

Mise en forme spatiale entièrement fibrée

E. HUGONNOT - P. CALVET / CEA – Cesta

C. VALENTIN - G. BOUWMANS - Y. QUIQUEMPOIS - L. BIGOT - A. MUSSOT - M. DOUAY / Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules, UMR 8523 – Institut de recherche sur les composants logiciels et matériels pour l'information et la communication avancée, USR CNRS 3380, Villeneuve d'Ascq

Certaines applications laser telles que le micro-usinage (ablation, lithographie, gravure...) ou l'injection de chaînes de puissance comme le Laser Mégajoule (LMJ), réclament un faisceau laser de profil spatial uniforme. Un tel profil est généralement obtenu en utilisant des optiques de mise en forme spatiale relativement onéreuses, complexes à aligner et peu compactes. Dans l'objectif de l'amélioration de la fiabilité des systèmes actuels, une solution élégante et efficace consiste à effectuer la mise en forme spatiale non plus en espace libre, mais à l'intérieur d'une fibre optique. Nous avons donc récemment réalisé une fibre microstructurée dont le mode fondamental est de forme spatiale aplatie. Ce travail représente un grand pas en avant vers la réalisation de systèmes modulaires de forte énergie entièrement fibrés.

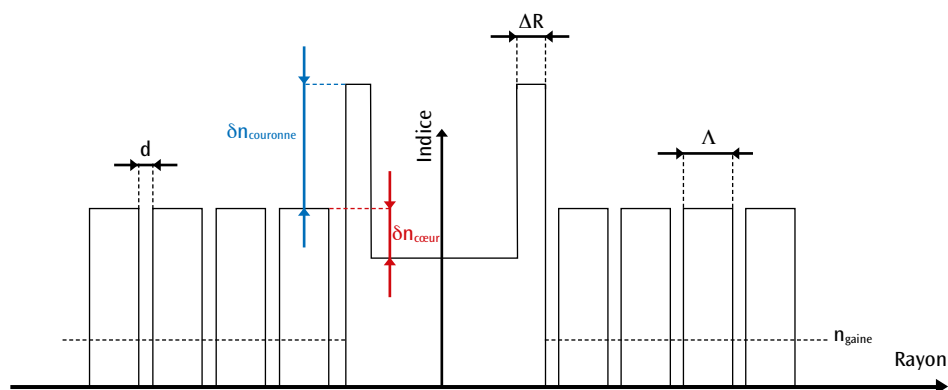
Les pilotes des installations lasers de puissance telles que le LMJ comprennent beaucoup de composants car ils doivent assurer de nombreuses fonctions : génération du faisceau, amplification avec un très fort gain, mises en forme spatiale, spectrale et temporelle, etc. Le trajet optique est ainsi très grand malgré la dimension modeste des pilotes au regard du reste de la chaîne. Afin de fiabiliser les pilotes, une solution intéressante est d'augmenter la part des fibres dans l'architecture au détriment de la part espace libre. Ceci est rendu possible par les progrès importants réalisés ces dernières années en matière d'énergie et puissance transportées dans les fibres optiques. Ainsi, avec les fibres, on peut améliorer l'exploitabilité des pilotes (compacité, facilité d'utilisation, stabilité), disposer d'architectures modulaires et faciliter l'alignement et les réglages.

Une fonction primordiale des pilotes est la mise en forme spatiale (MFS) du faisceau assurant une répar-

tition spatiale de la lumière laser la plus homogène possible. Dans les pilotes actuels, cette fonction est assurée par l'utilisation de miroirs de phase placés dans le premier étage d'amplification en espace libre qui transforment un faisceau gaussien en un faisceau aplati. Dans l'objectif de remplacer ce premier étage d'amplification par un système tout fibré, il est donc essentiel de parvenir à réaliser la fonction MFS dans une fibre optique.

Une solution élégante et efficace consiste alors à réaliser une fibre optique dont le mode de propagation ne soit pas de forme spatiale quasi gaussienne comme c'est le cas habituellement, mais plutôt de forme aplatie. Une telle exigence est rendue possible grâce à la technologie récente des fibres microstructurées qui permet de modifier les propriétés de propagation de la lumière en réalisant une structuration de la gaine entourant le cœur des fibres optiques. Des exemples de design de fibres optiques permettant

Figure 1.
Profil d'indice
d'une fibre
microstructurée
permettant
d'obtenir un mode
de propagation de
répartition spatiale
aplatie.



d'aplatir la distribution d'intensité du cœur optique ont ainsi été précédemment proposés dans la littérature, mais, jusqu'à présent, les résultats étaient uniquement numériques à l'exception d'un seul exemple de réalisation. Celui-ci avait donné des résultats relativement décevants, notamment du fait que d'autres modes que le mode fondamental pouvaient se propager, ce qui dégradait considérablement la qualité spatiale du faisceau [1].

Afin de résoudre ce problème, nous avons donc récemment proposé un design de fibre optique (figure 1) permettant non seulement d'obtenir un mode fondamental aplati à une longueur d'onde donnée $\lambda_0 \approx 1 \mu\text{m}$, mais également ne guidant que ce seul mode. Le point clef consiste à disposer une couronne de haut indice ($\delta n_{\text{couronne}}$) et de faible épaisseur entre le cœur et la gaine de la fibre. Afin de comprendre le phénomène permettant l'aplatissement du mode, l'évolution schématique de l'indice effectif de la structure est donnée sur la figure 2. À courte longueur d'onde (typiquement $\lambda \leq 0,5 \mu\text{m}$) l'indice effectif est celui de l'anneau et le mode obtenu est de forme annulaire. À grande longueur d'onde (typiquement $\lambda \geq 1,5 \mu\text{m}$), la lumière ne distingue plus l'anneau et le profil est gaussien. Lorsque l'indice effectif est égal à l'indice du cœur, on se trouve dans un cas intermédiaire, et le mode aplati désiré est alors obtenu sur une plage de longueur d'onde d'environ une centaine de nm autour de λ_0 . Des paramètres adéquats de la microstructure de la gaine (réseaux de trous de taille et de pas contrôlés) permettent ensuite de supprimer les modes d'ordre supérieurs indésirables et donc de ne conserver que le mode fondamental aplati. On peut d'ailleurs montrer qu'il est plus avantageux de réaliser le cœur avec une silice d'indice plus faible ($\delta n_{\text{cœur}}$) que celle utilisée pour la gaine car cela permet d'obtenir des conditions plus facilement réalisables en pratique [2].

Une fibre basée sur ce design et d'environ $20 \mu\text{m}$ de diamètre de cœur a alors été réalisée. La figure 3a montre une coupe transverse de la fibre prise en

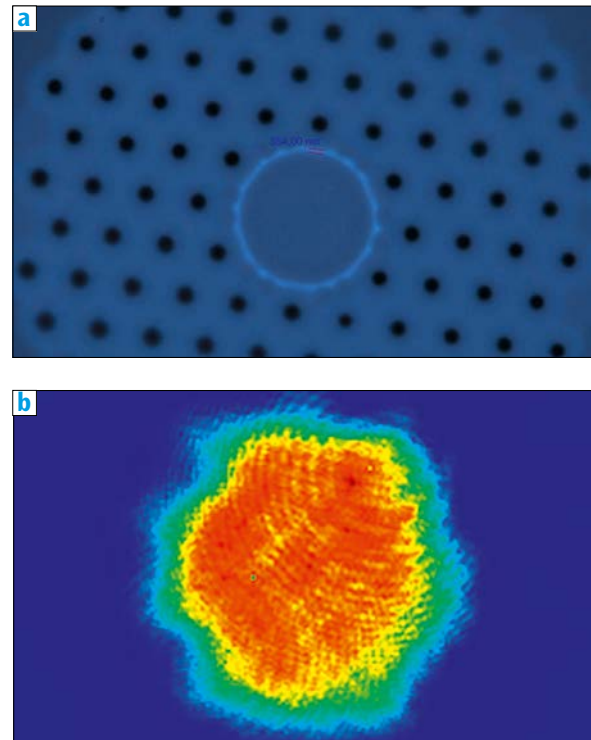


Figure 3. (a) : Profil transverse de la fibre réalisée – (b) : Répartition spatiale de l'intensité du faisceau obtenu en sortie de fibre.

microscopie électronique. Nous avons pu vérifier que la fibre obtenue est réellement monomode et nous l'avons alors intégrée dans un amplificateur laser entièrement fibré injecté dans des conditions proches de celles des pilotes LMJ. Le profil spatial obtenu à la longueur d'onde $\lambda_0 \approx 1,053 \mu\text{m}$ et pour une énergie de plus de $100 \mu\text{J}$ est présenté sur la figure 3b. Comme on peut le voir, celui-ci est d'excellente qualité et représente clairement une étape importante vers la réalisation de systèmes entièrement fibrés de forte énergie compatibles avec les besoins des pilotes de chaînes laser de puissance. De plus, ce nouveau concept de fibres peut également être utilisé pour de nombreuses applications réclamant un éclairage uniforme (micro-usinage laser, interaction lumière-matière, etc.).

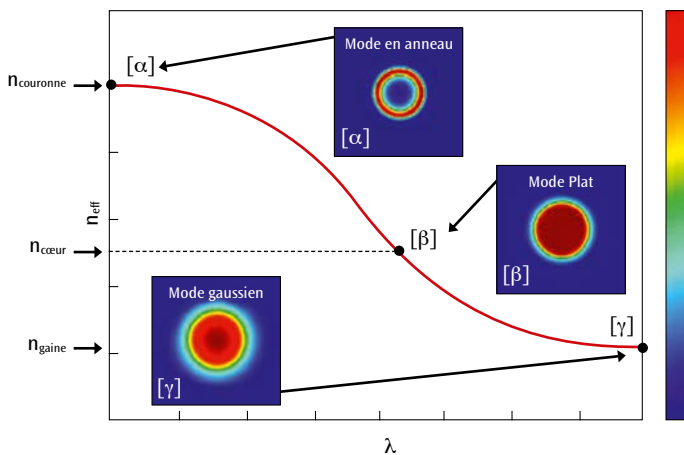


Figure 2. Évolution schématique de l'indice effectif du mode fondamental et de la répartition spatiale de son intensité en fonction de la longueur d'onde.

Références

- [1] J. W. DAWSON, R. J. BEACH, I. JOVANOVIC, B. WATTELIER, Z. M. LIAO, S. A. PAYNE, C. P. J. BARTY, "Large flattened mode optical fiber for reduction of non-linear effects in optical fiber lasers", *Proc. SPIE*, San Jose, January 25, 5335, p. 132-139 (2004).
- [2] C. VALENTIN, P. CALVET, Y. QUIQUEMPOIS, G. BOUWMANS, L. BIGOT, Q. COULOMBIER, M. DOUAY, K. DELPLACE, A. MUSSOT, E. HUGONNOT, "Top-hat beam output of a single-mode microstructured optical fiber: key role of core index depression", *Opt. Express*, 21, 23250 (2013).