 697 (2001).
- 5 M. H. Hong et al., Applied Physics A: Materials Science & Processing 79, 791 (2004).
- 6 N. Tétreault et al., Advanced Materials 18 (4), 457 (2006).
- 7 C. Hnatovsky et al., Optics Letters 30 (14), 1867 (2005).
- 8 L. Shah, A. Arai, S. Eaton, e P. Herman, Optics Express 13, 1999 (2005).
- 9 H. Zhang, S. M. Eaton, e P. R. Herman, Optics Letters 32, 2559 (2007).
- 10 H. Zhang e P. R. Herman, Photonics Technology Letters 21 (5), 277 (2009).
- 11 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman, J. S. Aitchison, e P. V. Marques, "Femtosecond Laser Writing of Phase-Shifted Bragg Grating Waveguides in Fused Silica", Femtosecond Laser Microfabrication (LM) Conference, San Jose, California, Oct. 11, (2009).
- 12 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman, J. S. Aitchison e P. V. S. Marques, "Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers in fused silica", apresentado na conferência SPIE Photonics West, 2010.
- 13 V. Maselli, J. Grenier, S. Ho, e P. Herman, Opt. Express 17, 11719 (2009).
- 14 M. Haque et al., "Photonic Crystal Optofluidics for Electrochromatography on a Chip", apresentado na conferência SPIE Photonics West, (2010)