

Conversion de fréquence pour les chaînes laser de fortes puissances du futur

Les applications sociétales des lasers de puissance, telles que la génération d'énergie par Fusion à confinement inertiel (FCI), la transmutation de produits de fission ou la protonthérapie, nécessitent des cadences de tir bien supérieures à celle des grandes installations scientifiques comme le National Ignition Facility (NIF) ou le Laser mégajoule (LMJ). S'appuyant sur les démonstrateurs technologiques Mercury [1], Halna, Polaris ou LUCIA, une nouvelle génération d'amplificateurs laser est étudiée pour les programmes européens HiPER (High Power laser Energy Research facility) ou ELI (Extreme Light Infrastructure). Les milieux laser retenus émettent dans l'infrarouge proche ($\lambda \approx 1,05 \mu\text{m}$). Ce rayonnement est ensuite converti en fréquence dans des cristaux optiques non linéaires, dans le vert pour la génération d'impulsions ultracourtes, voire dans l'ultraviolet pour la FCI. L'emploi de cristaux de LBO, peu sensibles aux effets thermiques, permettrait de porter la puissance moyenne de ces chaînes jusqu'à plusieurs kW.

G. Mennerat • O. Bonville CEA - Cesta

D. Lupinski Cristal Laser SA, Nancy

Functionner de manière permanente avec des cadences de tir de 10 Hz et des énergies dans la gamme kilojoule représente un défi considérable en matière de refroidissement des matériaux laser et de fiabilité d'ensemble. Certaines ruptures technologiques concernant les matériaux et les architectures sont déjà amorcées [2] pour minimiser la charge thermique et corriger les aberrations associées. De nouveaux compromis technico-économiques devront être trouvés autour de tailles de faisceaux de 10 à 15 cm. *In fine*, les cristaux convertisseurs devront fonctionner à des puissances moyennes dans la gamme 10 kW, soit deux ordres de grandeur supérieurs aux niveaux démontrés aujourd'hui.

Les monocristaux de dihydrogène-phosphate de potassium purs (KH_2PO_4 ou KDP) ou deutérés (DKDP) sont les seuls cristaux non linéaires qui puissent être produits industriellement en dimensions ($40 \times 40 \text{ cm}^2$) et quantités suffisantes pour équiper les centaines de faisceaux du NIF et du LMJ. Il existe un besoin de cristaux de dimensions intermédiaires plus tolérants que (D)KDP vis-à-vis des imperfections du faisceau incident et combinant des propriétés optiques et thermiques compatibles avec la très forte puissance moyenne.

En outre, leur intensité de fonctionnement devra être substantiellement plus faible pour atténuer les risques d'endommagement laser, exacerbés à haute cadence.

Doublement de fréquence

Des lasers ultra-intenses de la classe multipé-tawatt, fondés sur la technique d'amplification à dérive de fréquence, sont en cours de construction de par le monde. Pour atteindre des durées d'impulsions inférieures à 100 femtosecondes (soit 10^{-13} s), on emploie de gros amplificateurs large bande soit par effet laser dans des cristaux de saphir dopé au titane (TiSa), soit par effet optique paramétrique (OPA) dans des cristaux non linéaires. Ces deux variantes sont pompées par des impulsions énergétiques courtes (sub-ns à 30 ns) dans le vert (longueur d'onde de 500 à 550 nm).

Le pompage de cristaux TiSa s'accommodant bien d'une qualité de faisceau moyenne, les spécifications de front d'onde de ces lasers de pompe sont principalement déterminées par la criticité angulaire du doublement de fréquence. Relâcher ce paramètre simplifie l'architecture globale ; une meilleure conversion impacte en outre les coûts d'acquisition et de fonctionnement.



Figure 1.
Échantillons de
LBO, de 1 kg.

La PME nancéenne Cristal Laser a mis au point un procédé industriel de croissance cristalline fournissant des composants de triborate de lithium (LiB_3O_5 ou LBO) d'excellente homogénéité [3] (figure 1). Une étude de faisabilité, financée par le projet ELI, a démontré la production de 217 J de rayonnement à 527 nm par doublement de fréquence du faisceau principal d'Alisé, avec un rendement record de 92% dans des cristaux de 65 mm de diamètre [4]. La simple substitution de DKDP par LBO nous a par ailleurs permis, grâce à sa tolérance angulaire 10 fois plus large, de porter de 30% à 60% le rendement de conversion de faisceaux fortement aberrants, issus de lasers commerciaux délivrant des impulsions de 40 J à la cadence de 0,1 Hz [5].

Le LBO présente une résistance à l'endommagement laser exceptionnelle ($> 60 \text{ J/cm}^2$) et une non-linéarité deux fois supérieure à celle du DKDP. Sa très faible absorption et sa bonne conductivité lui confèrent un facteur de mérite thermique plus de 15 fois supérieur. Ces caractéristiques ont permis de produire 700 W de vert dans un système laser de marquage industriel [6] et laissent présager un excellent comportement à forte énergie et haute cadence.

Triplement de fréquence

Les applications en physique des hautes énergies nécessitent la production d'ultraviolet par triplement de fréquence. Le LBO dispose, pour cela, des mêmes avantages relatifs que pour le doublement de fréquence. Son potentiel a été validé dans l'installation Alisé en utilisant des cristaux de 65 mm de diamètre. 360 J de rayonnement

à 351 nm ont été produits en régime monocoup à partir de 450 J de rayonnement fondamental infrarouge, avec un rendement énergétique global exceptionnel de 80% [7].

Les progrès en cristallogenèse se poursuivent ; la production industrielle de composants de LBO décimétriques compatibles avec la gamme kilojoule est atteignable avec les techniques actuelles d'ici quelques années. Le LBO est par ailleurs un candidat prometteur pour l'amplification paramétrique optique d'impulsions ultra-courtes ($< 20 \text{ fs}$) ultra-intense (plusieurs dizaines de pétawatts).

RÉFÉRENCES

- [1] A. BAYRAMIAN *et al.*, "High-average-power femto-petawatt laser pumped by the Mercury laser facility", *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, B57-B61 (2008).
- [2] B. LE GARREC, "Technologies Lasers Futures", *Chocs Avancées*, p. 7-9 (2007).
- [3] A. KOKH *et al.*, "Growth of high quality - large size LBO crystals for high energy second harmonic generation", *J. Crystal Growth*, **312**, p. 1774-1778 (2010).
- [4] G. MENNERAT *et al.*, "Very High Efficiency High-Energy Frequency Doubling in the Alisé Facility", in *Advanced Solid State Photonics*, OSA (2010).
- [5] G. MENNERAT *et al.*, "Second harmonic generation of strongly aberrated beams in DKDP and LBO", *Proc. Advanced-Solid-State Photonics Conference*, Denver (CO) (2009).
- [6] C. STOLZENBURG *et al.*, "700 W intracavity-frequency doubled Yb: YAG thin-disk laser at 100 kHz repetition rate", in *Solid State Lasers XIX: Technology and Devices*, SPIE proceedings 7578 (2010).
- [7] G. MENNERAT *et al.*, "Frequency tripling for next generation high-energy lasers", *Proc. Advanced-Solid-State Photonics Conference*, Istanbul (Turquie), (2011).