

# Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência: conceito, limitações e aplicações

M. Melo, J. M. Sousa, M. O. Berendt, S. T. Hendow, J. R. Salcedo

Multiwave Photonics, S.A., Rua Eng. Frederico Ulrich, 2650, 4470-605 Maia

mmelo@multiwavephotonics.com

## Resumo

Neste artigo pretende-se demonstrar as vantagens das propriedades da tecnologia de fibra óptica no desenvolvimento de lasers e amplificadores. É apresentado o estado actual da tecnologia, bem como os factores com maior impacto na limitação actual do desempenho dos lasers de fibra óptica, e as soluções desenvolvidas ou em estudo para os ultrapassar. São também apresentados alguns exemplos de aplicação destes lasers, particularmente em termos de processamento de materiais.

## Introdução

Desde que foram pela primeira vez demonstrados no início dos anos sessenta, quando ainda permitiam a emissão de apenas alguns miliwatts num comprimento de onda de  $1\ \mu\text{m}$  [1], os lasers e amplificadores de fibra óptica têm sido tema de grande actividade científica. Só a partir dos anos setenta, com a significativa redução das perdas de propagação de sinal em fibra óptica, e principalmente a partir dos anos oitenta, com o desenvolvimento dos amplificadores de fibra óptica dopada com érbio (*EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifiers*) operando na janela de telecomunicações de  $1,5\ \mu\text{m}$  [2], é que esta tecnologia recebeu um forte impulso. Desde muito cedo que os lasers e amplificadores de fibra óptica têm sido estudados para aplicações que podem ir desde as telecomunicações ao mapeamento e posicionamento laser, passando pelo processamento de materiais, imagiologia e medicina, usando para tal combinações de diferentes meios de ganho, esquemas de bombagem e desenhos de cavidades [3]. A elevada eficiência, a excelente qualidade modal, a fiabilidade, o confinamento da radiação, a ausência de manutenção e o facto de serem extremamente compactos, são algumas das principais vantagens dos lasers de fibra óptica quando comparados com tecnologias convencionais de estado sólido ou gás. É nestas propriedades únicas, combinadas com o enorme potencial em termos de escalonamento de potência, que o desenvolvimento actual desta tecnologia é suportado [4]. De facto, com o surgimento de

fibras ópticas de elevada área modal (*LMA - Large Mode Area*) com dupla bainha foi possível obter um significativo avanço em termos de escalonamento de potência [5], tornando possível atingir actualmente potências médias da ordem dos quilowatt mantendo operação no modo espacial transversal monomodo. O gráfico da Figura 1 ilustra a evolução recente dos lasers de fibra óptica CW<sup>1</sup> com operação no modo espacial transversal monomodo em termos de potência de saída. É importante referir que no ano de 2010 um novo máximo de 10 kW foi atingido [6].

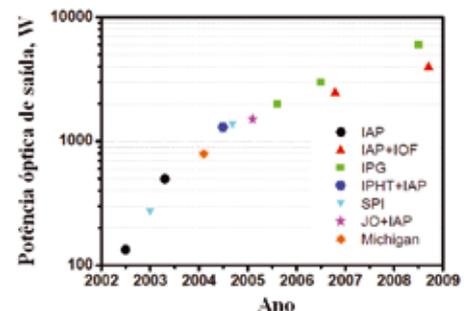


Fig. 1 - Evolução da potência de lasers CW de fibra óptica de dupla bainha com operação monomodo [7].

Apesar da constante evolução científica verificada, apenas nos últimos anos os lasers de fibra óptica ganharam um importante posicionamento industrial. Os lasers baseados em tecnologia de fibra óptica competem, hoje em dia e para muitas aplicações, directamente com os lasers de estado sólido convencionais e de gás, sendo em muitos casos, já considerados como candidatos ideais à sua substituição. Na realidade, apesar do avanços obtidos, ainda existe uma enorme margem de progressão desta tecnologia sendo que o maior desafio é melhorar o seu desempenho, ultrapassando alguns factores limitadores [8]. Alguns desses factores são:

o aparecimento precoce de efeitos não-lineares, a degradação da qualidade modal do feixe de saída e o *photodarkening*<sup>2</sup>. Neste artigo, são inicialmente apresentados os conceitos e as propriedades gerais dos lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência. Alguns dos factores limitativos para o escalonamento de potência são depois descritos, nomeadamente os efeitos não-lineares de espalhamento estimulado de Raman (*SRS – stimulated Raman scattering*) e de Brillouin (*SBS – stimulated Brillouin scattering*). Também o desempenho, com especial atenção para a preservação da qualidade modal do feixe e o *photodarkening*, são objecto de referência neste trabalho. Por último, são apresentados alguns exemplos de aplicação destes lasers, particularmente em termos de processamento de materiais.

## Conceito e propriedades dos lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência

O esquema simplificado de um laser de fibra óptica é apresentado na Figura 2.



Fig. 2 - Laser de fibra óptica.

O conceito deste tipo de lasers é relativamente simples, baseando-se num meio de ganho constituído por um segmento de fibra óptica cujo núcleo é dopado com iões de terras raras, e numa cavidade formada por espelhos dicróicos acoplados ao topo da fibra ou por espelhos integrados em fibra, como por exemplo redes de Bragg em fibra óptica ou espelhos em anel. A radiação de bombeamento pode também ser injectada por intermédio de componentes totalmente em fibra recorrendo a acopladores multiplexadores de comprimento de onda (*WDM – Wavelength Division Multiplexers*). Esta integração totalmente em fibra torna estes lasers extremamente compactos e proporciona uma excelente estabilidade ao longo do tempo, uma vez que não são necessários componentes nem alinhamentos adicionais. Inicialmente, perante a existência de fibras constituídas pelo núcleo e apenas uma bainha, a radiação de bombeamento era acoplada directamente no núcleo requerendo fontes de bombeamento espacialmente coerentes, como é o caso dos lasers semicondutores monomodo, que ainda hoje se encontram limitados a algumas centenas de miliwatts de potência de emissão. Com o aparecimento de fibras ópticas de elevada área modal (*LMA - Large Mode Area*) com

dupla bainha, surgiu um novo conceito que permitiu aumentar em muito a potência de bombeamento injectada na fibra. Neste caso, o núcleo dopado é rodeado por um segundo guia de onda altamente multimodo. Neste segundo guia, normalmente designado por bainha interna, lasers semicondutores de bombeamento com baixa coerência e potências muito elevadas podem ser utilizados para acoplamento de radiação numa área maior quando comparada com a do núcleo. Esta radiação de bombeamento é gradualmente absorvida ao longo do comprimento da fibra e convertida em radiação laser de sinal de elevada coerência e alta potência. O conceito simplificado deste tipo de fibra encontra-se ilustrado na Figura 3.

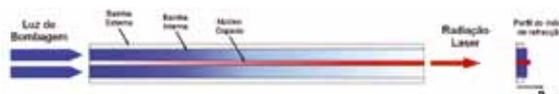


Fig. 3 - Fibra óptica de dupla bainha.

Por forma a eliminar os raios helicoidais, que têm uma baixa sobreposição com o núcleo, são utilizadas geometrias do núcleo e/ou da bainha interna de forma a quebrar a simetria do guia de onda cilíndrico. De entre as várias configurações possíveis, destacam-se a forma em D, as formas octogonal, hexagonal e rectangular, e a do núcleo descentrado. A Figura 4 ilustra as diferentes geometrias e demonstra que uma geometria não circular permite uma maior absorção da radiação de bombeamento ao longo do comprimento da fibra. As formas em D, octogonal e hexagonal são as que melhor combinam um bom acoplamento modal com uma assemblagem de baixas perdas dada a maior compatibilidade com fibras padrão de geometria circular.

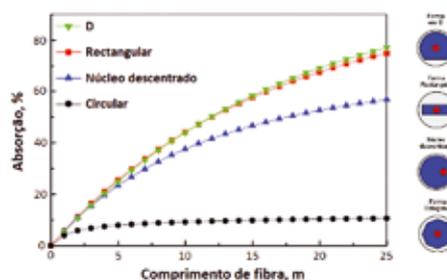


Fig. 4 - Absorção de bombeamento para as diferentes geometrias utilizadas em fibras ópticas de dupla bainha. (© A. Tünnermann)

As fibras de dupla bainha podem também ser fabricadas como fibras microestruturadas [9], conforme representado na Figura 5.



Fig. 5 - Fibra microestruturada com uma bainha de ar.

As fibras microestruturadas oferecem diversas vantagens em relação às fibras convencionais, e é por isso que as

<sup>1</sup> Abreviatura de *Continuous Wave*, expressão que designa um laser contínuo.

<sup>2</sup> Processo quando qualquer objecto se torna escuro (não-transparente) devido à sua iluminação.

fibras de cristais fotônicos (PCF - *Photonic Crystal Fibers*) têm sido alvo de intensa actividade científica nos últimos anos. Estas fibras apresentam características inovadoras bastante interessantes, incluindo a capacidade de serem intrinsecamente monomodo para uma larga gama de comprimentos de onda da radiação [10].

Como se pode ver na Figura 5, estas fibras consistem num núcleo de sílica pura rodeado por uma matriz regular de orifícios de ar que actua como a bainha interna, pela qual a radiação de bombagem não consegue escapar. A bainha interna é depois rodeada por uma rede de pontes de sílica que são substancialmente mais estreitas que o comprimento de onda da radiação guiada. Esta estrutura resulta numa abertura numérica elevada (até 0,8, para a radiação de bombagem), o que reduz ainda mais o requisito de serem usadas fontes de bombagem com elevada coerência. A espessura dos orifícios de ar pode ser escolhida para que se obtenha simultaneamente boa estabilidade mecânica, boa condutividade térmica e perdas mínimas de bombagem. Tal como nas fibras de dupla bainha convencionais, o meio de ganho de um laser ou amplificador usando estas fibras pode ser fabricado introduzindo dopagens com iões de terras raras no núcleo [11].

Tal como descrito, as fibras de dupla bainha de elevada área modal (LMA) e as de cristais fotônicos (PCF) formam neste momento as duas grandes classes de desenhos de fibras ópticas usadas em lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência [12]. No entanto, é importante notar que quase todos os laser e amplificadores de fibra óptica disponíveis comercialmente hoje em dia usam a tecnologia LMA, uma vez que as PCF ainda levantam alguns problemas de integração com outros componentes do sistema, como por exemplo acopladores de bombagem e fibras de saída. A escolha do dopante do núcleo é determinada pelo comprimento de emissão desejado. A Fig. 6 mostra as bandas de emissão para os diferentes iões terras raras.

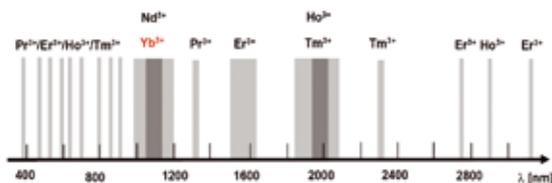


Fig. 6 - Bandas de emissão dos diferentes iões terras raras.

Da Fig. 6 destacam-se três janelas de emissão mais frequentemente usadas em lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência: 1  $\mu\text{m}$ , 1,55  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$ . Neste contexto, o itérbio (Yb<sup>3+</sup>), o érbio (Er<sup>3+</sup>) e o túlio (Tm<sup>3+</sup>) são os elementos mais utilizados como dopantes, devido aos elevados níveis de eficiência obtidos.

### Principais limitações de escalonamento de potência e de desempenho

A atenção despertada pela tecnologia de lasers e amplificadores de fibra óptica exige um constante e forte desenvolvimento. Dispositivos com maior potência de saída, boa qualidade do feixe, garantida pela propagação apenas do

modo espacial transversal fundamental, e fiabilidade sem degradação dos parâmetros iniciais são factores cada vez mais solicitados pela indústria. Neste contexto, os temas abordados nesta secção, e que mais impacto têm nestes factores, são os efeitos não-lineares, a qualidade modal e o *photodarkening*.

### Efeitos não-lineares

O forte confinamento da radiação laser no núcleo da fibra óptica dopada, juntamente com o longo comprimento de interacção (que pode ir de alguns metros a algumas dezenas de metros), reforçam o aparecimento de efeitos não-lineares, constituindo o factor mais limitativo em termos de escalonamento de potência neste tipo de arquitectura laser [13, 14]. A mais importante classe de efeitos não-lineares resulta de processos de espalhamento estimulado inelástico, segundo o qual, acima de um determinado limiar, a radiação transfere parte da sua energia para o hospedeiro usado no vidro sob a forma de modos vibracionais excitados. Na região de comprimento de onda de 1  $\mu\text{m}$ , um grande desvio de frequência (~13 THz) é observado devido à excitação de fonões ópticos, processo designado como espalhamento estimulado de Raman (SRS), enquanto que a excitação de fonões acústicos origina um desvio de frequência bem menor (~17 GHz), designado por espalhamento estimulado de Brillouin (SBS). Os coeficientes de ganho para SRS e SBS são de, pelo menos, duas ordens de grandeza mais baixos que em qualquer outro meio não-linear comum. Contudo, devido ao elevado produto entre a intensidade da radiação e o comprimento de interacção no núcleo da fibra, estas não-linearidades podem ser observadas até mesmo para baixos valores de potência, o que limita a potência extraída no sinal, muito antes das limitações devido a problemas termo-ópticos.

As fórmulas que derivam o aparecimento destes efeitos não-lineares [15] demonstram uma proporcionalidade directa com o comprimento da fibra e com a intensidade do sinal no núcleo, e uma proporcionalidade inversa com a área modal da radiação guiada na fibra. Portanto, um alargamento do diâmetro do campo modal (*MFD - Mode field diameter*), conseguido normalmente pelo aumento do diâmetro do núcleo e/ou pela diminuição da abertura numérica (*NA - numerical aperture*), e uma redução do comprimento da fibra ajudam a evitar que estes efeitos surjam precocemente. Outras formas de reduzir ou eliminar estes efeitos incluem o uso de bombagem contra-propagante [16], a utilização de fibras com determinados perfis de índice de refração [17], a criação de gradientes de temperatura ao longo da fibra [18] e a injeção simultânea de radiação noutros comprimentos de onda [19].

### Qualidade do feixe

Uma elevada qualidade do feixe é crucial quando se pretende focar o feixe laser num ponto de redu-

zidas dimensões. O processamento de materiais (por exemplo, para impressão, marcação, corte e perfuração) é um exemplo de uma aplicação que tem esse requisito, necessitando assim de lasers com boa qualidade modal. A qualidade do feixe de um laser é essencialmente uma medida de quão fortemente o feixe consegue ser focado dentro de certas circunstâncias (isto é, com uma divergência limitada). As formas mais usadas para quantificar a qualidade do feixe são através do *Beam Parameter Product* (BPP) e do  $M^2$  ("M quadrado"). O BPP é dado pelo produto do raio do feixe,  $w_0$ , na cintura do feixe, com o ângulo de divergência do feixe no campo longínquo,  $\theta$  (metade do ângulo):

$$BPP = w_0 \times \theta \quad (\text{mm} \times \text{mrad}) \quad (1)$$

O factor  $M^2$ , de acordo com a norma ISO 11146 [20], é definido como o quociente entre o BPP e produto correspondente a um feixe gaussiano de difracção limitada,  $BPP_0 = \lambda/\pi$ , com o mesmo comprimento de onda,  $\lambda$ , como:

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_0} = \frac{\pi \times w_0}{\lambda} \times \theta \quad (2)$$

O factor  $M^2$ , também designado como factor de qualidade do feixe ou factor de propagação do feixe, é actualmente a medida mais comum da qualidade do feixe de um laser. Um feixe diz-se como tendo difracção limitada quando corresponde a um  $M^2=1$ , e é um feixe gaussiano. Este valor pode ser atingido por lasers de estado sólido convencionais a operar a baixa potência e num único modo espacial transversal, por lasers de fibra baseado em fibras monomodo, e por alguns díodos laser de baixa potência. Por outro lado, alguns lasers de alta potência podem ter valores muito elevados de  $M^2$ , muitas vezes acima de 100 e em alguns casos muito perto de 1000. Em lasers de estado sólido convencionais, este elevado valor é frequentemente resultado de distorções da frente de onda induzidas termicamente no meio de ganho. No caso dos lasers semicondutores de alta potência, a baixa qualidade do feixe resulta da operação com um guia de onda altamente multimodo. Em ambos os casos, a baixa qualidade do feixe está associada à excitação de modos de ordem superior. A Figura 7 apresenta os valores de BPP em função da potência para diferentes tipos de tecnologia laser. Como se pode verificar, os lasers de fibra são os que apresentam melhor qualidade do feixe, mesmo quando escalados a altas potências.

Tal como descrito na sub-secção anterior, o limiar de acção para efeitos não-lineares em fibras é inversamente proporcional à densidade de potência e portanto ao *Mode Field Diameter* (MFD) da fibra. De forma a diminuir a densidade de potência, o di-

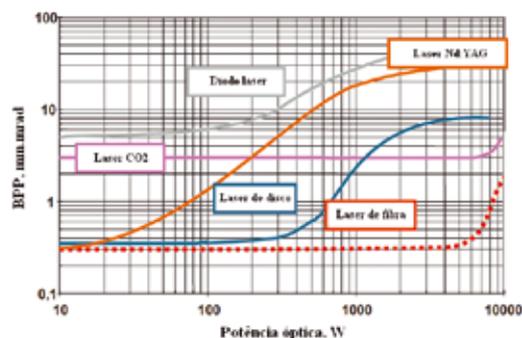


Fig. 7 - Qualidade do feixe em função da potência, para diferentes tipos de tecnologias laser [7].

âmetro do núcleo da fibra deve ser aumentado e/ou a NA reduzido. No entanto, um valor baixo de NA torna a fibra bastante sensível a curvaturas, diminuindo a guiagem e causando perdas, e um diâmetro do núcleo maior pode resultar na propagação de modos de ordem superior, e consequentemente na degradação da qualidade do feixe. Por forma a melhorar a qualidade do feixe, torna-se, portanto, necessário recorrer a técnicas de filtragem para supressão de modos de ordem superior, permitindo assim operação monomodo em fibras LMA ligeiramente multimodo. A técnica mais utilizada é a aplicação de perdas por curvatura, que são significativamente maiores para modos de ordem superior quando comparadas com as induzidas no modo fundamental  $LP_{01}$ . Portanto, um adequado enrolamento da fibra pode proporcionar operação monomodo nestas fibras [21]. Outras técnicas que permitem filtrar modos de ordem superior incluem a excitação apenas do modo fundamental [22,23], a manipulação do perfil de dopagem criando um ganho preferencial para o modo fundamental [24-26] e a adaptação do campo modal [27].

### Photodarkening

O *photodarkening* (também designado por absorção foto-induzida) é um fenómeno pelo qual as perdas de potência óptica num meio podem aumentar quando esse meio é irradiado. Vários meios, à partida opticamente transparentes tal como fibras ópticas, cristais laser e cristais não-lineares podem exibir *photodarkening* quando irradiados a determinados comprimentos de onda. Com isto, as perdas de transmissão resultantes de absorção ou espalhamento crescem com o tempo. Os mecanismos envolvidos e os parâmetros característicos, como a perda, a forma espectral, a dependência na intensidade da radiação, e a sua duração podem variar bastante, dependendo do material. Normalmente, o efeito de *photodarkening* envolve transformações estruturais microscópicas no meio, como a formação de centros de cor [28]. O mecanismo para a formação destes centros de cor ainda levanta bastante discussão na comunidade científica, sendo objecto de diferentes teorias [29,30].

Como já foi descrito, a redução do comprimento da fibra num laser ou amplificador de alta potência é de extrema importância dado que previne o aparecimento precoce de efeitos não-lineares. Se a concentração de dopantes for aumentada, resultando numa maior absorção de bombagem, o comprimento da fibra dopada pode ser bastante reduzido. Por outro lado, concentrações mais elevadas podem ser prejudiciais para outros efeitos, como é o caso do *photodarkening*, limitando assim a eficiência e o tempo de vida dos dispositivos de fibra de alta potência. De facto, o *photo-*

*darkening* em fibras dopadas com íons terras raras tem sido observado para diferentes dopantes, como por exemplo para o  $Tm^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ , sendo que mais tempo tem sido dedicado à caracterização deste fenómeno para fibras LMA dopadas com  $Yb^{3+}$  [31] devido ao elevado interesse para lasers e amplificadores nesta banda de espectral emissão. Algumas técnicas já bem conhecidas para atenuar ou mesmo eliminar este efeito baseiam-se na co-dopagem com outros materiais. Assim, o *photodarkening* pode ser de certa forma atenuado usando co-dopagem com alumínio e fortemente reduzido, até níveis negligenciáveis, através de co-dopagem com fósforo [32]. Na realidade, as fibras comercialmente disponíveis actualmente fazem uso destas técnicas de co-dopagem, tendo permitido enormes avanços nos lasers e amplificadores de fibra de alta potência no que a este efeito diz respeito.

## Aplicações

O campo de aplicações dos lasers de fibra óptica é vasto, mas onde de facto podem ter grande vantagem é onde as suas propriedades fazem a diferença em relação a outros tipos de lasers. Um exemplo claro disso é o processamento de materiais, onde a excelente qualidade do feixe e a flexibilidade de operação podem ser requisitos essenciais. Nesta secção são apresentados alguns exemplos de impressão, marcação e perfuração em vários tipos de materiais usando um laser comercial pulsado da empresa Multiwave Photonics especialmente desenvolvido para este tipo de aplicações. Uma fotografia do laser é apresentada na Figura 8, bem como o perfil do feixe e os impulsos de saída.

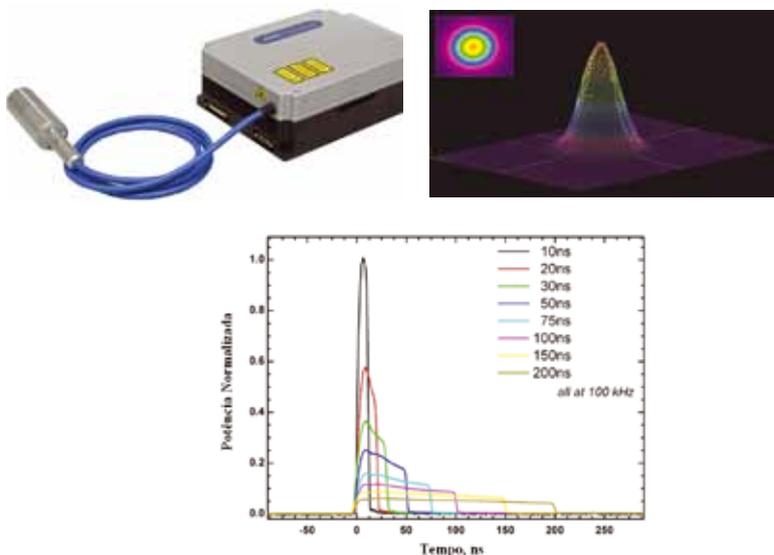


Fig. 8 - Laser de fibra óptica da série MOPA-M da empresa Multiwave Photonics com uma potência óptica média de saída de 20 W e comprimento de onda de emissão a 1064 nm. (a) Fotografia do laser com a respectiva saída em fibra e colimador, (b) perfil do feixe de saída ( $M^2=1,2$ ), e (c) perfis temporais das diferentes possibilidades de impulsos de saída, mantendo energia constante (100  $\mu$ J).

O laser representado na Figura 8 permite controlar e configurar independentemente as larguras de impulso, a frequência e a potência de saída. Esta flexibilidade possibilita uma optimização de todos os parâmetros afim de se obterem os melhores resultados para cada aplicação. A distribuição de energia do feixe é gaussiana e a qualidade do feixe ( $M^2$ ) é de

1,2, em todas as condições de operação. O laser permite a geração de impulsos ópticos com uma taxa de repetição desde um único impulso até 500 kHz, e durações de impulso pré-seleccionadas que podem variar entre 10 e 250 ns. A potência óptica média de emissão do laser é de 20 W a um comprimento de onda de 1064 nm. A saída colimada do laser apresentado na Figura 8 é depois integrada num sistema com um scanner uma lente de focagem que permite efectuar o trabalho desejado em diferentes materiais.

Para investigar os efeitos de largura de impulso e potência de pico na marcação de aço inoxidável, pequenas áreas são preenchidas usando os impulsos entre 10 e 200 ns apresentados na Figura 8-c), com uma energia constante de 100  $\mu$ J. O material utilizado é uma folha de aço inoxidável (#304) com 0,5 mm de espessura. O diâmetro do feixe focado na superfície do material é 56  $\mu$ m. Os resultados são apresentados na Figura 9, usando também diferentes velocidades de varrimento.

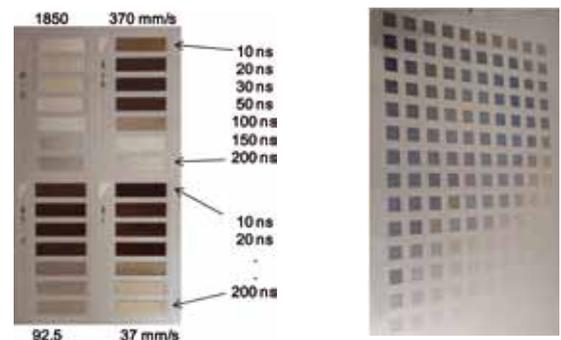


Fig. 9 - Marcação de cor em aço inoxidável #304 com espessura de 0,5 mm, (a) usando sete larguras de impulso, como representado na Figura 8-c), e quatro velocidades de varrimento do scanner: 1850, 370, 92,5 e 37 mm/s; e (b) usando uma largura de impulso fixa de 200 ns mas variando a potência média de emissão do laser entre 6 e 10 W.

Existe um efeito óbvio da potência de pico e da largura de impulso na intensidade da região marcada em aço inoxidável. Como se pode verificar na Figura 9, a combinação de diferentes larguras de impulso com diferentes potências de pico e as diferentes velocidades de varrimento, bem como a variação da potência média óptica, permitem a obtenção de marcação de um padrão bastante diferenciado de cores em aço inoxidável. Este é apenas um exemplo em como a possibilidade de manipulação dos diferentes parâmetros de um laser de fibra óptica permite a obtenção de uma gama alargada de resultados. Assim, da mesma forma que no exemplo da Figura 9-b), a Figura 10 apresenta resultados de marcação de cor em titânio, usando uma duração de impulso de 200 ns e diferentes potências médias (6-10 W). São também usadas diferentes velocidades de varrimento do scanner e em alguns casos múltiplas passagens de forma a obter uma gama mais alargada de cores.



Fig. 10 - Marcação de cor em folha de titânio com 0,5 mm de espessura usando uma largura de impulso fixa de 200 ns mas variando a potência média de emissão do laser entre 6 e 10 W.

Como se pode verificar o material permite a obtenção de cores mais vividas e brilhantes, sendo que a flexibilidade no controlo dos parâmetros do laser mais uma vez permite a definição da tonalidade a marcar.

A Figura 11 apresenta marcação de várias linhas num filme fino de alumínio, 0,6  $\mu\text{m}$ , depositado num substrato de silício mono-cristalino. A energia do impulso é mantida constante nos 50  $\mu\text{J}$  e o feixe é focado na superfície do material com um diâmetro de 20  $\mu\text{m}$ .



Fig. 11 - Efeitos de ablação num filme fino de alumínio de 0,6  $\mu\text{m}$  depositado num substrato de silício usando diferentes larguras de impulso.

A inscrição destas linhas também foi efectuada directamente em silício mono-cristalino obtendo-se profundidades da ordem dos 15  $\mu\text{m}$  numa passagem do feixe a uma velocidade de 1 m/s. Os resultados são apresentados na Figura 12. Neste caso a energia dos impulsos é de 100  $\mu\text{J}$  e a potência média de 10 W. Mais uma vez, os impulsos mais curtos, que têm uma potência de pico superior, provocam maiores danos, originando mais detritos.

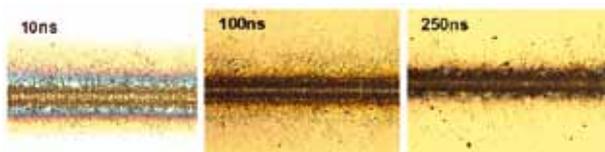


Fig. 12 - Marcação em silício mono-cristalino com diferentes larguras de impulso.

A Figura 13 apresenta resultados de marcação em silício poli-cristalino. O substrato de silício é cortado e um microscópio electrónico de varrimento é utilizado para diagnóstico do perfil e profundidade de ablação. Os impulsos aplicados em todos os casos têm uma energia de 100  $\mu\text{J}$ , a potência média é de 10 W e o feixe na superfície tem um diâmetro de 20  $\mu\text{m}$ . Como se verifica pela Figura 13, impulsos longos, apesar de com potências de pico mais baixas, apresentam maior profundidade de penetração. A

profundidade obtida neste caso, com uma única passagem a uma velocidade de 1 m/s, varia entre 11 e 45  $\mu\text{m}$  para larguras de impulso entre 10 e 150 ns, respectivamente.

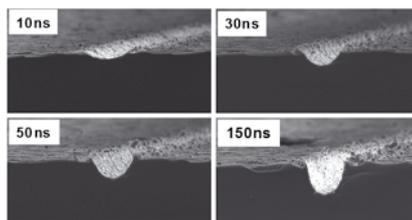


Fig. 13 - Vista do corte (secção cruzada) de uma amostra de silício poli-cristalino marcado com diferentes larguras de impulso a uma energia constante de 100  $\mu\text{J}$ , e com uma taxa de repetição de 100 kHz.

Para se conseguir perfuração em silício poli-cristalino as condições de operação do laser são alteradas para potência de pico constante, ou seja, todas as larguras de impulso têm a mesma potência de pico, sendo a taxa de repetição ajustada por forma a ter-se sempre a mesma potência média. A espessura do material é de 200  $\mu\text{m}$  e o diâmetro do feixe focado na superfície inferior (saída do feixe) do material é de 20  $\mu\text{m}$ . Impulsos de 10, 50, 100 e 250 ns são usados, mantendo a mesma potência de pico de 10 kW e a mesma potência média de 10,5 W. O tempo de emissão é o mesmo para todos os impulsos. De notar que diâmetro do furo de entrada com 10 ns é menor e com mais detritos, enquanto que com 250 ns é maior e bastante mais limpo. Os furos de saída têm diâmetros que vão desde os 18  $\mu\text{m}$  para 10 ns até aos 25  $\mu\text{m}$  para 250 ns.

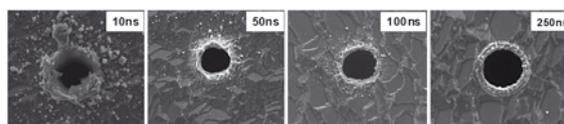


Fig. 14 - Furação num substrato de silício poli-cristalino com uma espessura de 200  $\mu\text{m}$ , com diferentes larguras de impulso a uma potência de pico constante de 10kW.

Por último, apresenta-se um exemplo de marcação em cerâmica. Os materiais cerâmicos não são fáceis de marcar devido à sua elevada temperatura de fusão, à sua composição não-uniforme e à elevada reflectividade que reduz a energia absorvida. Consequentemente, impulsos com alta potência de pico são desejados de forma a produzir uma marca consistente na superfície. A Figura 15 demonstra a escrita num material cerâmico, usando uma potência de pico de 10 kW, uma largura de impulso de 250 ns a uma taxa de repetição de 21 kHz e uma energia de 0,5 mJ.

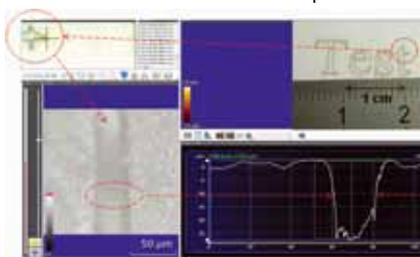


Fig. 15 - Escrita num substrato cerâmico com uma profundidade de 30  $\mu\text{m}$ , usando várias passagens com uma largura de impulso de 250 ns, uma energia de 0,5 mJ e 10 W de potência média.

Como se verifica pelos exemplos demonstrados existe um conjunto de parâmetros ideais para cada aplicação. Neste contexto, a flexibilidade em termos de operação do laser é um factor essencial para a optimização da tarefa.

## Conclusão

Neste artigo foram apresentados os conceitos, as propriedades e as principais limitações actuais dos lasers e amplificadores de fibra óptica. Foram também demonstrados alguns exemplos de aplicação destes lasers em processamento de materiais. O seu elevado desempenho associado à sua flexibilidade permite processar diversos tipos de materiais e efectuar os ajustes necessários para uma optimização do trabalho. Esta tecnologia prova ser, hoje em dia, capaz de competir directamente com os lasers de estado sólido convencionais em muitos casos com vantagens acrescidas. O advento das fibras ópticas de dupla bainha proporcionou o escalonamento de potência deste tipo de lasers, por vezes limitado pelo aparecimento precoce de efeitos não-lineares. Também a qualidade do feixe e o *photodarkening* são factores que podem afectar o comportamento destes lasers. Estes factores estão intimamente ligados entre si e devem ser vistos como um todo quando se procura um elevado desempenho em lasers ou amplificadores de fibra óptica de alta potência.

- 1 C.J. Koester, E. Snitzer, Appl. Opt. 3, 1182 (1964).
- 2 R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D. N. Payne, Electron. Lett. 23, 1026 (1987).
- 3 P. Urquhart, Optoelectronics, IEE Proceedings J 135(6), 385 (1988).
- 4 A. Tünnermann et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, S681 (2005).
- 5 L. Zenteno, IEEE J. Lightwave Technol. 11, 1435 (1993).
- 6 V. Fomin, et al., 5th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications, St. Petersburg, Russia, paper TuSy1.3 (2010).
- 7 A. Tünnermann, 5th International Workshop on Fiber Lasers, Dresden, Germany (2009).
- 8 J.D. Dawson et al. Opt. Express 16, 13240 (2008).
- 9 W. Wadsworth, R. Percival, G. Bouwmans, J. Knight, P. Russell, Opt. Express 11, 48 (2003).
- 10 J. Knight, T. Birks, J. Russell, D. Atkin, Opt. Lett. 21, 1547 (1996).
- 11 W. Wadsworth, J. Knight, W. Reeves, P. Russell, Electron. Lett. 36, 1452 (2000).
- 12 J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, D. J. Richardson, Opt. Lett. 26, 1045 (2001).
- 13 Y. Jaouën, G. Canat, S. Grot, S. Bordaïs, C. R. Physique 7, 163 (2006).
- 14 M. R. Melo, J. R. Salcedo, M. O. Berendt, J. M. Sousa, Fiber Laser Applications (FILAS) Topical Meeting, paper FThE8, Feb 13-16, Istanbul, Turkey (2011).
- 15 J.D. Dawson et al., Opt. Express 16, 13240 (2008).
- 16 Y. Wang, IEEE J. Quantum Electron. 41, 779 (2005).
- 17 J. Kim, P. Dupriez, C. Codemard, J. Nilsson, J. K. Sahu, Opt. Express 14, 5103 (2006).
- 18 V.I. Kovalev, R.G. Harrison, Opt. Lett. 31, 161 (2006).
- 19 M. Melo, J.M. Sousa, M.O. Berendt, Proceedings of SPIE Vol. 7914, 79142N, Photonics West 2011-LASE, San Francisco, CA (2011).
- 20 ISO Standard 11146, "Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios" (2005).
- 21 P. Koplow, L. Goldberg, R. P. Moeller, D. A. V. Kliner, Opt. Lett. 25, 442 (2000).
- 22 M.E. Fermann, Opt. Lett. 23, 52 (1998).
- 23 O.G. Okhotnikov, J.M. Sousa, Electron. Lett. 35, 1011 (1999).
- 24 M. Gong, Y. Yuan, C. Li, P. Yan, H. Zhang, S. Liao, Opt. Express 15, 3236 (2007).
- 25 O.G. Okhotnikov, J.M. Sousa, Electron. Lett. 33, 1727 (1997).
- 26 J.M. Sousa, O.G. Okhotnikov, Appl. Phys. Lett. 74, 1528 (1999).
- 27 M. Faucher, Y. K. Lize, Conf. on Lasers and Electro-Optics CFI7 (2007).
- 28 L. Dong et al., Applied Optics 34, 3436 (1995).
- 29 L. B. Glebov, Glass Sci. Technol. 75, C2 (2002).
- 30 M. Engholm, L. Norin, D. Åberg, Opt. Lett. 32, 3352 (2007).
- 31 J. Koponen et al., Applied Optics 47, 1247 (2008).
- 32 S. Jetschke, S. Unger, A. Schwuchow, M. Leich, J. Kirchhof, Opt. Express 16, 15540 (2008).



**Miguel Melo** Licenciado em Optoelectrónica e Lasers e mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Universidade Porto é actualmente Engenheiro de Desenvolvimento na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente participou como investigador em projectos nacionais e europeus no INESC Porto e integrou a divisão de lasers de fibra óptica da empresa Multiwave Networks Portugal. Possui aproximadamente 10 anos de experiência na investigação e desenvolvimento de dispositivos, amplificadores e lasers de fibra óptica. Tem mais de 10 artigos publicados em revistas e conferências internacionais.



**João M. Sousa** Doutorado em Física pela Universidade do Porto é co-fundador e actualmente Director de I&D da Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi também co-fundador e Director de Engenharia da Multiwave Networks Portugal Lda. Foi Professor Auxiliar na Universidade de Aveiro e na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Tem aproximadamente 20 anos de experiência em Investigação e Desenvolvimento de Lasers e Amplificadores de Alta Potência em Fibra Óptica, publicou mais de 30 artigos em jornais e conferências internacionais e é autor de 5 patentes. Na Multiwave tem liderado o desenvolvimento da tecnologia base da empresa tendo resultado já no lançamento de mais de 15 novos produtos ao longo dos últimos anos.



**Martin O. Berendt** Doutorado pela Universidade Técnica da Dinamarca é actualmente Cientista Sénior na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi Engenheiro de Sistemas de Comunicações Ópticas na Siemens SA, responsável pela divisão de lasers de fibra óptica na empresa Multiwave Networks Portugal e cientista sénior na Corning Incorporated. Teve ainda a oportunidade de desenvolver trabalho no âmbito de doutoramento e de pós-doutoramento no NKT Research Center, e na Specialty Fibers Lucent Danmark, na Dinamarca, no Optoelectronic Research Centre University of Southampton, no Reino Unido e no Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade de Campinas (UNICAMP), no Brasil. Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas na área dos lasers e da tecnologia óptica.



**Sami T. Hendow** Doutorado em Optical Sciences pela Universidade de Arizona é actualmente Director Sénior na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi responsável de engenharia na Spectra-Physics, cientista sénior na Northrop Grumman, e director de engenharia na Southampton Photonics e na Ditech Communications. Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas na área dos lasers e da tecnologia óptica.



**José R. Salcedo** Doutorado pela Universidade de Stanford é actualmente CEO da empresa Multiwave Photonics SA. Fundador da Multiwave após 15 anos de actividade de I&D em optoelectrónica, lasers e fibras ópticas na Universidade do Porto (onde foi Professor Catedrático na FEUP e Professor Associado na FCUP) e no INESC Porto (tendo sido co-fundador em 1984 e onde também co-fundou a Unidade de Optoelectrónica em 1990). Anteriormente desenvolveu uma larga actividade profissional nos EUA durante cerca de 10 anos Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas principalmente na área dos lasers.