

# Banc de caractérisation pour des lasers pompés par diode de puissance

Julien Didierjean, François Balembois, Patrick Georges  
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique- Campus Polytechnique  
RD128 - 91127 Palaiseau Cedex

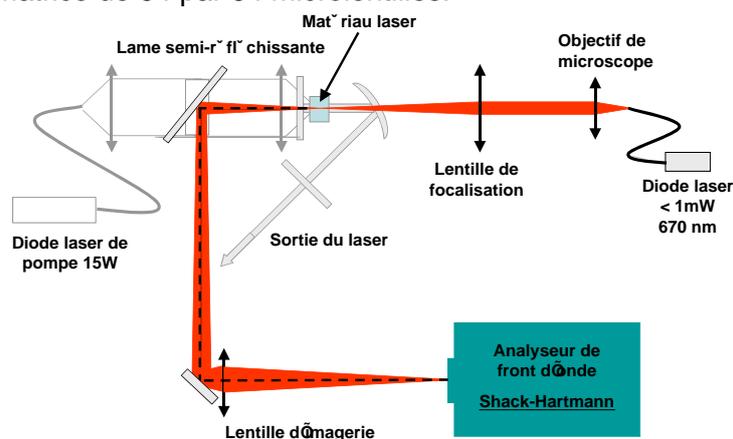
Nous avons mis en place un ensemble de moyens de caractérisations pour des nouveaux matériaux lasers dans la perspective d'un pompage par diode de forte puissance (jusqu'à 110W). Le banc comprend des moyens d'analyse (cartographie thermique, front d'onde), des diodes laser de forte puissance pour le pompage et des cavités pour la mise en oeuvre de l'effet laser. Avec ce banc nous pouvons mener des tests de nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium, des fibres cristallines en Nd:YAG et une étude comparative de cristaux commerciaux de vanadate dopés au néodyme ( $YVO_4$  et  $GdVO_4$ ). Récemment, nous avons proposé une nouvelle méthode de mesure de conductivité thermique pour les cristaux laser. Ces dispositifs ont également permis d'apporter des réponses pour des industriels souhaitant tester leurs propres systèmes laser.

## 1) Les outils

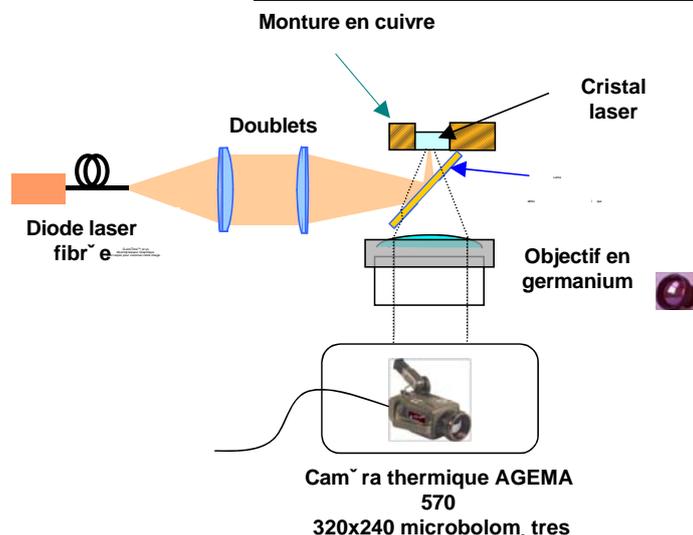
Le principal obstacle pour la montée en puissance des lasers solides pompés par diode est la tenue à l'échauffement thermique induit par le pompage. Ainsi, mesurer la température d'un matériau laser en fonctionnement et analyser la déformation du front d'onde au passage de la zone pompée du matériau sont des réponses pragmatiques à des problèmes dont la modélisation est complexe voire quasiment impossible lorsque les matériaux sont nouveaux et que leurs constantes thermo-optiques sont inconnues.

Le banc comprend deux outils basés sur l'analyse de front d'onde et la cartographie en température.

La figure ci-dessous rappelle simplement à quoi ressemble un **banc d'analyse de front d'onde** pour des cristaux laser soumis à un pompage intense. Ce banc est opérationnel avec un analyseur de front d'onde comportant une matrice de 64 par 64 microlentilles.



La figure ci-dessous rappelle le schéma d'un **banc de caractérisation thermique**.



Ce banc présente l'avantage de pouvoir mesurer la température de la face d'entrée du cristal avec ou sans effet laser. Ceci permet de tester l'influence de la population du niveau du haut de la transition laser sur l'élévation de température. Nous allons recevoir prochainement une nouvelle caméra thermique et un système optique infrarouge optimisé pour obtenir une résolution transversale de  $18\mu\text{m}$ , soit au moins deux fois meilleur que le matériel utilisé jusqu'à présent.

Le banc comprend également toute une gamme de diodes laser pour le pompage qui peuvent être utilisées de façon interchangeable sur les deux outils. Nous disposons maintenant de plusieurs diodes lasers fibrées de forte puissance :

- 30, 60W et 110W à 808 nm, pour le pompage des matériaux dopés néodyme
- 15W et 110 W vers 980 nm, pour le pompage des matériaux dopés ytterbium.

En parallèle de ces mesures thermo-optiques, nous réalisons également les tests laser dans des cavités optimisées et adaptées à chaque matériau laser. Les cavités sont généralement composées de deux ou trois miroirs, suivant la géométrie du matériau. Nous avons actuellement deux bancs laser (à 808 nm et à 980 nm) pour caractériser les performances des nouveaux matériaux.

## 2) Résultats

Les éléments du banc de caractérisation se sont mis en place à partir de septembre 2004. Nous avons travaillé à la caractérisation de nouveaux matériaux lasers en collaboration avec des laboratoires et des industriels. La suite détaille quelques exemples de ces travaux.

### Collaboration avec des laboratoires de recherche

- Étude avec le Centre Interdisciplinaire de Recherche sur les Ions et les Lasers (CIRIL) à Caen.

Le CIRIL a mis au point une méthode de croissance qui permet d'obtenir des cristaux de  $\text{CaF}_2$  dopés à l'ytterbium de très bonne qualité. Bien connu pour ses propriétés optiques, le  $\text{CaF}_2$  n'avait jamais été étudié dans sa version dopée à l'ytterbium pour des applications laser. Sa bande spectrale très large et la solidité de sa matrice en font un candidat de choix pour les sources lasers femtoseconde de puissance. Nous avons mené des tests en pompage par diode qui ont permis d'obtenir une puissance de sortie de l'ordre de 6W à 1050 nm pour une puissance de 15W issue d'une diode laser de pompage à 980 nm, ce qui représente une bonne efficacité pour un cristal de ce type. En régime femtoseconde, nous avons dépassé la barre du watt avec des impulsions de 220 fs seulement.

- Étude avec le Laboratoire de Chimie Appliquée de l'Etat Solide (LCMCP) de Chimie Paris.

Le travail a porté sur une caractérisation d'un nouveau cristal : le CALGO ( $\text{CaGdAlO}_4$ ) dopé à l'ytterbium qui présente l'avantage d'avoir une matrice de bonne conductivité thermique (entre 6 et 7  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) et un spectre large pouvant servir pour des lasers accordables dans le proche infrarouge et pour la génération d'impulsions ultrabrèves (femtosecondes). Le pompage par une diode laser de 15W a révélé un bon comportement thermique du cristal (pas de fracture, bonne qualité spatiale du faisceau laser de sortie). Ce travail a été la première étape des réalisations accomplies avec le CALGO par l'équipe ELSA : record de durée pour des cristaux Yb pompés par diode (soit 47 fs), combinaison unique de puissance élevée (autour du Watt) et de durée courte (inférieure à 100 fs)

La collaboration a également porté sur la caractérisation d'assemblage de cristaux dans le but de limiter l'échauffement dans la partie dopée. La partie non dopée sert de radiateur sur la face voyant le rayonnement de pompe. Pour cela, le LCMCP a mis au point plusieurs techniques de collage de matériaux différents. Nous avons testé des "hétéro assemblages" en Yb:SYS collé sur du YAG non dopé et du Nd:YVO<sub>4</sub> collé sur du saphir non dopé. Dans les deux cas, la réduction des effets thermiques est significative. Nous l'avons observé via le banc "front d'onde" pour le Yb:SYS//YAG et via le banc "thermique" pour le Nd:YVO<sub>4</sub>//saphir.

Enfin, le banc thermique nous a permis de mettre au point une nouvelle méthode de mesure de conductivité thermique, plus directe que les méthodes existantes. Ce point est important car les valeurs de conductivité thermiques sont souvent sujettes à controverse, comme dans le cas du Nd:YVO<sub>4</sub> et du Nd:GdVO<sub>4</sub>. De nombreuses valeurs ont été données dans la littérature, elles varient d'un facteur deux selon les cas, mettant parfois le Nd:GdVO<sub>4</sub> en tête et parfois le Nd:GdVO<sub>4</sub>. Historiquement, Nd:GdVO<sub>4</sub> a

été introduit après le Nd:YVO<sub>4</sub> en avançant surtout l'argument d'une bien meilleure conductivité thermique. Nous avons apporté notre contribution au débat avec une nouvelle mesure de la conductivité pour ces deux cristaux et en montrant que les conductivités sont plus proches l'une de l'autre que ce qui était annoncé dans certaines publications (Nos résultats sont : 5,6 W/m/K pour Nd:YVO<sub>4</sub> et 7,8 W/m/K pour Nd:GdVO<sub>4</sub>). Nous avons comparé cette mesure avec celle qui a été faite au LCMCP par une méthode totalement différente (mesure de variation de réflectivité induite par la présence d'une onde thermique). Nous trouvons des résultats comparables.

La comparaison entre les cristaux de Nd:YVO<sub>4</sub> et Nd:GdVO<sub>4</sub> a également été faite sur les bancs lasers à trois longueurs d'onde d'émission distinctes : 880 nm, 912 nm et 1064 nm. Il y a finalement peu de différences entre les deux cristaux à 1064 nm. Les performances des cristaux de Nd:GdVO<sub>4</sub> sont légèrement meilleures à 912 nm, et nettement supérieures à 880 nm du fait d'une émission parasite à 1064 nm dans le Nd:GdVO<sub>4</sub> qui n'arrive pas dans le Nd:YVO<sub>4</sub> car le gain à 1064 nm y est moins fort.

- Étude avec le CEA-LETI (Grenoble) sur des silicates dopés à l'ytterbium

Le CEA-LETI a mis au point des nouveaux cristaux de silicate (Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>) en particulier pour les scintillateurs. Dans leur version dopée à l'ytterbium, ces cristaux sont également des milieux laser que nous avons cherché à comparer. Le LSO a une conductivité thermique qui ne chute pas en fonction du dopage, contrairement au YSO. De plus, sa bande d'absorption est un peu plus large autour de 980 nm, ce qui donne un peu plus de souplesse pour le positionnement en longueur d'onde pour la diode laser de pompe. Nous avons testé ces deux cristaux sur un banc laser à 980 nm, trouvé de très bonnes efficacités (de l'ordre de 50%) et finalement assez peu de différences entre les deux matrices.

- Étude avec l'Université de Kaiserslautern (Allemagne).

Nous avons utilisé notre banc de caractérisation thermique pour tester différentes montures mécaniques de cristaux dopés néodyme. La monture mécanique est en effet une clef pour permettre l'évacuation de la chaleur induite par le pompage. Différentes configurations ont été testées : refroidissement par deux faces latérales ou par quatre faces latérales.

### **Travail sur les fibres cristallines**

Le Laboratoire de Physico Chimie des Matériaux Luminescent (LPCML) travaille depuis plusieurs années sur un nouveau processus de croissance appelé le "micropulling down" : croissance avec un tirage par le bas. Cette méthode permet d'élaborer des cristaux longs (de l'ordre du mètre) et fins (d'un diamètre inférieur au millimètre). Une jeune pousse issue du laboratoire : Fibrecryst, née il y a 3 ans, a développé industriellement la technologie et nous travaillons en collaboration avec ces deux entités pour la mise au point de matériaux lasers utilisant cette méthode.

Le banc de caractérisation laser a été fort utile pour orienter les efforts du LPCML et de Fibrecryst sur la croissance des matériaux. Après deux années de travail, une fibre cristalline en YAG dopé néodyme a permis de multiplier par 30 la puissance laser issue d'un matériau utilisant cette technologie : la puissance de sortie obtenue est de 10W contre 300 mW pour la meilleure performance rapportée dans la littérature.

### **Collaboration avec des industriels du laser :**

Nous avons également été sollicité par différents industriels français pour caractériser thermiquement des structures lasers sous pompage par diode. Nous avons pu apporter des réponses aux questions qu'ils se posaient concernant les architectures développées.

### **3) Conclusion**

En associant des diodes de fortes puissance à différentes longueurs d'onde et des outils de mesures thermo-optiques, le banc de caractérisation qui a été mis en place dans l'équipe ELSA du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique est unique en son genre. Il a été le point de départ pour la carrière de différents matériaux laser dont la liste est rappelée ici :

- Valorisation du cristal d'Yb:CaF<sub>2</sub> qui continue maintenant sa carrière comme composant clef de la source d'impulsions femtosecondes "Polaris" en Allemagne.
- Valorisation du cristal d'Yb:YSO pour des applications en métrologie (mise au point d'un étalon de fréquence secondaire stabilisé sur l'iode à 501,7 nm)

- Valorisation du cristal Yb:CaGO pour des applications en laser femtoseconde de forte puissance moyenne et de durée très brève
- Valorisation des fibres cristallines pour des lasers de forte puissance crête. En particulier dans ce dernier cas, notre banc a permis de mettre en évidence les progrès spectaculaires fait dans la croissance des fibres en Nd:YAG.

C'est également un outil qui peut être mis au service de laboratoires ou d'industriels souhaitant caractériser des dispositifs laser sur le plan de la thermique, du front d'onde et de la tenue à la puissance de pompe.

#### 4) Publications associées à ce travail

Publication dans des revues internationales à comité de lecture :

- P.1 A.Lucca, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé  
 "High power tunable diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub> laser"  
 Optics Letters, Volume 29, Issue 16, 1879-1881 (2004)
- P.2 A.Lucca, M. Jacquemet, G. Debourg, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé  
 "High power diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub> femtosecond laser"  
 Optics Letters, 29, 23 2767-2769 (2004)
- P.3 M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand  
 "Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping"  
 Applied Physics B, 80, 2 171-176 (Janvier 2005)
- P.4 F. Druon S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana  
 "Diode-pumped cw and femtosecond laser operations of a hetero-composite crystal YAG||SYS:Yb"  
 Optics Letters, Vol. 30, N°8, 857-859 (April 2005)
- P.5 Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Balembois, G. Lucas Leclin, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana  
 "47-fs diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:CaGdAlO<sub>4</sub> laser"  
 Optics Letters 31, 119-121 (2006)
- P.6 E. Herault, F. Balembois, and P.Georges  
 "Nd:GdVO<sub>4</sub> as a three-level laser at 879 nm"  
 Optics Letters 31 2731-2733 (2006)

#### Communication dans des conférences

- C.1 J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana  
 "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: bulk crystals (Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub>), and composite rods using a new method of bonding."  
 Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- C.2 J. Didierjean, S. Forget, F. Druon, F. Balembois, P. Georges  
 "High resolution absolute temperature mapping in laser crystals in diode-end-pumped configuration"  
 Poster, Photonics West 2005, San José USA (Janvier 2005)  
 Publications des actes dans : Solid State Lasers XIV: Technology and Devices edited by Hanna J. Hoffman, Ramesh K. Shori, Proceedings SPIE Vol. 5707 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 370-379
- C.3 J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana  
 "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: Comparative study of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub>, and test of a composite Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> rod using a new method of bonding."  
 Advanced Solid State Photonics (ASSP) (Lake Tahoe, février 2006)
- C.4 J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana  
 "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals : bulk crystals (Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub>) and composite rods"  
 Photonics Europe, Strasbourg (Avril 2006)  
 Publications des actes dans : Proceedings SPIE Vol 6184, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II