

12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22) Date de dépôt : 09.01.04.

30) Priorité : 07.08.03 FR 00309723.

43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 11.02.05 Bulletin 05/06.

56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71) Demandeur(s) : INSTITUT FRANCO-ALLEMAND DE RECHERCHES DE SAINT LOUIS — FR.

72) Inventeur(s) : HIRTH ANTOINE.

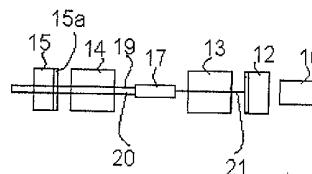
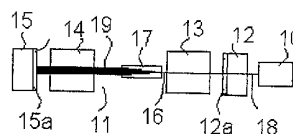
73) Titulaire(s) :

74) Mandataire(s) : DELEGATION GENERALE POUR L'ARMEMENT DIRECTION DES SYSTEMES DE FORCES ET DE LA PROSPECTIVE (SREA).

54) LASER A POMPAGE INTRACAVITE.

57) La présente invention a pour objet un laser à pompage intracavité comportant des premiers moyens de pompage (10) aptes à pomper des seconds moyens de pompage (13) constitué par un premier cristal (13) dopé avec du thulium et eux-mêmes aptes à pomper un second cristal (14) dopé avec de l'holmium, les premier et second cristal étant disposés dans une même cavité, caractérisant en ce qu'il comporte des moyens d'expansion (17) d'un faisceau laser aptes disposés entre les premiers moyens de pompage et les seconds moyens de pompage et/ou entre les seconds moyens de pompage et le second cristal.

Applications: notamment en médecine, et dans le domaine des lidars



L'invention concerne notamment le domaine des lasers et plus particulièrement une source laser à pompage intracavité.

Les lasers, fonctionnant à une longueur d'onde de 2 μm , qui présente un moindre danger pour la vue, peuvent avoir des applications dans de nombreux domaines tels que la médecine, les lidar, ou les sondages atmosphériques. Dans cette dernière application, la puissance du rayonnement laser doit être importante et la transmission atmosphérique, à la longueur d'onde considérée, doit être élevée.

Pour émettre à une telle longueur d'onde, il est connu d'utiliser une source laser TmYAG qui présente de bonnes qualités de faisceau et qui peut être pompée par exemple par des diodes laser commercialement disponibles à une longueur d'onde autour de 0,785 μm .

De plus, les cristaux dopés avec du thulium, tel que TmYAG ont un rendement de pompage en nombre proche de 2 à cause du phénomène de relaxation croisée entre ions voisins Tm^{3+} .

Dans le domaine d'émission de l'ion thulium Tm^{3+} , suivant le cristal hôte, il existe des raies d'absorption, en particulier celle de l'eau, qui réduisent considérablement la transmission atmosphérique.

Pour remédier à ce problème, il est connu d'utiliser une source laser HoYAG dont la longueur d'onde d'émission est située vers 2,10 μm et où la valeur de la transmission atmosphérique est bien meilleure. Cette source peut être pompée par des diodes laser émettant directement à 1,9 μm comme le propose le brevet US 5315608. Cependant de telles diodes sont complexes à réaliser et délivrent de faibles puissances.

Le brevet US4974230 peut être mis en œuvre pour résoudre ce problème. Il décrit l'utilisation d'un cristal YLF codopé avec du thulium et de l'holmium à des concentrations respectives de 6% et 0,4% et pompé avec des diodes laser émettant à une longueur d'onde de 0,792 μm .

Cependant un tel matériau rencontre des problèmes de changement de niveau électronique (up-conversion) ce qui a pour effet d'accroître les pertes dans le cristal et de réduire la durée de vie du niveau laser supérieur. De plus, le seuil du matériau laser, c'est-à-dire la quantité d'énergie minimale nécessaire pour que le matériau lase, est élevé.

Esterowitz et al. ont proposé , dans leur article intitulé « Intracavity-pumped 2,09 μ m HoYAG laser » Optics letters vol.17, N°10/May 15,1992 de réaliser un pompage intracavité. Pour cela, sont placés dans une même cavité résonnante, comme montré sur la figure 1, un premier cristal YAG 2 dopé à 12% avec du thulium et un second cristal YAG 3 dopé à 0,5% avec de l'holmium. La cavité 4 est délimitée d'une part par un miroir 5 à revêtement hautement réfléchissant aux longueurs d'onde de l'ordre de 2,1 μ m et à forte transmission pour les longueurs d'ondes de l'ordre de 0,785 μ m et un coupleur de sortie 6 présentant une face concave recouverte d'un revêtement 7 hautement réfléchissant à 2.0 μ m et ayant une réflectivité de 98,5% à 2,1 μ m. Le premier cristal est pompé par des premiers moyens de pompage 8 constitué par des diodes laser tandis que le premier cristal 2 constitue un moyen de pompage du second cristal 3.

Un rendement différentiel de 42% a pu être obtenu à une puissance de sortie de 140mW (TmYAG et HoYAG)

Par rapport à l'utilisation d'un cristal codopé Tm, Ho, le laser intracavité selon Esterowitz présente de nombreux avantages dont :

- Un meilleur rendement : 42% . En principe on peut mieux gérer la puissance utile absorbée par le cristal dopé Ho, et effectuer un pompage uniforme sur toute la longueur du cristal 3 avec des pertes par réabsorption réduites ;
- Un montage plus compact, avec moins d'éléments ;
- Une facilité à protéger le montage des effets de l'absorption de la vapeur d'eau dans l'air ambiante (trajet plus court).

Cependant, la puissance obtenue est faible et l'accroissement de la puissance du faisceau de pompage conduit à une détérioration du profil spatial du faisceau émis par le cristal HoYAG et à une impossibilité de l'utiliser en mode pulsé ou en mode continu.

En effet, on constate que dès que le cristal de HoYAG est placé dans la cavité, l'émission continue de TmYLF est transformée en émission pulsée. Les impulsions se succèdent de façon irrégulière avec des durées de quelques μ s. L'émission pulsée de TmYLF dépose, presque à chaque impulsion, suffisamment d'énergie de façon à pouvoir donner lieu à une inversion de population et à une émission de HoYAG. Lorsque le modulateur acousto-optique n'est pas enclenché, à chaque impulsion TmYLF correspond une impulsion HoYAG de durée variable entre

200 et 600ns suivant le niveau de pompage des diodes. La mise en œuvre d'un système de déclenchement, en l'occurrence un modulateur acousto-optique, à une cadence de 5 à 15kHz n'introduit pas plus de régularité dans la suite des impulsions.

5 L'objet de la présente invention est de remédier à ces problèmes en proposant un dispositif, permettant l'obtention d'un faisceau laser d'une puissance supérieur au Watt sans détérioration du profil spatial du faisceau émis par le cristal HoYAG avec possibilité de l'utiliser aussi bien en mode continu qu'en mode pulsé.

10 La solution apportée est, selon un premier mode de réalisation, un laser à pompage intracavité comportant des premiers moyens de pompage aptes à pomper des seconds moyens de pompage constitué par un premier cristal dopé avec du thulium et eux-mêmes aptes à pomper un second cristal dopé avec de l'holmium, les premier et second cristaux étant disposés dans une même cavité, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens d'expansion d'un faisceau laser disposés dans ladite cavité, entre le premier et le deuxième cristal.

15 Selon un mode de réalisation particulier, le dispositif d'expansion de faisceau est composé d'un dispositif afocal, tel par exemple une lentille divergente et une lentille convergente.

Selon un autre mode de réalisation particulier, le dispositif d'expansion de faisceau est constitué par au moins un prisme.

20 Selon une caractéristique permettant de faciliter la mise en œuvre du dispositif d'expansion du fait de la non criticité de son alignement, le prisme est réalisé en cristal YAG. Ce dernier à un indice de réfraction élevé et une bonne transparence à la longueur d'onde de $2,1\mu\text{m}$.

25 Selon une caractéristique particulière permettant de compenser la dispersion spectrale des faisceaux et de permettre au faisceau élargi de sortir dans la même direction que le faisceau incident, le dispositif d'expansion de faisceau est constitué par deux prismes successifs ayant le même angle au sommet β mais inversés l'un par rapport à l'autre.

30 Selon une caractéristique additionnelle, les angles au sommets β des dits deux prismes sont égaux.

Selon une caractéristique particulière permettant d'ajuster la longueur d'onde d'émission du premier cristal à la longueur d'onde désirée, le laser comporte un

dispositif sélecteur de longueur d'onde constitué, par exemple, par un étalon Fabry Perot en silice.

5 Selon une autre caractéristique permettant de maintenir le fonctionnement du laser dans un domaine d'émission où le rendement est le plus élevé possible, le premier cristal est constitué par du YLF dopé avec du thulium et la cavité contenant le premier cristal comporte un premier miroir dont le revêtement a un profil spectral qui permet de faire fonctionner le laser de pompage à une longueur d'onde proche de $1,91\mu\text{m}$ à laquelle le gain est maximal.

10 Selon une autre caractéristique de l'invention permettant de réduire considérablement le risque d'apparition du phénomène de lentille thermique, le laser comporte deux cavités transverses et imbriquées.

Selon une autre caractéristique permettant de réduire considérablement la dimension de chacune des cavités, le seul élément commun entre les deux cavités est le second cristal dopé avec de l'holmium.

15 Selon une caractéristique additionnelle, la cavité contenant le premier matériau comporte une lame séparatrice hautement réfléchissante à la longueur d'onde à laquelle lase le premier cristal dopé avec du thulium et dont la transmission est très élevée à la longueur d'onde à laquelle lase le second cristal dopé avec de l'holmium, cette lame pouvant, par exemple, être hautement réfléchissante pour les
20 longueurs d'onde comprises entre $\lambda=1,91$ à $1,953\mu\text{m}$ pour la polarisation « S » et avoir une transmission maximale pour les longueurs d'onde de l'ordre de $2,1\mu\text{m}$ pour la polarisation « P » et éventuellement être placée sous une certaine incidence par rapport à la direction du faisceau.

25 Selon une caractéristique particulière, les premier et second cristaux sont choisis parmi les cristaux suivants ou une combinaison d'entre eux :

YSAG (grenat d'aluminium de scandium et d'ytterbium), que YSAG (grenat d'aluminium de scandium et d'ytterbium), que YSGG (grenat de gallium de scandium et d'ytterbium), YGG (grenat de gallium et d'ytterbium), GGG (grenat de gallium et de gadolinium), GSGG (grenat de gallium de scandium et de gadolinium), GSAG
30 (grenat d'aluminium de gallium et de gadolinium), LLGG (grenat de gallium, lutétium et lanthane), LLGG (grenat de gallium, lutétium et lanthane), YAP (perovskite d'aluminium et d'yttrium), YLF (fluoride de lithium et d'yttrium), LuLF (fluoride de lithium et de lutétium), YVO_4 (vanadate d'yttrium) .

D'autres avantages et caractéristiques de la présente invention apparaîtront dans la description de différentes variantes de réalisation de l'invention, en regard des figures annexées parmi lesquelles :

- La figure 1 présente l'état de la technique,

5 - Les figures 2a et 2b schématisent les moyens généraux constitutifs d'une variante de réalisation de l'invention,

- Les figures 3a et 3b présentent une seconde variante de réalisation de l'invention,

10 - Les figures 4a, 4b présentent une troisième variante de réalisation de l'invention,

- La figure 4c présente une modification de cette troisième variante qui permet d'accroître la puissance de pompage,

- La figure 5 montre un exemple de dispositif d'expansion utilisé dans le cadre de la troisième variante de réalisation de l'invention.

15 Les figures 2a et 2b schématisent les moyens généraux constitutifs d'un laser à pompage intracavité selon une variante de réalisation de l'invention dans laquelle il comporte des premiers moyens de pompage 10 constitués par des diodes laser aptes à pomper des seconds moyens de pompage 13 constitués par un premier cristal dopé avec du thulium et eux-mêmes aptes à pomper un second
20 cristal 14 dopé avec de l'holmium, les premier et second cristaux étant disposés dans une même cavité 11.

Cette cavité 11 est délimitée d'une part par un premier miroir 12 comportant, du côté de la cavité, un revêtement 12a réfléchissant aux longueurs d'onde de l'ordre de 1,9 et 2,1 μ m et à forte transmission pour les longueurs d'ondes de l'ordre
25 des diodes laser et un second miroir de sortie 15 présentant une face, coté cavité 11, recouverte d'un revêtement 15a hautement réfléchissant à 1,91 μ m et ayant une réflectivité de l'ordre de 95% à 2,1 μ m, c'est-à-dire à la longueur d'onde d'émission du laser. Par ailleurs, la face opposée audit revêtement du premier miroir 12 est à forte transmission pour les longueurs d'ondes des diodes laser.

30 Cette cavité comporte en outre un dispositif 17 d'expansion de faisceau disposé entre les deux cristaux 13 et 14.

Ce dispositif d'expansion est de type connu et permet d'accroître la dimension du faisceau, donc de réduire la densité de puissance de ce dernier tout en conservant la puissance globale du faisceau.

Les premiers et seconds cristaux utilisés sont de type YAG (grenat d'aluminium et d'ytterbium). Cependant tout autre cristal ou combinaison de cristaux adéquat pourrait être utilisés tels que YSAG (grenat d'aluminium de scandium et d'ytterbium), que YSAG (grenat d'aluminium de scandium et d'ytterbium), que YSGG (grenat de gallium de scandium et d'ytterbium), YGG (grenat de gallium et d'ytterbium), GGG (grenat de gallium et de gadolinium), GSGG (grenat de gallium de scandium et de gadolinium), GSAG (grenat d'aluminium de gallium et de gadolinium), LLGG (grenat de gallium, lutétium et lanthane), LLGG (grenat de gallium, lutétium et lanthane), YAP (perovskite d'aluminium et d'yttrium), YLF (fluoride de lithium et d'yttrium), LuLF (fluoride de lithium et de lutétium), YVO₄ (vanadate d'yttrium) ...

Le fonctionnement de ce dispositif laser est le suivant. Pour une question de clarté, les faisceaux de pompage sont représentés sur la figure 2a tandis que le faisceau généré par le second cristal est présenté sur la figure 2b.

Un premier faisceau de pompage 18 est émis par les diodes laser 10. Ce faisceau traverse, sans perte, le premier miroir 12 et son revêtement 12a associé puis le cristal TmYAG 13 dans lequel il est absorbé presque en totalité (de l'ordre de 80%). Ce premier cristal se met alors à laser en émettant un faisceau laser 16 dont la longueur d'onde est de 1,91µm. Ce faisceau 16 traverse alors le dispositif d'expansion de faisceau 17 dans lequel sa section est accrue d'un facteur 10, diminuant ainsi sa densité de puissance d'un facteur aussi égal à 10. Le faisceau de pompage élargi 19 sortant du dispositif d'expansion 17 traverse le second cristal 14 dans lequel il est partiellement absorbé. La partie non absorbée est réfléchiée par le revêtement 15a en direction du second cristal 14 dans lequel il est à nouveau partiellement absorbé. La partie absorbée par le second cristal 14 du faisceau issu du premier cristal entraîne l'émission, par le second cristal, d'un faisceau 20 à une longueur d'onde d'environ 2,1µm. En sortant, du deuxième cristal 95% de ce faisceau 20 est réfléchi par le revêtement 15a du second miroir 15 tandis que 5% du faisceau le traverse ; Cette partie du faisceau référencée 9 peut alors être utilisée, de façon connue, à l'extérieur de la cavité. Ainsi, entre les revêtements respectifs des miroirs 12 et 15, il y a une superposition des faisceaux 16,19, 20,21 issus respectivement du premier et du deuxième cristal.

Les figures 3a et 3b présentent une seconde variante de réalisation de l'invention dans laquelle le laser est à cavités imbriquées transverses. Il comporte

des premiers moyens de pompage 10 constitués par des diodes laser fonctionnant à une longueur d'onde de $0,792\mu\text{m}$ et aptes à pomper des seconds moyens de pompage 33 constitués par un premier cristal 33 constitué par du fluorure de lithium et d'yttrium dopé avec du thulium à un taux de 3.5% et d'une longueur active de 5 8mm et eux-mêmes aptes à pomper un second cristal 14 constitué par du YAG dopé avec de l'holmium à un taux de 0,3% et d'une longueur active L de 20mm, les premier et second cristaux étant disposés dans deux cavités imbriquées, c'est-à-dire possédant une partie commune.

La première cavité 48, à savoir celle du premier cristal TmYLF est délimitée 10 d'une part par un premier miroir 22 comportant, du côté de la cavité, un revêtement 25 réfléchissant aux longueurs d'onde comprise dans le domaine $1,9-2,1\mu\text{m}$ et à forte transmission pour les longueurs d'ondes de l'ordre des diodes laser et un second miroir 23 présentant une face, coté cavité, recouverte d'un revêtement 26 hautement réfléchissant notamment aux longueurs d'onde comprises entre 1,9 et 15 $2,1\mu\text{m}$. Par ailleurs, la face opposée audit revêtement du premier miroir 22 est à forte transmission pour les longueurs d'ondes d'émission des diodes laser. La longueur de cette cavité est d'environ environ 60mm.

Cette cavité comporte, depuis le premier miroir 22, un sélecteur 45 de la longueur d'onde de pompage, le premier cristal TmYLF 33, une lame séparatrice 32, 20 un dispositif d'expansion de faisceau 28 et le second cristal HoYAG 14. Le dispositif d'expansion de faisceau 28 utilisé accroît, dans une seule direction perpendiculaire à celle du faisceau, sa largeur d'un facteur sensiblement égal à 10.

La seconde cavité 50, à savoir celle du premier cristal HoYAG est délimitée d'une part par le second miroir 23 de la première cavité et d'autre part par un 25 troisième miroir 24 de sortie comportant, du côté de la cavité, un revêtement 27 ayant une réflectivité de l'ordre de 95% à $2,1\mu\text{m}$, c'est-à-dire à la longueur d'onde d'émission du laser de HoYAG.

Cette cavité comporte, d'une part, depuis le second miroir 23 jusqu'à la lame séparatrice 32, les mêmes éléments, 23, 26, 14, 28 que la première cavité car 30 cette partie est commune aux deux cavités et d'autre part, disposés au-delà de la lame séparatrice 32 et entre celle-ci et le troisième miroir 24, un dispositif de déclenchement constitué par un modulateur acousto-optique 34. La longueur de cette cavité est d'environ 80mm.

Comme le barreau de HoYAG est placé dans la partie commune aux deux cavités imbriquées donc sur un trajet où les deux faisceaux sont superposés, il est traversé par ces derniers. La fonction de la lame séparatrice 32 est de séparer le faisceau généré par TmYLF de celui généré par HoYAG en jouant sur la différence de polarisation et de longueur d'onde, et ce afin de supprimer la distorsion du faisceau HoYAG par le phénomène de lentille thermique générée par le faisceau de pompage issu des diodes dans le premier cristal TmYLF. La lame séparatrice 32 placée sous 45° d'incidence remplit partiellement ce rôle ; elle est hautement réfléchissante pour les longueurs d'onde de l'ordre de $\lambda=1,91\mu\text{m}$ pour la polarisation « S » et une transmission maximale pour la longueur d'onde de l'ordre de $2,1\mu\text{m}$ pour la polarisation « P ».

Par ailleurs pour permettre un fonctionnement avec un seuil de saturation de HoYAG le plus élevé possible, il est nécessaire de faire fonctionner les seconds moyens de pompage à une longueur d'onde de $1,91\mu\text{m}$ plutôt qu'à une longueur d'onde $1,953\mu\text{m}$. C'est dans ce but qu'il est préférable d'utiliser d'une part un profil spectral du miroir 22 qui permette de faire fonctionner le laser de pompage 33 à une longueur d'onde plus proche de $1,91\mu\text{m}$ que de $1,953$ et d'utiliser le dispositif sélecteur de longueur d'onde pour ajuster la longueur d'onde d'émission du premier cristal 33 à la longueur d'onde désirée. Ce dispositif sélecteur de longueur d'onde est constitué, dans cet exemple, par étalon Fabry Perot en silice.

Le fonctionnement de ce dispositif laser est le suivant. Pour une question de clarté, les faisceaux de pompage sont représentés sur la figure 3a tandis que le faisceau généré par le second cristal est présenté sur la figure 3b.

Un premier faisceau de pompage 18 est émis par les diodes laser 10. Ce faisceau traverse, sans perte, le premier miroir 22 et son revêtement 25 associé puis il traverse la lame de sélection 45 puis le premier cristal TmYLF avec lequel il interagit. Ce premier cristal 33 génère alors un faisceau 29 de pompage du second cristal HoYAG 14. Ce faisceau 29 dont la longueur d'onde est d'environ $1,91\mu\text{m}$ est réfléchi par la lame séparatrice 32 en direction du dispositif d'expansion 28 du faisceau dans lequel sa section est accrue d'un facteur 10, diminuant ainsi sa densité de puissance d'un facteur aussi égal à 10. Le faisceau de pompage 30 sortant du dispositif d'expansion 28 pénètre alors dans le second cristal 14 avec lequel il interagit. Le second cristal 14 se met alors à laser en émettant un faisceau 35 à une longueur d'onde d'environ $2,1\mu\text{m}$.

Comme montré sur la figure 3a, le faisceau de pompage émis par le premier cristal et qui n'a pas interagit avec le second cristal est réfléchi par le miroir 23 et traverse à nouveau le second cristal dans lequel il interagit puis la partie qui n'a pas interagit traverse le dispositif d'expansion de faisceau 28 avant d'être dirigé en direction du premier miroir 22 par la lame séparatrice 32.

Comme montré sur la figure 3b, le faisceau d'émission du second cristal 14 est réfléchi par le second miroir 23 puis traverse le second cristal 14, le dispositif d'expansion 28 qui transforme le faisceau incident 35 en un faisceau 36 dont la section est diminuée d'un facteur 10. Ce faisceau 36 traverse ensuite la lame séparatrice 32, le modulateur acousto-optique 34 avant d'être réfléchi, en partie, par le revêtement 27 du miroir 24, la partie transmise du faisceau, référencée 9, pouvant alors être utilisée, de façon connue, à l'extérieur de la cavité.

Entre le revêtement 26 du miroir 23 et la lame séparatrice 32, les faisceaux respectivement des premier et second cristaux sont superposés.

Les figures 4a, 4b et 5 présentent une troisième variante de réalisation de l'invention dans laquelle le laser est aussi à cavités imbriquées transverses. Il comporte des premiers moyens de pompage 10 constitués par des diodes laser fonctionnant à une longueur d'onde de $0,792\mu\text{m}$ et aptes à pomper des seconds moyens de pompage constitués par un premier cristal 33 constitué par du fluorure de lithium et d'yttrium dopé avec du thulium à un taux de 3.5% et d'une longueur active de 8mm et eux-mêmes aptes à pomper un second cristal 14 constitué par du YAG dopé avec de l'holmium à un taux de 0,3% et d'une longueur active L de 20mm, les premier et second cristaux étant disposés dans deux cavités imbriquées, c'est-à-dire possédant une partie commune.

La première cavité 49, à savoir celle du premier cristal TmYLF, comporte les mêmes éléments disposés dans le même ordre que dans le cadre de la deuxième variante de réalisation de l'invention, à savoir, un premier miroir 22 comportant, du côté de la cavité, un revêtement 25 réfléchissant aux longueurs d'onde de l'ordre de $1,91$ et $2,1\mu\text{m}$ et à forte transmission pour les longueurs d'ondes de l'ordre des diodes laser, un sélecteur 45 de la longueur d'onde de pompage, le premier cristal TmYLF 33, une lame séparatrice 46 hautement réfléchissante aux longueurs d'onde de l'ordre de $1,91$ et $2,1\mu\text{m}$, un dispositif d'expansion de faisceau 37,43,44 puis le second cristal HoYAG 14 et un second miroir 42 présentant une face, coté cavité, recouverte d'un revêtement 26 hautement réfléchissant notamment aux longueurs

d'onde comprises entre 1,9 et 2,1 μ m. Par ailleurs, la face opposée audit revêtement du premier miroir 22 est à forte transmission pour les longueurs d'ondes d'émission des diodes laser. La longueur de cette cavité est d'environ environ 60mm.

5 La seconde cavité 51, à savoir celle du premier cristal HoYAG, est délimitée d'une part par un troisième miroir 39 recouvert, du côté de la cavité, par un revêtement 40 hautement réfléchissant à 2,1 μ m, c'est-à-dire à la longueur d'onde d'émission du laser. Elle comporte ensuite le second cristal HoYAG 14 puis un modulateur acousto-optique 34 et enfin un miroir de sortie 24 recouvert par un revêtement 27 ayant une réflectivité de l'ordre de 95% à 2,1 μ m.

10 La seconde cavité, ne comporte comme partie commune avec la première cavité, uniquement le second cristal HoYAG ce qui évite toute superposition des faisceaux de pompage et du faisceau d'émission du second cristal et donc limite au maximum le risque de perturbations par le phénomène de lentille thermique apparaissant dans le premier cristal.

15 Par ailleurs, cet agencement des éléments constitutifs du laser permet de limiter considérablement la longueur de la deuxième cavité puisque sa longueur est d'environ environ 40mm.

20 Comme montré sur la figure 5, le dispositif d'expansion d'un faisceau 37 est constitué par deux prismes 43 et 44 successifs ayant le même angle au sommet β mais inversés l'un par rapport à l'autre au niveau de leur disposition.

La solution qui paraît la meilleure et la plus facile à mettre en œuvre à cause d'un alignement moins critique consiste à utiliser des prismes réalisés en YAG non dopé ($n=1,8050$ à 1,9 μ m).

25 On peut aisément obtenir près d'un facteur 3 de grandissement avec un seul prisme. Suivant l'angle d'incidence i , le grandissement du faisceau G s'écrit :

$$G=(1/n).\left[\frac{n^2-\sin^2i}{1-\sin^2i}\right]^{1/2}$$

Avec G tendant vers l'infini lorsque i tend vers $\pi/2$

30 On a choisi un angle d'incidence de 75°, valeur pour laquelle on peut, pour une polarisation « p » réaliser de bons traitements antireflets. L'angle au sommet β d'un prisme devient égal à 32°21'.

$$l=L.\text{tg } \beta$$

$$l'\text{tg}(\pi/2-i)=d$$

d étant le diamètre du faisceau d'entré

Avec les deux prismes 43 et 44 de même angle β , mais différents en taille, l'encombrement minimum devient :

$$l+l' = L \cdot \text{tg } \beta + d / \text{tg}(\pi/2-i) = d[G \cdot \text{tg} \beta + 1 / \text{tg}(\pi/2-i)]$$

5 Avec deux prismes identiques, $l+l'$ devient :

$$l+l' = L[\text{tg } \beta + (1-1/G^2 + \text{tg}^2 \beta)]$$

Avec $G=10$, $1/G^2 \ll 1$

$$l+l' = L(1 + \sin \beta) / \cos \beta$$

Avec $\beta=32^\circ 21'$, $l+l'=1,8L$ et $L \geq d \cdot G$

10 Avec $G=10$ et $d < 1\text{mm}$, l'encombrement total suivant la longueur de cavité ne dépasse pas 18mm, ce qui permet de conserver des longueurs de cavité courtes.

L'intérêt d'un dispositif à 2 prismes successifs ayant des angles au sommet inversés est double : d'une part il compense la dispersion spectrale des faisceaux et d'autre part le faisceau élargi sort dans la même direction que le faisceau incident.

15 Le fonctionnement de ce dispositif laser est le suivant. Pour une question de clarté, les faisceaux de pompage sont représentés sur la figure 4a tandis que le faisceau généré par le second cristal est présenté sur la figure 4b.

Un premier faisceau de pompage 18 est émis par les diodes laser 10. Ce faisceau traverse, sans perte le premier miroir 22 et son revêtement 25 associé puis
20 il traverse la lame de sélection 45 puis le premier cristal TmYLF 33 avec lequel il interagit. Le premier cristal 33 génère alors un faisceau de pompage 29 du second cristal HoYAG 14. Ce faisceau 29 dont la longueur d'onde est de l'ordre de $1,91\mu\text{m}$ est réfléchi par la lame séparatrice 46 en direction du dispositif d'expansion 37 du faisceau dans lequel sa section est accrue d'un facteur 10, diminuant ainsi sa
25 densité de puissance d'un facteur aussi égal à 10. Le faisceau de pompage 29 pénètre alors dans le second cristal 14 avec lequel il interagit. Le second cristal se met alors à laser, émettant un second faisceau 41 à une longueur d'onde de $2,1\mu\text{m}$ qui ne traverse pas le dispositif d'expansion de faisceau 37 et qui est dans une direction perpendiculaire à celle du faisceau de pompage émis par TmYLF. Ainsi, il
30 n'est pas nécessaire que le matériau constitutif des prismes soit transparent à la longueur d'onde d'émission de HoYAG qui est de $2,1\mu\text{m}$.

Comme montré sur la figure 4a, le faisceau de pompage émis par le premier cristal et qui n'a pas interagit avec le second cristal est réfléchi par le miroir 42 et

traverse à nouveau le second cristal dans lequel il interagit puis il traverse le dispositif d'expansion 37 de faisceau dans lequel sa section est diminuée d'un facteur 10 avant d'être dirigé en direction du premier miroir 22 par la lame séparatrice 46.

Comme montré sur la figure 4b, le faisceau d'émission du second cristal 14 est réfléchi par le troisième miroir 39 puis traverse le second cristal 14, le modulateur acousto-optique 34 avant d'être réfléchi, en partie, par le miroir 24, la partie transmise du faisceau, référencée 9, pouvant alors être utilisée, de façon connue, à l'extérieur de la cavité.

Dans cette variante de réalisation, la lame séparatrice 46 n'a pas de fonction particulière si ce n'est de modifier la direction du faisceau généré par le premier cristal 33 d'un angle égal à $\pi/2$ radians. Elle pourrait donc être supprimée et la cavité 49 serait alors longitudinale et perpendiculaire à la cavité 51. Cependant, cette lame de séparation 46, en étant réfléchissante au rayonnement laser 29 émis par le premier cristal du côté de ce dernier, et transparente au rayonnement émis par les diodes de l'autre côté, pourrait être utilisée pour accroître la puissance de pompe du premier cristal 33. En effet, il suffit, comme montré sur la figure 4c, de disposer, de façon symétrique par rapport à la lame séparatrice 46, un second ensemble formé par des diodes 10, un miroir 22 et son revêtement 25, et une lame de sélection 45. Ainsi, le premier cristal serait pompé d'une part directement par le rayonnement issu du premier ensemble et d'autre part par celui issu du second ensemble via la lame de séparation 46. Cette solution permet, par rapport au dispositif selon la figure 4a, de doubler la puissance utile pour le pompage du premier cristal 33.

Avec le pompage de HoYAG, soit longitudinal soit transverse, la réduction de la densité de puissance de pompage, due à l'expansion du faisceau, diminue voire supprime les fluctuations de l'émission de TmYLF et HoYAG. En choisissant un dispositif qui élargit dans une seule direction, en conservant la hauteur du faisceau de pompage, on passe facilement à un montage transverse. Dans le cas du pompage longitudinal, le faisceau à $2,1\mu\text{m}$ doit traverser cet élément et on a le souci de choisir un matériel à très faible perte par absorption à cette longueur d'onde.

Bien entendu, de nombreuses modifications peuvent être apportées à l'exemple de réalisation précédemment décrit sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Laser à pompage intracavité comportant des premiers moyens de pompage (10) aptes à pomper des seconds moyens de pompage (13,33) constitués par un premier cristal (13,33) dopé avec du thulium et eux-mêmes aptes à pomper un second cristal (14) dopé avec de l'holmium, les premier et second cristal étant disposés dans une même cavité, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif d'expansion d'un faisceau laser (17,28,37) disposés dans ladite cavité, entre le premier et le deuxième cristal.
2. Laser selon la revendication 1, caractérisé en ce que le dispositif d'expansion de faisceau est composé d'un dispositif afocal, constitué par exemple d'une lentille divergente et d'une lentille convergente.
- 3 Laser selon la revendication 1, caractérisé en ce que le dispositif d'expansion de faisceau est constitué par au moins un prisme.
- 4 Laser selon la revendication 3, caractérisé en ce que le dispositif d'expansion de faisceau est constitué par au moins un prisme réalisé en cristal YAG.
- 5 Laser selon l'une quelconque des revendications 3 et 4, caractérisé en ce que le dispositif d'expansion de faisceau est constitué par deux prismes (43,44) successifs ayant le même angle au sommet β mais inversés l'un par rapport à l'autre.
6. Laser selon la revendication 5, caractérisé en ce que les angles au sommets β des dits deux prismes sont égaux.
- 7 Laser selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif sélecteur de longueur d'onde (45) constitué, par exemple, par un étalon Fabry Perot (45) en silice.
- 8 Laser selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la le premier cristal (33) est constitué par du YLF dopé avec du thulium et en ce que la cavité contenant ce premier cristal (33) comporte un premier miroir (22) dont le revêtement (25) a un profil spectral apte à faire fonctionner le second laser de pompage (33) à une longueur d'onde proche de $1,91\mu\text{m}$.
- 9 Laser selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comporte deux cavités transverses et imbriquées (48,50 ;49,51).
- 10 Laser selon la revendication 9, caractérisé en ce que le seul élément commun entre les deux cavités (49,51) est le second cristal (14) dopé avec de l'holmium.

PL.1/5

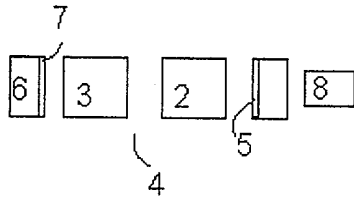


FIG. 1

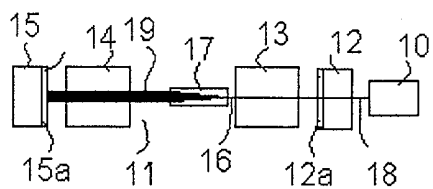


FIG.2a

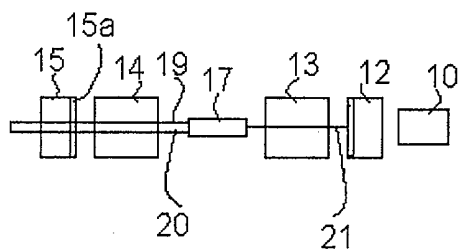
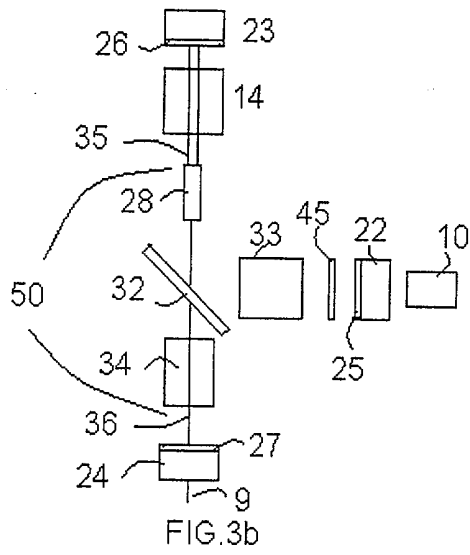
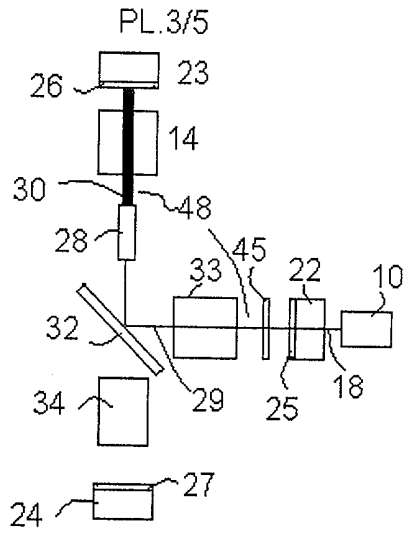


FIG.2b



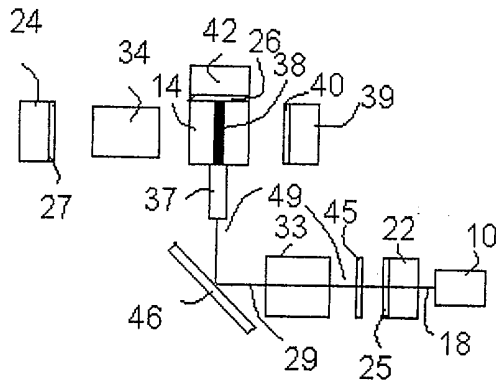


FIG. 4a

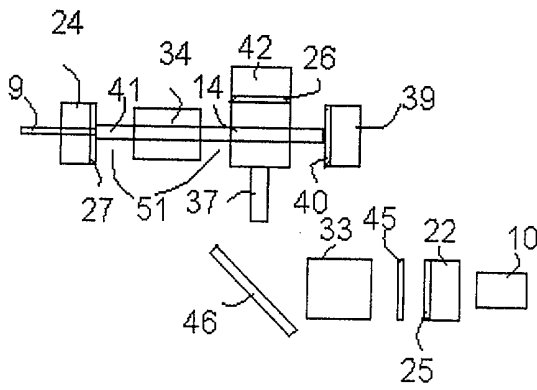


FIG. 4b

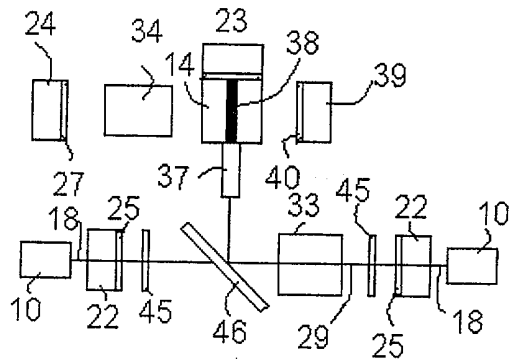


FIG. 4c

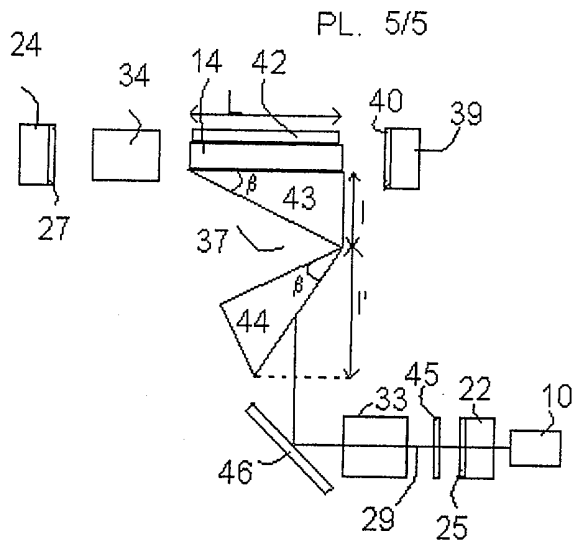


FIG 5

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	BAER T: "LARGE-AMPLITUDE FLUCTUATIONS DUE TO LONGITUDINAL MODE COUPLING IN DIODE-PUMPED INTRACAVITY-DOUBLED ND:YAG LASERS" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 3, no. 9, 1 septembre 1986 (1986-09-01), pages 1175-1180, XP000653558 ISSN: 0740-3224	3-11	
X	* page 1175 - page 1176; figure 1 * * le document en entier *	1,2	
X	----- US 6 002 695 A (SINOFSKY ED ET AL) 14 décembre 1999 (1999-12-14) * colonne 3 - colonne 4; figures 2,3 *	1,2	
A	* le document en entier *	3-11	
A	----- HAMID HEMMATI ET AL: "HIGH REPETITION-RATE Q-SWITCHED AND INTRACAVITY DOUBLED DIODE-PUMPED ND:YAG LASER" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, IEEE INC. NEW YORK, US, vol. 28, no. 4, 1 avril 1992 (1992-04-01), pages 1018-1020, XP000272693 ISSN: 0018-9197 * le document en entier *	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
A,D	----- STONEMAN R C ET AL: "INTRACAVITY-PUMPED 2.09-UM HO:YAG LASER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 17, no. 10, 15 mai 1992 (1992-05-15), pages 736-738, XP000268716 ISSN: 0146-9592 * le document en entier *	1-11	H01S
	----- -/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
8 octobre 2004		Bésuelle, E	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	OKHOTNIKOV O G: "INTRACAVITY LASER DIODE PUMPED AND MODULATED ER3+-DOPED FIBER LASERS" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, IEEE INC. NEW YORK, US, vol. 30, no. 11, 1 novembre 1994 (1994-11-01), pages 2645-2652, XP000478015 ISSN: 0018-9197 * le document en entier * -----	1-11	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		8 octobre 2004	Bésuelle, E
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

1200721

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0400156 FA 650996**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **08-10-2004**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 6002695 A	14-12-1999	AU 3227097 A	05-01-1998
		DE 19781802 T0	15-07-1999
		GB 2356487 A ,B	23-05-2001
		GB 2331178 A ,B	12-05-1999
		JP 2001501776 T	06-02-2001
		WO 9745902 A1	04-12-1997
