HAL
open science

Lasers de forte puissance : vers l'avènement de fibres optiques à aire effective extrême

Baptiste Leconte, Laurent Bigot, Philippe Roy, Raphaël Jamier, Romain Dauliat, Marie-Alicia Malleville, Yves Quiquempois, Hicham El Hamzaoui, Olivier Vanvincq

To cite this version:

Baptiste Leconte, Laurent Bigot, Philippe Roy, Raphaël Jamier, Romain Dauliat, et al.. Lasers de forte puissance : vers l'avènement de fibres optiques à aire effective extrême. Photoniques, 2019, 99, pp.23-27. 10.1051/photon/20199923 . hal-03030049

HAL Id: hal-03030049

https://hal.science/hal-03030049

Submitted on 10 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LASERS DE FORTE PUISSANCE : vers l'avènement de fibres optiques à aire effective extrême

Baptiste LECONTE[1*], Laurent BIGOT[2*], Philippe ROY[1], Raphael JAMIER[1], Romain DAULIAT[1], Marie-Alicia MALLEVILLE[1,3], Yves QUIQUEMPOIS[2], Hicham El HAMZAOUI[2] et Olivier VANVINCQ[2]
[1] Institut de Recherche XLIM, Limoges, France
[2] PhLAM, CNRS-Université de Lille, France
[3] EOLITE Systems, Pessac, France
*baptiste.leconte@xlim.fr ; laurent.bigot@univ-lille.fr

Les systèmes lasers fibrés sont au cœur de nombreuses recherches académiques et constituent un marché annuel mondial dépassant le milliard d'euros. L'augmentation de la puissance en sortie de ces dispositifs a été rendue possible grâce à une innovation permanente portant sur la géométrie de fibres, les matériaux qui les constituent et les méthodes de synthèse associées. Après un bref rappel historique, nous rappelons quelques éléments de contexte et présentons quelques avancées récentes en matière de fibres à très grandes aires effectives.

Les premiers résultats sur les lasers et amplificateurs à base de fibres optiques ont suivi de très près la mise en évidence de l'émission laser. Ainsi, dès 1964, l'amplification dans une fibre dopée néodyme de 10 µm de diamètre de cœur et de 1 m de long est rapportée. L'avènement des fibres dopées aux ions de terres rares à faibles pertes dans les années 80, couplé au développement de diodes laser de plus en plus performantes, va donner une nouvelle impulsion à cette thématique de recherche. Cette impulsion est illustrée notamment par le développement d'amplificateurs à base de fibres optiques dopées erbium, rapidement devenus incontournables dans les télécommunications longues distances. Dans les systèmes lasers fibrés, ce sont les fibres dopées ytterbium qui vont être de plus en plus étudiées à partir de la fin des années 80, basées sur une configuration de pompage par le cœur. Les années 90 verront le début de l'augmentation de la puissance lumineuse avec la généralisation des fibres à double gaine, structure proposée dans les années 70 et mise en œuvre en 1988 [1]. Lorsque les caps symboliques de l'ordre du watt puis du kilowatt furent franchis, respectivement en 1990 puis en 2004, les systèmes laser fibrés – commercialisés dès le milieu des années 90 – s'affirmèrent comme des concurrents directs des lasers solides ou à gaz pour les applications nécessitant des puissances élevées. Cet engouement a été renforcé par l'avènement des fibres micro-structurées à partir des années 2000, fibres qui donnent notamment accès à une plus grande maîtrise des propriétés modales tout en ouvrant de multiples perspectives en matière de combinaison de matériaux. La

Article publié sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

décennie écoulée a connu une demande croissante pour des systèmes lasers à fibre capables de délivrer de très fortes puissances en régime continu avec à la clef des applications dans le milieu industriel, principalement pour le traitement des matériaux et des surfaces, la gravure, la soudure et la découpe. Dans ce contexte, les fibres optiques dopées ytterbium à double gaine pompées par des diodes à semi-conducteurs toujours plus brillantes font valoir de nombreux atouts : le haut rendement quantique de l'ion Yb^{3+} garantit une très bonne efficacité de conversion de puissance alors que la géométrie fibrée assure (i) compacité, (ii) dissipation thermique efficace et (iii) bonne qualité spatiale pour le faisceau amplifié. La société IPG Photonics, par exemple, commercialise des systèmes délivrant jusqu'à 10 kW de puissance moyenne en régime continu avec un faisceau limité par la diffraction et jusqu'à 100 kW avec un faisceau faiblement multimode.

La poursuite de la montée en puissance fait néanmoins apparaître de nombreux verrous technologiques portant à la fois sur le matériau et sur la géométrie de la fibre elle-même, ce qui explique que les systèmes lasers fibrés justifient encore aujourd'hui de nombreuses activités de recherche dans les laboratoires. Parmi les verrous identifiés, il apparaît que la gestion des effets thermiques suscite une attention toute particulière. En effet, alors que certaines applications industrielles sont peu exigeantes envers la stabilité spectrale et temporelle ou la qualité de la polarisation, il en va tout autrement pour les sources laser opérant en régime impulsionnel et visant de hautes puissances crêtes et énergie. Dans ce cas, le contrôle des effets thermiques et la suppression des effets non-linéaires deviennent prépondérants et c'est ce contexte que nous détaillerons dans la suite de cet article. Plus particulièrement, le contrôle de la forme et de la durée des impulsions est primordial pour le micro-usinage, le perçage, la découpe et la gravure sur carte électronique ou encore pour les applications médicales telles que la chirurgie laser où le dépôt de chaleur doit être minimisé. La conservation des caractéristiques spectrales, temporelles et de la polarisation est aussi requise lorsque la source laser est associée à un étage de conversion non-linéaire de fréquence pour la génération de longueurs d'onde inaccessibles directement (génération de second et troisième harmonique, supercontinuum, ondes Thz etc.). Les applications lasers finales sont alors le micro et nano-usinage, l'imagerie et la spectroscopie en médecine et biologie ou encore la télémétrie civile ou militaire. Les fibres développées sont dites LMA (*large mode area*), VLMA (*very large mode area*) voire XLMA (*extremely large mode area*). Les sources lasers associées reposent, en général, sur des architectures dites « MOPA » (*master oscillator power amplifier*) dans lesquelles les impulsions issues d'un laser maître vont être amplifiées dans un ou plusieurs étages à base de fibres optiques. Ce laser maître va imposer les caractéristiques du signal optique, qu'il faudra veiller à ne pas dégrader au fur et à mesure de la montée en énergie de l'impulsion. La prochaine partie de cet article traitera des fibres LMA utilisées dans le premier étage d'amplification, aussi appelé « booster » donnant accès à des niveaux intermédiaires de puissance tandis que la dernière partie abordera les fibres amplificatrices micro-structurées VLMA/XLMA permettant d'atteindre des niveaux de puissance extrêmes.

Fibres optiques pour lasers de puissance intermédiaire/booster

La qualité spatiale du faisceau de sortie est un aspect essentiel à contrôler pour les applications visées ici, ce point étant synonyme de fonctionnement monomode pour la fibre amplificatrice. Dans le cas d'une fibre à saut d'indice classique, garantir un fonctionnement strictement monomode à la longueur d'onde d'opération (autour de 1050 nm dans notre cas) revient à réaliser un saut d'indice qui, combiné à la taille de cœur, conduira à une fréquence normalisée, V, inférieure à 2,405. Les technologies conventionnelles de fabrication développées avant les années 2000 permettent de respecter cette condition pour des diamètres de cœur allant jusqu'à 20 µm environ, ce qui équivaut à maîtriser un saut d'indice de réfraction cœur/gaine de l'ordre de 5.10^{-4}. La montée en puissance impose cependant de disposer de tailles de cœur au moins

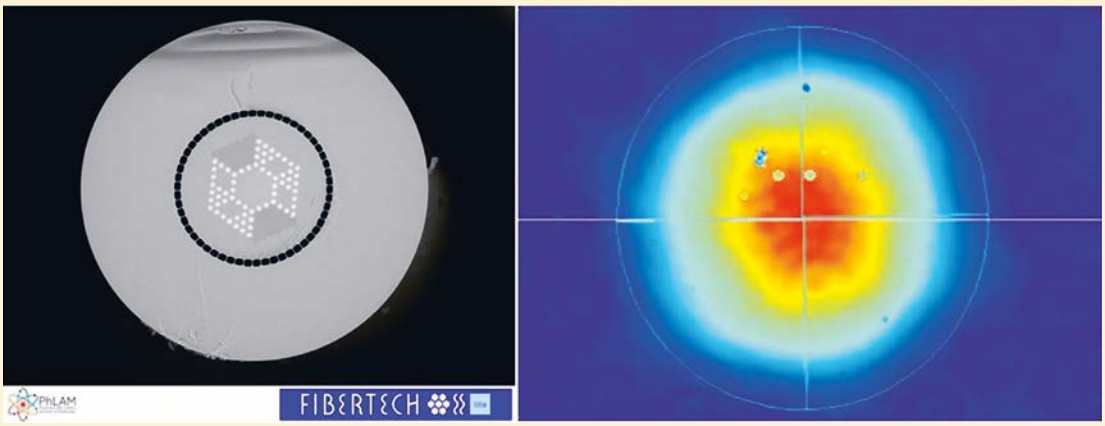

Figure 1. Photographie au microscope électronique à balayage d'une fibre à bande interdite photonique à maintien de polarisation dopée Yb et double gaine (à gauche) et mode guidé (à droite). Le cœur dopé, issu d'un barreau réalisé par voie Sol-Gel, présente ici un diamètre de 46 µm environ.

https://doi.org/10.1051/photon/20199923

deux fois plus grandes et, dans ce contexte, les possibilités offertes par les fibres micro-structurées ont rapidement suscité de grands espoirs, en particulier le comportement infiniment monomode de certaines structures, rapporté dès 1997. Les multiples développements réalisés depuis lors permettent de disposer aujourd'hui de fibres micro-structurées commerciales LMA offrant un diamètre de cœur de 40 µm, relativement flexibles et utilisant une double micro-structuration air/silice pour le confinement dans le cœur, d'une part, et dans la gaine interne, d'autre part. Notons que pour de telles dimensions de cœur, les fibres sont rarement strictement monomodes et il est plus juste de parler de fibres « monomodes en pratique », *i.e.* de fibres pour lesquelles les modes indésirables sont éliminés via l'application d'une courbure ou de pertes modales sélectives induites par une géométrie de gaine bien choisie.

De nombreux travaux visent à améliorer encore ces performances et c'est notamment le cas du projet PSPC 4F (Filière Française de Fibres optiques pour les lasers de l'industrie du Futur) qui s'appuie sur un consortium 100 % français pour concevoir, réaliser, fonctionnaliser et évaluer les performances de nouvelles fibres optiques LMA flexibles. L'objectif du projet est d'évaluer les possibilités offertes par différentes technologies de fabrication de matériaux dopés ytterbium (MCVD et OVD avec dopage en phase vapeur, Sol-GeL et méthode poudre REPUSIL) combinés à différentes géométries de fibres permettant d'obtenir un comportement monomode en pratique. Capacité à synthétiser de gros volumes de verre, forte absorption à la longueur d'onde de pompe (afin de disposer d'une fibre courte), photo-noircissement limité, indice de réfraction contrôlé à moins de 1.10^{-4} constituent les défis à relever du côté des matériaux tandis que, du côté de la fibre, les difficultés portent sur l'obtention de géométries à grande taille de cœur, pouvant être courbées tout en assurant le maintien de la polarisation du faisceau incident. Parmi les familles de fibres étudiées dans ce projet, on trouve les fibres amplificatrices à bande interdite photonique hétéro-structurée telle que celle présentée à la *figure 1*.Dans cette structure, le confinement dans le cœur central est assuré par des inclusions haut indice présentes dans la gaine. Par ailleurs, l'ajout d'une hétéro-structuration dans la gaine permet de créer des guides satellites adaptés à un couplage avec les modes d'ordre supérieur du cœur : ces modes subissent alors de fortes pertes ce qui permet de ne conserver que le mode fondamental après quelques mètres de fibre [2]. Notons que le confinement par bande interdite photonique présente la propriété de n'opérer que pour certaines longueurs d'ondes, ce qui permet d'écarter les longueurs d'onde indésirables comme, par exemple, celles générées par diffusion Raman, minimisant ainsi leur amplification. Ce concept peut également être appliqué à la réalisation de fibres VLMA telles que celles que nous allons découvrir à présent [3].

https://doi.org/10.1051/photon/20199923

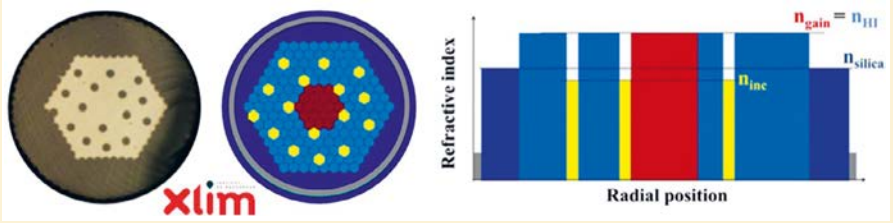

Figure 2. Photographie au microscope ; schéma de la section transverse et profil d'indice d'une FA-LPF avec en rouge, le cœur dopé aux ions ytterbium ; en jaune, les inclusions bas indice en silice dopée fluor assurant le confinement du mode fondamental ; en bleu clair, le matériau de gaine en silice dopée aluminium ; en bleu foncé, la silice pure et en gris, la gaine d'air assurant un couplage optimal de la pompe.

Fibres laser pour étages amplificateurs de hautepuissance crête/énergie

Large-pitch fibers

Pour aller au-delà des aires modales évoquées dans la partie précédente, de nouvelles fibres micro-structurées à très grande aire modale (VLMA) ont été développées au début des années 2010, telles que les DMFs (*distributed mode filtering*) par Thomas T. Alkeskjold et son équipe de l'Université Technique du Danemark et les LPFs (*large pitch fiber*) par Jens Limpert et son équipe de l'Institut Fraunhofer en Allemagne. Grâce à l'ajout d'inclusions d'air disposées selon un motif périodique dans la structure de la fibre, le mode fondamental peut alors être guidé malgré une différence d'indice cœur/gaine quasi-nulle. Très sensibles aux micro-courbures, ces fibres rendues rigides sont dites *rod-type* et sont utilisées à des longueurs sub-métriques. Ces technologies de fibres ont permis d'accéder aux meilleures performances en termes de niveaux d'énergie et de puissances crêtes (jusqu'à plusieurs GW) tout en conservant une émission monomode pour des diamètres de cœur dépassant pourtant 80 µm. Cependant, l'augmentation supplémentaire du diamètre de cœur s'est avérée compromise par l'apparition d'un nouveau phénomène : les instabilités modales transverses (IMT). Ces dernières ont été observées pour la première fois en 2011, en parallèle à la montée en puissance moyenne dans des fibres à cœurs toujours plus grands. Elles ont comme origine la modification du profil transverse de l'indice de réfraction induit par la charge thermique (défaut quantique et photo-noircissement), ce qui engendre un re-confinement des modes d'ordre supérieur dans le cœur de la fibre. S'ensuit alors l'apparition d'un réseau indiciel longitudinal à longue période dans le cœur actif qui autorise un couplage effectif entre le mode fondamental et un mode d'ordre supérieur, résultant finalement en un transfert d'énergie rapide, de l'ordre de la milliseconde, entre les deux modes. La conséquence est une dégradation significative de la qualité spatiale de faisceau rendant caduque l'obtention d'un faisceau stable, une fois le seuil des IMT dépassé.

Fully-aperiodic large-pitch fibers

Pour lutter contre les IMT, de nouveaux concepts de fibres sont mis en avant. En premier lieu, une rupture de symétrie de la structure influencera peu le confinement du mode fondamental alors que les modes d'ordres élevés seront plus efficacement délocalisés dans la gaine [4]. Un exemple de fibre apériodique appelée *fully-aperiodic large-pitch fibers* (FA-LPF) est présenté *figure 2*.

Ce type de fibre utilise de plus un cœur uniformément dopé en ytterbium, ce qui réduit l'influence néfaste du photo-noircissement [4]. Ainsi, pour un niveau d'absorption de pompage donné, on peut réduire la concentration en ions de terres rares puisque le matériau dopé occupe tout le volume de cœur contrairement aux fabrications par filamentation du cœur, utilisées par exemple dans les LPFs commerciales. Ces dernières diluent en effet les dopants avec des matériaux passifs bas indice afin de garantir l'obtention d'un matériau de cœur dont l'indice est adapté à celui de la silice environnante. Cela impose par conséquent l'utilisation de fortes concentrations locales en ions Yb^{3+}. En contrepartie, dans le cas des FA-LPF, un matériau de gaine dopée en aluminium

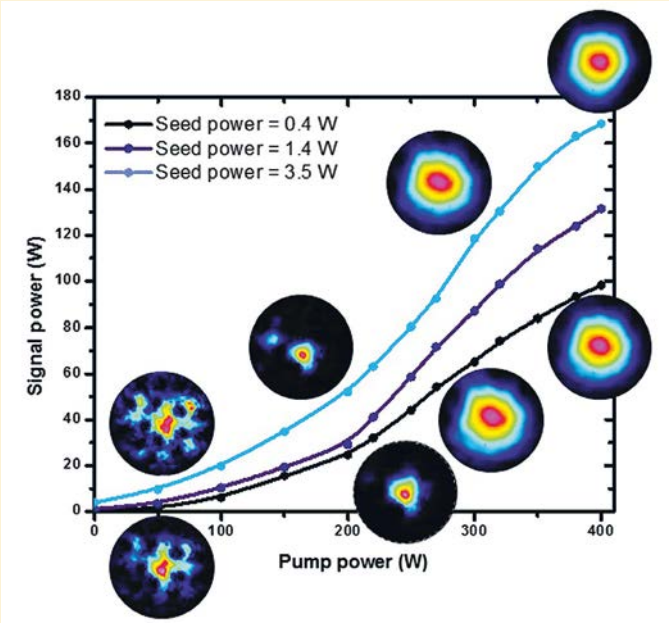

Figure 3. Profil d'intensité en sortie et courbe d'efficacité typique d'une FA-LPF à pré-compensation thermique, ici dans le cas d'un cœur de 115 µm de diamètre.

https://doi.org/10.1051/photon/20199923

doit être synthétisé avec une précision extrême (typiquement quelques 10^{-5}) afin que son indice de réfraction soit parfaitement adapté à celui du cœur : c'est à ce prix qu'une propagation et une amplification strictement monomode peuvent être obtenues, y compris pour de très grands diamètres de cœur. En pratique, la méthode de synthèse par voie poudre REPUSIL, permet d'obtenir ce niveau de contrôle [5]. La pertinence de ce design de fibre a été démontrée expérimentalement, notamment en régime passif avec un guidage purement monomode pour des cœurs allant jusqu'à 140 µm puis avec des FA-LPF actives/amplificatrices comportant des cœurs de plus de 110 µm. Pour la première fois, l'influence de différents paramètres du cœur sur le seuil des IMT a été étudiée expérimentalement [6]. Le concept FA-LPF peut, de plus, être adapté pour réaliser une « pré-compensation thermique » du profil d'indice. Une façon très simple de réaliser cette pré-compensation du profil d'indice en prévision de l'échauffement thermique est d'utiliser un cœur enterré, *i.e.* que l'indice du cœur doit être inférieur à celui de la gaine passive. Dans ce cas, le gradient thermique induit progressivement au cours de la montée en puissance va compenser le défaut volontairement induit dans le profil afin de retrouver des conditions de guidage idéales alors que le laser fonctionne à des niveaux de puissance moyenne de sortie bien plus élevés qu'habituellement pour ce type de fibre. La *figure 3* montre une courbe d'efficacité typique pour une fibre à profil d'indice pré-compensé : le mode fuit dans la gaine à basse puissance de pompe et le rendement est médiocre puis le champ se confine petit à petit en augmentant la puissance de pompe. Finalement, le gradient thermique mène à un confinement parfait du mode fondamental et à de très bons rendements optiques une fois la puissance de pompe suffisante atteinte.

Conclusion

Comme nous venons de le voir, les multiples possibilités de guidage existantes peuvent aujourd'hui être combinées aux différentes voies de synthèse de matériaux dopés maintenant arrivées à maturité. Cette combinaison en techniques de guidage et synthèse de matériaux donne accès à des fibres actives couvrant un large panel d'aires modales adaptées à différents régimes laser. Parmi les autres pistes de recherche pour poursuivre la montée de la puissance lumineuse, on trouve les travaux sur la combinaison cohérente de faisceaux issus de différentes fibres ou de différents cœurs d'une même fibre ou encore l'utilisation de modes d'ordres supérieurs à grande aire effective. Dans le cas des lasers impulsionnels, les propriétés de dispersion de la fibre font également l'objet d'un intérêt particulier. Enfin, on peut relever que le travail réalisé jusqu'à aujourd'hui principalement autour de la longueur d'onde de 1 µm est à présent transposé à d'autres longueurs d'onde d'intérêt comme 1,5 µm (fibres dopées erbium/ytterbium) et 2 µm (fibres dopées thulium).

POUR EN SAVOIR PLUS

[1] E. Snitzer et al., in Optical Fiber Sensors, Vol. 2 of OSA Technical Digest Series, paper PD5 (1988)

[2] A. Baz et al., *J. Lightwave Technologies* **31**, 830 (2013)

[3] J.-P. Yehouessi et al., *Opt. Express* **24**, 4761 (2016)

[4] R. Dauliat et al., *Applied Optics* **55**, 6229 (2016)

[5] K. Schuster et al., *Adv. Opt. Technol.* **3**, 447 (2014)

[6] M.-A. Malleville et al., *Opt. Lett.* **42**, 5230 (2017)

https://doi.org/10.1051/photon/20199923