

Laser sintonizável de fibra óptica em anel

Paulo Antunes, Paulo André

Instituto de Telecomunicações e Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

pandre@av.it.pt

Resumo

Neste trabalho, reporta-se a implementação de um laser de fibra óptica em anel com fibra dopada com iões de érbio (Er^{3+}) que se caracteriza pelo uso de uma rede de Bragg no interior da cavidade óptica. A rede de Bragg permite a sintonia do comprimento de onda reflectido, possibilitando assim a selecção do comprimento de onda de emissão do laser. Obteve-se uma eficiência de bombeamento de 3,55 % e uma separação entre modos longitudinais de 3,40 MHz.

Introdução

O primeiro laser de fibra óptica foi desenvolvido no início da década de 1960 [1,2] e, desde então, assistiu-se a um enorme esforço de investigação nesta área, devido às enormes potencialidades deste dispositivo. Foram desenvolvidas configurações específicas de vários tipos de laser até aos dias de hoje, sendo que o primeiro laser de fibra óptica em anel fechado, referenciado na literatura, foi desenvolvido por Sasamori et al. [3] em 1997 e utiliza um amplificador óptico de fibra dopada com érbio e quatro redes de Bragg de alta reflectividade em série, permitindo assim um espectro de emissão multi-comprimento de onda formado por quatro picos, relativos ao comprimento de onda de reflexão de cada rede de Bragg.

Algumas das aplicações dos lasers de fibra óptica são em comunicações ópticas, medicina, processamento de materiais, armazenamento de dados, espectroscopia, sensores ópticos e metrologia óptica [4]. O confinamento óptico providenciado pela fibra óptica torna os lasers de fibra extremamente eficientes. Estes lasers apresentam como principal desvantagem a existência de uma cavidade óptica com uma dimensão elevada, o que resulta

numa dificuldade acrescida para estabilizar a temperatura e, conseqüentemente, uma elevada instabilidade espectral da emissão. No entanto, as vantagens associadas, em particular a facilidade de implementação, tornam esta opção relevante para determinadas soluções.

Têm sido demonstrados lasers de fibra óptica com comprimentos de onda de emissão compreendidos entre 400 e 3000 nm. Entre os lasers de fibra mais utilizados e eficientes encontram-se aqueles baseados em fibras de sílica dopada com iões de terra raras tais como Er^{3+} , Nd^{3+} , Yb^{3+} e Tm^{3+} . Estes sistemas têm a vantagem de possuírem bandas de absorção compatíveis com as regiões espectrais de emissão dos díodos laser semicondutores usualmente utilizados como fontes de bombeio. Estes sistemas apresentam ainda uma elevada eficiência quântica, dependendo do ião utilizado, podendo chegar a 0,95 [5].

O princípio de funcionamento de um laser implica a existência de um meio activo onde ocorre a emissão espontânea de radiação. O efeito de *lasing* requer um elevado confinamento óptico, permitindo a emissão estimulada na presença de inversão de população. A cavidade óptica é, também, responsável pela selectividade espectral do sistema. A principal ênfase no desenvolvimento de lasers tem sido dada a sistemas construídos em cavidades ressonantes de Fabry-Perot [6].

O esquema básico de um laser de fibra óptica consiste num meio activo terminado com dois reflectores, sendo que um funciona como acoplador/reflector, permitindo a saída do sinal óptico para o exterior. Usualmente, recorre-se a espelhos dieléctricos depositados directamente nas extremidades polidas da fibra óptica ou espelhos tradicionais usando óptica tradicional de espaço livre para acoplar o sinal no interior da fibra óptica. Um exemplo deste tipo de configuração é mostrado na Figura 1. É de referir que este tipo de configuração, pela sua complexidade, pode não ser a mais adequada para a sua produção e utilização larga escala.

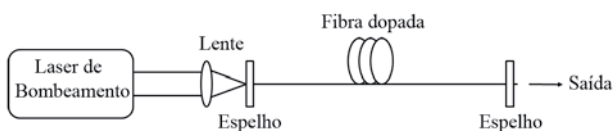


Fig. 1 - Esquema de um laser de fibra baseado numa cavidade ressonante de Fabry-Perot.

Em alternativa, pode formar-se uma cavidade de Fabry-Pérot com recurso a redes de Bragg gravadas na fibra óptica¹, sendo a rede de entrada desenhada para reflectir o sinal de emissão do laser e transmitir o sinal de bombeamento. Um benefício particular desta configuração é que as FBG podem ser inscritas directamente na fibra, reduzindo as perdas de acoplamento [4]. Um esquema típico para o laser de fibra óptica que utiliza redes de Bragg é apresentado na Figura 2.

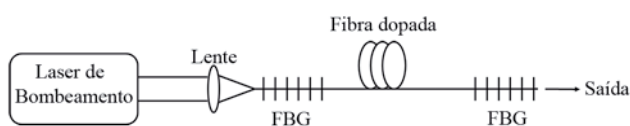


Fig. 2 - Esquema de um laser de fibra baseado em redes de Bragg.

Uma outra aproximação para a implementação da cavidade ressonante consiste em usar anéis fechados de fibra dopada, providenciando, assim, a realimentação óptica necessária [5]. Geralmente, o comprimento da fibra óptica dopada é otimizado para maximizar a absorção do sinal de bombeamento e maximizar a relação entre o ganho e absorção para o comprimento de onda da emissão.

Em comunicações ópticas o laser é fundamental, e foi precisamente nesta área que em Portugal foram utilizados os primeiros laser de fibra óptica desenvolvidos em anel, reportando-se ao ano de 2003. Terroso *et al.* [7] utiliza esta configuração de laser e o processo não linear de mistura de quatro ondas² como forma de conversão de comprimento de onda, com possível aplicação em sistemas multiplexados no comprimento de onda. Por sua vez, Melo *et al.* [8] desenvolve um laser em fibra óptica em anel fechado, a operar na banda L, utilizando fibra óptica dopada com érbio, com sintonização possível através do encurvamento controlado de uma fibra monomodo com *taper*. Este encurvamento introduz perdas na cavidade ressonante que são maiores para comprimentos de onda superiores. Deste modo, foi possível desenvolver um laser com sintonia entre 1587 e 1606 nm, com pouca variação na sua potência de saída ao longo deste intervalo. Também este laser tem aplicações possíveis em comunicações ópticas, nomeadamente em sistemas multiplexados no comprimento de onda.

Um dos tipos de lasers de fibra mais estudados é o laser de fibra óptica dopada com iões de Er³⁺ pelo seu potencial uso como fonte emissora para sistemas de comunicações ópticas a operar na terceira janela de telecomunicações. Uma das desvantagens dos lasers baseados em anéis fechados

com fibra dopada com Er³⁺ é o elevado número de modos longitudinais, devido ao comprimento da cavidade óptica [6]. Várias tentativas foram realizadas para suprimir os modos longitudinais [10] ou implementar lasers de fibra dopada com Er³⁺ com um único modo longitudinal [11].

Neste trabalho, é apresentada a implementação e caracterização de um laser de fibra baseado numa fibra dopada de Er³⁺ em anel fechado. Na implementação desta solução foi utilizado um amplificador de fibra óptica dopada com érbio³. Este tipo de amplificador é bastante comum nos sistemas de comunicações ópticas, devido à grande largura espectral de ganho (dezenas de nanómetros), o que permite a sua inclusão em sistemas multicompimento de onda - WDM⁴ [10]. A inclusão de um elemento óptico selectivo na cavidade óptica, neste caso uma FBG, permite uma selecção adequada do comprimento de onda de emissão.

Implementação experimental

O esquema do laser baseado numa fibra dopada com Er³⁺ em anel fechado implementado está ilustrado na Figura 3. O anel fechado é constituído por um troço de fibra óptica dopada com Er³⁺, um acoplador para a injeção do sinal de bombeamento no anel, um isolador óptico e um filtro óptico, cuja função é a remoção do sinal de bombeamento e do ruído de emissão espontânea gerado⁵. O laser díodo de bombeamento emite num comprimento de onda de 980 nm. Todos estes elementos incorporam um amplificador de fibra óptica dopada com Er³⁺ (Fiberamp-BT1300 da Photonics). O anel é fechado através de uma FBG com um comprimento de 3 mm, uma largura espectral a meia altura de 0,08 nm e uma rejeição aos modos adjacentes de 25 dB. Como a FBG funciona em modo de reflexão, esta é interligada com a cavidade óptica, através de um circulador óptico. Finalmente, é ainda utilizado um acoplador óptico que permite retirar 20 % do sinal óptico e que funciona como saída do laser.

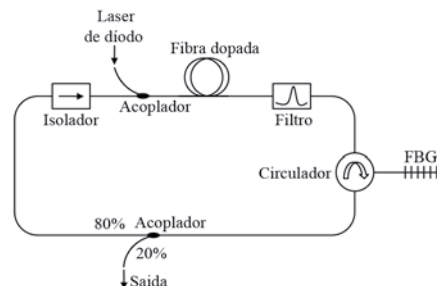


Fig. 3 - Esquema do laser de fibra óptica implementado.

Resultados

Para caracterizar a resposta em contínuo do laser de fibra óptica implementado foi medida a potência óptica de saída em função da potência óptica do sinal de bombeamento (Figura 4). A medição

¹ Fibre Bragg grating, FBG

² Four wave mixing, FWM

³ Erbium-doped fiber amplifier, EDFA

da potência de emissão foi realizada utilizando um analisador de espectros óptico (modelo MS9601A da Anritsu).

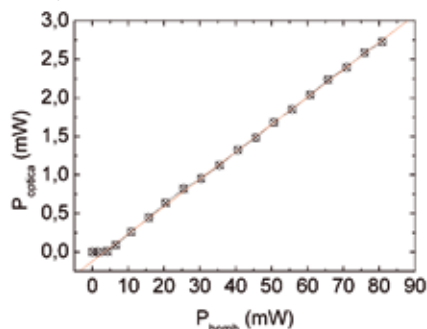


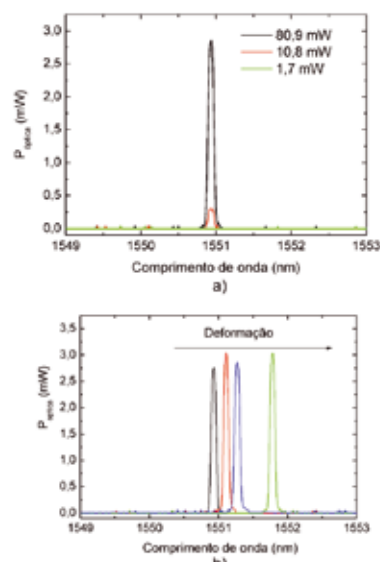
Fig. 4 - Potência óptica de saída do laser de fibra em função da potência óptica do sinal de bombeamento. Os pontos representam os dados experimentais e a linha o melhor ajuste linear ($r > 0,99$)."

Para um baixo valor de potência óptica de bombeamento, a emissão espontânea domina. A partir de um determinado valor da potência de bombeamento ocorre a inversão de população, começando a dominar a emissão estimulada, e observa-se o aumento linear da potência de emissão do laser de fibra. A região de variação linear da potência óptica de saída em função da potência óptica de bombeamento para valores superiores à potência de limiar, ilustrada na Figura 4, permite calcular a eficiência de bombeamento do laser, obtendo-se um valor de $3,55 \pm 0,02\%$. A potência de limiar do sinal de bombeamento para o início da emissão estimulada é de 14,08 mW.

Na Figura 5.a mostra-se o espectro de emissão do laser de fibra para diversos valores da potência de bombeamento. Este espectro corresponde à emissão quando a FBG não está sujeita a uma deformação mecânica. São apresentados os espectros correspondentes a três gamas da potência de bombeamento: para um valor abaixo da potência de limiar para a emissão estimulada, para um valor próximo dessa potência, e para um valor superior.

A aplicação de uma deformação mecânica na FBG irá resultar na alteração das suas características espectrais e, conseqüentemente, tal repercute-se no espectro de emissão do laser de fibra. A sintonia pode ser realizada colocando a rede de Bragg sobre um módulo piezoelétrico que induz uma deformação mecânica. Dadas as características das redes de Bragg, é ainda possível fazer a sintonia por processos térmicos, colocando-a sobre um módulo termoelétrico. No entanto, este último processo de sintonia apresenta a desvantagem de ser consideravelmente mais lento do que o processo mecânico. Na Figura 5.b ilustra-se a variação do espectro de emissão com o aumento da deformação mecânica aplicada à FBG.

Fig. 5 - Espectro de emissão do laser: (a) para diversos valores de bombeamento; (b) para com uma potência óptica de bombeamento de 80,85 mW, e para diversos valores de deformação mecânica aplicada na FBG. A largura espectral está limitada pela resolução do analisador de espectros ópticos utilizado na caracterização (0,1 nm).



Considerando que a sensibilidade da FBG com a deformação é, tipicamente, de $1,2 \text{ pm} \cdot \mu\text{e}^{-1}$ e que a deformação limite que se pode aplicar a uma fibra é de aproximadamente 3 %, é possível sintonizar a FBG numa faixa espectral de 36 nm, o que corresponde à largura da janela espectral de emissão da fibra dopada com érbio.

Foi utilizado um fotodetector com uma largura de banda de 20 GHz (HP 11982A) interligado a um analisador de espectros eléctrico (HP 8593E) para caracterizar a frequência dos modos longitudinais do laser. Pelo facto de a cavidade deste tipo de lasers ser de elevadas dimensões, vai existir um elevado número de modos longitudinais, resultando num laser multimodal. A separação entre modos longitudinais, medida em unidades de frequência, é dada por $\Delta f = c/nL$, onde c é a velocidade da luz no vácuo, n representa o índice de refração da fibra ($\sim 1,45$) e L é o comprimento da cavidade.

Foi adquirido o espectro eléctrico do sinal de saída do laser para uma potência de bombeamento de 80,85 mW (Figura 6). Nesta caracterização, foi utilizada uma resolução de 100 kHz e um tempo de aquisição de 10 s.

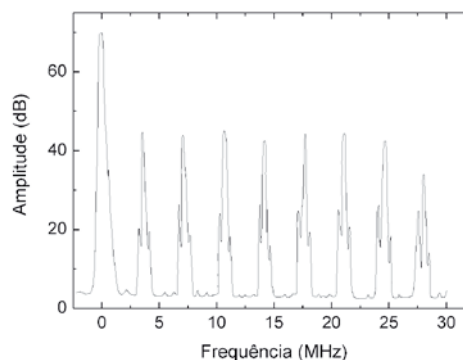


Fig. 6 - Espectro eléctrico do sinal emitido pelo laser de fibra.

A separação entre modos longitudinais é de 3,40 MHz, o que corresponde a um comprimento da cavidade óptica (dado pela equação acima) de 57,2 m. Este comprimento da cavidade corresponde ao comprimento da fibra dopada com Er^{+3} e das fibras utilizadas na interligação dos vários elementos ópticos ilustrados na Figura 3.

O facto deste tipo de laser ser usualmente multimodal implica algumas limitações em determinadas aplicações. No

⁴ Wavelength division multiplexing, WD

⁵ Amplified spontaneous emission, ASE

entanto, é possível impor o funcionamento monomodal em laser de fibras, tal como demonstrado anteriormente [9].

Conclusões

Neste trabalho, apresentamos a implementação e caracterização de um laser de fibra sintonizável em anel fechado. A sintonia é implementada através de uma rede de Bragg gravada numa fibra óptica.

- 1 E. Snitzer, "Proposed fiber cavities for optical masers", *J. Appl. Phys.* 32, 36-39 (1961).
- 2 C. J. Koester e E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Appl. Opt.* 3, 1182-1186 (1964).
- 3 H. Sasamori, K. Ishiki, H. Watanabe, e K. Kasahara, "Multi-wavelength erbium-doped fiber ring light source with fiber grating filter", *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA)*, Victoria, B. C., Canada, 21 de Julho (1997).
- 4 Michel J. F. Digonnet, "Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers", Second Edition, Marcel Dekker Inc, New York (2001).
- 5 F. J. Duarte, "Tunable laser applications", Second Edition, CRC Press, New York (2009).
- 6 P.S. André, R. Nogueira, A. Teixeira, M.J.N. Lima, J.F. da Rocha, e J.L. Pinto, "Multi wavelength rational harmonic mode locked source for polarization division multiplexing based on a reflective semiconductor optical amplifier and Bragg grating written in a high birefringent fiber", *Laser Physics Letters* 1, 613-616 (2004).
- 7 I. Terroso, J.P. Carvalho, O. Frazão, M.B. Marques, e H.M. Salgado, "All-fibre wavelength conversion based on four-wave mixing in a ring erbium-doped fibre laser", *Applied Physics B: Lasers and Optics* 77, 133-137 (2003).
- 8 M. Melo, O. Frazão, A.L.J. Teixeira, L.A. Gomes, J.R. Ferreira da Rocha, e H.M. Salgado, "Tunable L-band erbium-doped fibre ring laser by means of induced cavity loss using a fibre taper", *Applied Physics B: Lasers and Optics* 77, 139-142 (2003).
- 9 Junqiang Sun, Xiuhua Yuan, Xinliang Zhang, e Dexiu Huang, "Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers", *Optics Communications* 267(1), 177-181 (2006).
- 10 M. T. M. R. Giraldi, M. J. Pontes, M. J. D. Santos, I. Abe, e H. J. Kalinowski, "Characterization of the Optical and Electrical Spectra of a Fiber Ring Laser", *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC'99*, Rio de Janeiro, Brasil, 9-12 de Agosto (1999).
- 11 Farah Diana Binti Mahad e Abu Sahmah Bin Mohd Supa'at, "EDFA Gain Optimization for WDM System", *Elektrika* 11(1), 34-37 (2009).

A eficiência de bombeio é de 3,55 % e a separação entre modos longitudinais é de 3,40 MHz.

Apesar das desvantagens associadas a este tipo de configuração, nomeadamente, a sensibilidade à temperatura e a emissão multimodal, a facilidade de implementação torna este tipo de laser relevante para determinadas aplicações específicas, como, por exemplo, na interrogação de sensores ópticos.



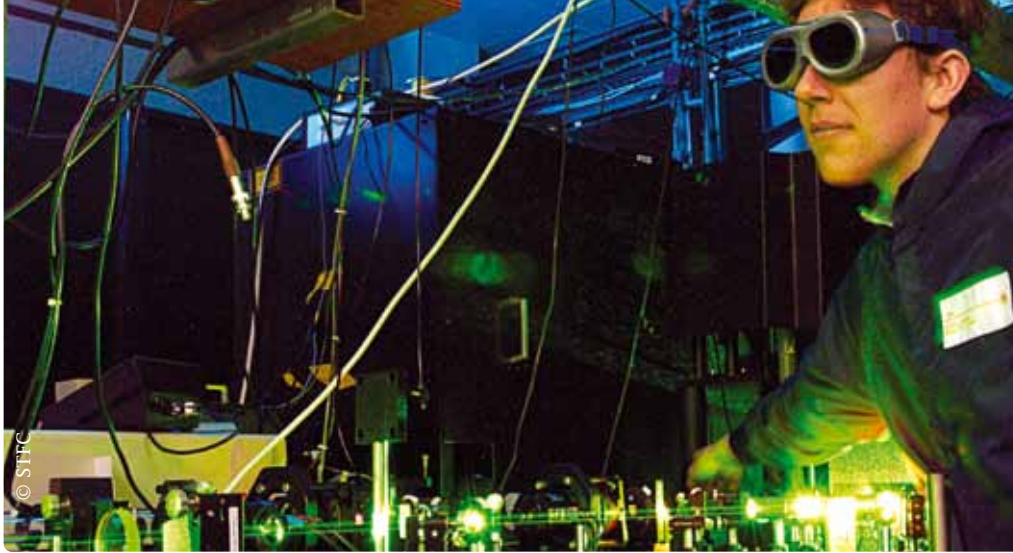
Paulo Fernando da Costa Antunes

nasceu em Mealhada, Portugal, em Maio de 1977. Recebeu a Licenciatura em Engenharia Física e o Mestrado em Física Aplicada da Universidade de Aveiro, em 2005 e 2007, respectivamente. Actualmente trabalha para o grau de Doutoramento em Física no Departamento de Física da Universidade de Aveiro e no Instituto de Telecomunicações, Aveiro. De 2005 a 2006, foi investigador no Instituto de Telecomunicações, Aveiro, no estudo e simulação de fontes e detectores de fóton único. Os seus interesses de pesquisa incluem o estudo e simulação de redes de Bragg, sensores de fibra óptica para medições estáticas e dinâmicas e comunicações ópticas.



Paulo Sérgio de Brito André

nasceu em Luanda, Angola, em Abril de 1971. Recebeu a Licenciatura em Engenharia Física e o Doutoramento em Física pela Universidade de Aveiro, respectivamente em 1996 e 2002. Neste ano ingressou no Instituto de Telecomunicações, Aveiro, como Investigador Auxiliar. Actualmente, é também Professor Auxiliar convidado na Universidade de Aveiro, leccionando disciplinas nas áreas de optoelectrónica, óptica quântica e tecnologias quânticas. Os seus interesses de investigação incluem o estudo e simulação de componentes optoelectrónicos, redes de Bragg em fibra óptica, óptica integrada, monitoramento de desempenho transparente, amplificação Raman, sistemas de comunicações ópticas multi-comprimento de onda e redes ópticas passivas. Paulo André é membro da Optical Society of America (OSA), da Sociedade Portuguesa de Física (SPF), Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM) e do Instituto de Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos (IEEE).



LASERLAB Europe

o laser sem fronteiras

Gonçalo Figueira

GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear - Laboratório Associado, Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa
(National Contact Point do Programa LASERLAB Europe)

goncalo.figueira@ist.utl.pt

Cinquenta anos após a sua invenção, os lasers ganharam um papel indispensável como ferramenta de investigação, quer fundamental, quer aplicada. Na física, na química, na biologia, na medicina, nos materiais, e em muitas outras áreas, são cada vez mais as aplicações para as quais os lasers são utilizados.

Esta evolução, conjugada com a grande variedade de tipos de lasers, e a sua vasta disponibilidade comercial, fazem com que cada vez mais grupos de investigação disponham de equipamentos próprios para levar a cabo os seus programas científicos.

No entanto, é natural que nem *todos* os laboratórios possam ter todos os tipos de laser que seriam úteis para desenvolver ainda mais as suas actividades. Em particular, quando se trata de lasers avançados, disponibilizando parâmetros de estado-da-arte – energia, potência, duração, gama de comprimentos de onda, etc – apenas um número muito restrito de laboratórios especializados tem capacidade para desenvolver sistemas verdadeiramente únicos, dado que estes implicam infra-estruturas complexas e dispendiosas. Na Europa, que lidera a investigação nesta área, existe um conjunto de laboratórios equipados com lasers de características ímpares a nível

mundial, graças aos quais tem sido possível atingir resultados científicos de grande impacto.

Não seria interessante poder ir passar um par de semanas a um destes sítios e realizar uma experiência? Se acha que é uma ideia completamente fora do seu alcance, continue a ler.

LASERLAB-Europe – a rede europeia de laboratórios laser

O programa LASERLAB-Europe (LLE) [1] é um consórcio europeu que reúne as principais instituições de investigação em lasers da Europa. O programa, originalmente lançado em 2003, está agora na sua segunda edição, desde Março de 2009, e tem uma duração de três anos, sendo financiado pelo 7º Programa Quadro.

As actividades a desenvolver no âmbito deste programa têm três aspectos principais (ver caixa): o acesso transnacional, as actividades de investigação em conjunto, e a criação de redes de investigação. Um dos princípios que presidiu à fundação do programa LLE foi o de permitir à vasta comunidade de cientistas europeus a trabalhar com lasers o acesso às principais instituições de investigação europeias, e coordenar as actividades de investigação avançada associadas.

Portugal é um dos participantes no LLE, sendo representado pelo Instituto Superior Técnico (IST), de Lisboa. A unidade responsável pelas actividades é o Instituto de Plasmas e

Fusão Nuclear (IPFN), Laboratório Associado especializado nas áreas de fusão nuclear, plasmas e lasers intensos. As actividades dos cientistas do IPFN passarão pela participação em programas conjuntos de investigação aplicada, e na criação e fortalecimento de comunidades nacionais de investigadores. Parte do trabalho a desenvolver terá lugar no Laboratório de Lasers Intensos, infra-estrutura operada pelo IPFN que possui o laser mais potente do país, dedicado ao estudo da interacção entre impulsos laser e plasmas.

LASERLAB-Europe em dados

Datas: a actual edição do programa LLE decorre de Março de 2009 a Março de 2012, no âmbito do 7º Programa Quadro da União Europeia. Está em preparação a próxima edição, que será a terceira, a partir dessa data.

Participantes: o consórcio envolve um total de 26 unidades de investigação dos seguintes membros: Alemanha, Eslováquia, Espanha, França, Grécia, Holanda, Itália, Hungria, Letónia, Lituânia, Polónia, Portugal, Reino Unido, Rep. Checa, Roménia e Suécia.

Objectivos: no âmbito do programa LLE desenvolvem-se as seguintes actividades:

- Acesso transnacional – permite que investigadores e equipas de investigação oriundas de países membros do consórcio acedam a laboratórios de outros países membros, sem custos. Qualquer investigador de um país participante pode concorrer.

- Actividades conjuntas de investigação (Joint Research Activities, JRA) – projectos específicos envolvendo membros do programa LLE, que visam a colaboração científica e troca de conhecimentos em temas de vanguarda. Existem cinco JRA's nesta edição: fontes laser de attosegundo, lasers de alta potência e alta taxa de repetição, aceleração a plasma, lasers para aplicações biomédicas, e fontes de raios-x a laser.

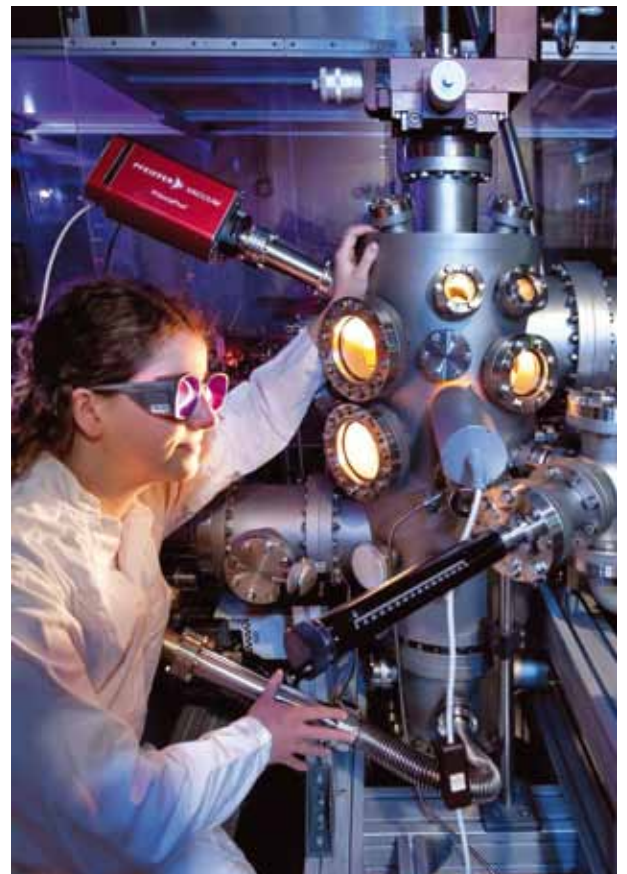
- Criação de redes de investigação (*Networking*): envolve um grande número de actividades colaborativas com vista à criação de uma rede de cooperação efectiva entre instituições, à formação de investigadores, e à consolidação da liderança europeia em investigação nesta área.

O que é o programa de acesso?

Um dos objectivos primordiais do LLE é providenciar acesso, a qualquer cientista europeu, às infra-estruturas laser das unidades participantes que têm a categoria de “fornecedor de acesso”. O principal critério para estar nesta categoria é, precisamente, possuir sistemas laser únicos, e ter capacidade para receber cientistas de fora, garantindo a realização de experiências com sucesso.

Um total de 20 laboratórios de 11 países europeus é for-

necedor de acesso, disponibilizando lasers com as mais variadas características, que permitem a realização de experiências num grande número de tópicos: física atómica e molecular, biofotónica e física médica, lasers ultra-intensos, fusão inercial, micro e nano-processamento de materiais, geração de harmónicas, espectroscopia, fontes e lasers de raios-x, dinâmica ultra-rápida de átomos e moléculas, entre outros. Entre os laboratórios incluem-se alguns equipamentos com parâmetros excepcionais, como o lasers de petawatt Vulcan e Astra-Gemini, ambos na Central Laser Facility do laboratório Rutherford Appleton (Reino Unido), ou os lasers para espectroscopia e metrologia de attosegundo e femtosegundo do Instituto Max Planck em Garching (Alemanha). Em Portugal, o Laboratório Laser do Departamento de Química da Universidade de Coimbra (instituição associada ao programa), é também um dos fornecedores, disponibilizando a sua vasta gama de lasers para aplicações em química. No total, o conjunto de laboratórios de acesso abrange uma vasta gama de capacidades complementares e específicas, disponibilizando 1100 dias por ano para investigadores externos.



Como participar?

O acesso é oferecido gratuitamente aos investigadores que submetam propostas para experiências que sejam avaliadas positivamente, sendo os custos suportados pela instituição que os recebe, através do programa LLE. O processo de avaliação e se-