

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 18.06.01.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 20.12.02 Bulletin 02/51.

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) : UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE — FR.

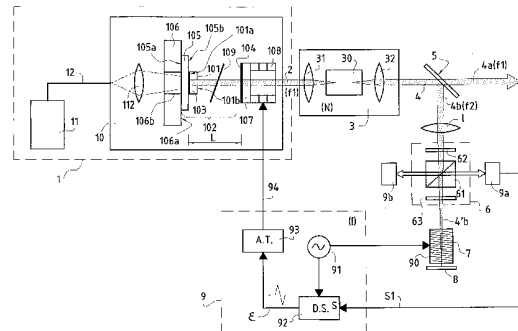
72 Inventeur(s) : ZEMMOURI JACUAD, RAZDOBREV IGOR et RINGOT JEAN.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : BEAU DE LOMENIE.

54 LASER SOLIDE A CAVITE PLAN/PLAN ET SOURCE LASER STABILISEE EN FREQUENCE METTANT EN OEUVRE LEDIT LASER SOLIDE.

57 Le laser solide (10) comporte une cavité (102) qui est délimitée par un miroir d'entrée (103) et un miroir de sortie (104), et à l'intérieur de laquelle est positionné un élément en matériau actif (101) destiné à être pompé optiquement. Le miroir d'entrée (103) est déposé sur l'une (101a) des faces de l'élément en matériau actif et forme avec le miroir de sortie (104) une cavité plan/plan (102). Le laser solide comprend des moyens de refroidissement de l'ensemble miroir d'entrée/élément en matériau actif, lesquels moyens de refroidissement permettent de rendre stable la cavité plan/plan.



**LASER SOLIDE A CAVITE PLAN/PLAN ET SOURCE LASER
STABILISEE EN FREQUENCE METTANT EN ŒUVRE LEDIT LASER
SOLIDE**

La présente invention concerne une nouvelle structure de laser solide.

5 Le laser solide de l'invention trouve notamment, mais non exclusivement, son application à la réalisation d'une source laser stabilisée en fréquence, et utilisable en particulier comme étalon dans le domaine des télécommunications.

Dans le présent texte, on désigne par laser solide, tout laser
10 destiné à être pompé optiquement et comportant une cavité de pompage à l'intérieur de laquelle est positionnée un élément en matériau actif, cristallin ou amorphe, dopé, et permettant l'émission d'un rayonnement laser, lorsqu'il est soumis à un faisceau de pompe. La cavité de pompe est délimitée par deux miroirs : un premier miroir
15 désigné dans la suite du présent texte « miroir d'entrée » (et encore communément appelé miroir de pompe), à travers lequel s'effectue le pompage de l'élément en matériau actif ; un second miroir désigné dans la suite du présent texte « miroir de sortie », et qui permet la transmission du faisceau laser produit dans la cavité par l'élément en
20 matériau actif. Pour de plus amples explications sur la structure et le fonctionnement des lasers solides connus à ce jour, on peut notamment se référer au chapitre 7.3.1 intitulé « solid state lasers » du livre intitulé «Lasers Theory and Practise », par les auteurs John Hawkes et Ian Latimer, et édité par Prentice Hall International Ltd.

25 La présente invention a pour objectif principal de proposer un nouveau laser solide qui permet l'émission d'un rayonnement en régime monomode transverse et monomode longitudinal, avec une très bonne qualité transverse, et qui présente un faible encombrement.

30 Le laser solide de l'invention est connu dans l'art antérieur en ce qu'il comporte une cavité qui est délimitée par un miroir d'entrée et

un miroir de sortie, et à l'intérieur de laquelle est positionné un élément en matériau actif destiné à être pompé optiquement.

De manière caractéristique selon l'invention, le miroir d'entrée est déposé sur l'une des faces de l'élément en matériau actif et forme
5 avec le miroir de sortie une cavité plan/plan ; le laser solide comprend des moyens de refroidissement de l'ensemble miroir d'entrée/ élément en matériau actif, lesquels moyens de refroidissement permettent de rendre stable la cavité plan/plan.

Selon l'invention, le miroir d'entrée étant déposé directement
10 sur l'élément en matériau actif, on réduit avantageusement la taille du laser solide. Egalement, la mise en œuvre d'une cavité plan/plan (miroir d'entrée plan et miroir de sortie plan) permet d'améliorer la qualité transverse du rayonnement en sortie du laser solide, comparativement à une cavité de type hémisphérique généralement
15 mise en œuvre dans ce type de laser. Enfin, il convient de souligner qu'en fonctionnement du laser, le pompage de l'élément en matériau actif se traduit par une forte création de chaleur dans ledit élément, ce qui, en l'absence de tout moyen de refroidissement, se traduit notamment par une déformation et une dilatation de l'ensemble
20 miroir d'entrée / élément en matériau actif, qui devient assimilable à une lentille (effet de lentille thermique). Sachant que dans le laser solide de l'invention, le miroir de sortie est plan, il n'est pas envisageable, en l'absence de tout moyen de refroidissement, de concevoir un laser dont la cavité plan/plan est stable et de faible
25 dimension. Dans le laser solide de l'invention, les moyens de refroidissement de l'ensemble miroir d'entrée / élément en matériau actif ont ainsi pour fonction principale de rendre stable la cavité plan/plan du laser.

L'invention a également pour objet une source laser stabilisée
30 en fréquence. Cette source laser comprend un laser solide qui est conforme à l'invention et qui comporte en outre des moyens de

réglage de la longueur (L) de sa cavité ; la source comprend également des moyens d'asservissement (9) de la fréquence d'émission (f1) du laser solide qui commandent lesdits moyens de réglage.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention
5 apparaîtront plus clairement à la lecture de la description ci-après de deux variantes de réalisation de l'invention, laquelle description est donnée à titre d'exemple non limitatif, et en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique d'une première
10 variante de réalisation d'une source laser de l'invention,
- la figure 2 est une présentation schématique d'une seconde variante de réalisation d'une source laser de l'invention,
- la figure 3 représente les niveaux d'énergie des deux isotopes (85) et (87) du Rubidium (Rb),
- 15 - la figure 4 représente schématiquement une courbe théorique de l'intensité du faisceau ayant traversé la cellule d'absorption après un unique passage (absorption simple), dans l'hypothèse purement théorique où il n'y aurait pas d'élargissement du pic d'absorption par effet Doppler.
- 20 - la figure 5 représente schématiquement la courbe réelle de l'intensité du faisceau ayant traversé la cellule d'absorption après un unique passage (absorption simple), avec élargissement du pic d'absorption par effet Doppler,
- la figure 6 représente schématiquement la courbe réelle de
25 l'intensité du faisceau traversant la cellule d'absorption, après deux passages successifs et avec saturation de la transition atomique utilisée pour l'asservissement.

En référence à la figure 1, et conformément à une première variante de réalisation de l'invention, la source laser comprend :

- 30 - un ensemble 1 qui est formée par un laser solide miniature 10 polarisé, pompé optiquement par une diode de pompe 11 via une

- fibres optiques courtes 12, et qui délivre en sortie un premier faisceau laser 2 de fréquence (f1) ;
- un générateur 3 de N^{ième} harmonique, qui permet de générer, à partir dudit premier faisceau laser 2, un faisceau lumineux 4 composé d'un second faisceau laser 4a de même fréquence (f1) et d'un faisceau lumineux 4b, dit N^{ième} harmonique, dont la fréquence (f2) est égale à (N) fois la fréquence (f1) du faisceau laser 2 (N étant un entier supérieur ou égal à 2) ;
 - une cellule d'absorption 7 contenant un élément chimique d'absorption, qui dans l'exemple particulier décrit ci-après est un gaz (ou une vapeur) de Rubidium (Rb) ;
 - un miroir dichroïque 5 (ou tout autre moyen optique équivalent connu remplissant la même fonction) qui d'une manière générale a pour fonction de séparer les faisceaux précités 4a et 4b, en laissant passer le second faisceau laser 4a de fréquence (f1) pour former le faisceau laser de sortie, et en déviant le faisceau lumineux 4b (N^{ième} harmonique) pour le diriger vers la cellule d'absorption 7 en sorte de le faire passer à travers l'élément chimique d'absorption de cette cellule 7 ;
 - des moyens 6 de polarisation du faisceau laser, interposés entre la cellule d'absorption 7 et le miroir dichroïque 5 ;
 - une lentille de focalisation (L) interposée entre le miroir dichroïque 5 et les moyens de polarisation 6 ; cette lentille (L) permet de réduire la taille du faisceau 4b et par là-même d'augmenter sa densité de puissance ; l'utilisation de cette lentille n'est pas nécessaire lorsque le faisceau 4b présente une puissance suffisante ;
 - un miroir 8 (ou tout autre moyen optique réfléchissant équivalent remplissant la même fonction) qui a pour fonction de retourner (déflexion à 180°) le faisceau lumineux 4''b issu de la cellule d'absorption 7 en direction de ladite cellule d'absorption, en sorte

de lui faire traverser la cellule d'absorption, une seconde fois et selon le même chemin optique, ce qui permet un fonctionnement en absorption saturée ;

- et des moyens d'asservissement 9 qui sont conçus pour asservir de manière précise la fréquence (f_1) du premier faisceau 2 sur une transition de l'élément chimique d'absorption (Rubidium).

Selon une caractéristique essentielle de l'invention, le laser solide 10 et le générateur 3 sont conçus de telle sorte que la puissance de la $N^{\text{ième}}$ harmonique en sortie du générateur 3 est suffisante pour obtenir une saturation de ladite transition de l'élément chimique d'absorption, c'est-à-dire une saturation de l'absorption du Rubidium dans le cas de l'exemple particulier qui va à présent être détaillé.

Ensemble 1 : Laser solide 10 / fibre optique 11 / diode de pompe 12

Le laser solide 10 comprend un élément en matériau actif 101 destiné à être pompé optiquement, et se présentant plus particulièrement sous la forme d'un barreau de verre de très faible épaisseur (1mm environ / dimension selon la longueur de la cavité), qui est co-dopé en Ytterbium et Erbium. L'ion Erbium inséré dans une matrice vitreuse permet, par pompage optique à une longueur d'onde de pompe (λ_p) de l'ordre de 975nm, une émission laser par le barreau de verre 101 à une longueur d'onde (λ) comprise dans la bande spectrale 1,5 μ m et 1,6 μ m.

L'invention n'est toutefois pas limitée à l'utilisation d'un barreau de verre co-dopé Ytterbium et Erbium, le laser solide pouvant d'une manière plus générale être réalisé à partir d'un élément en matériau actif dopé. Il pourrait notamment s'agir d'un cristal (au lieu d'une matrice vitreuse), pouvant plus particulièrement être semi-conducteur.

Le barreau 101 est positionné dans une cavité laser 102 formant un interféromètre de Fabry-Perrot. Ce barreau 101 comporte deux faces planes opposées 101a et 101b, qui sont parallèles et orientées

perpendiculairement à l'axe longitudinal de la cavité 101. La cavité 102 est délimitée par deux miroirs 103, 104. Selon une caractéristique préférentielle, le miroir d'entrée est un miroir dichroïque. En outre pour réduire l'encombrement, ce miroir d'entrée 103 est déposé
5 directement sur la face 101_a du barreau 101, et forme un miroir plan.

A l'opposé du miroir d'entrée 103, le miroir de sortie 104 est un miroir plan, de telle sorte que la cavité 102 est une cavité de type plan/plan. La longueur L de cette cavité 102, qui correspond à la distance entre les deux miroirs 103 et 104 selon l'axe optique
10 longitudinal de la cavité, est réglable de manière fine, en sorte de régler la longueur de la cavité, et par là-même de permettre un réglage fin de la fréquence d'émission (f_1) du laser solide 1. Ce réglage fin est obtenu au moyen d'une cale piézo-électrique 108 sur laquelle est monté le miroir de sortie 104, de préférence (mais non
15 nécessairement) par l'intermédiaire d'un élément coupleur 107 (par exemple substrat en verre), et en agissant sur la tension de commande la cale piézoélectrique 108. Cette tension de commande est contrôlée automatiquement, par une boucle de rétroaction qui est décrite ultérieurement, et qui d'une manière générale permet un
20 asservissement de la longueur d'onde d'émission λ_1 ($\lambda_1 = c/f_1$, c étant la vitesse de la lumière) du laser solide 10, sur une transition (désignée ci-après d'une manière générale transition (T)) de l'élément chimique d'absorption de la cellule 7, lequel élément chimique est choisi de telle sorte que cette longueur d'onde d'émission λ_1 est stabilisée autour de
25 1,56 μ m.

L'utilisation d'une cavité 102 de type plan/plan et de faible longueur permet avantageusement d'obtenir en sortie du laser solide 10 un rayonnement en régimes monomode transverse et longitudinal, de très bonne qualité.

30 L'ensemble miroir d'entrée 103/barreau 101 forme la face d'entrée de la cavité 102, et est monté pour son refroidissement, sur

une première face 105_a d'une fenêtre en saphir 105. La fenêtre en saphir 105, qui est en contact avec le miroir d'entrée 103, a pour fonction de dissiper l'énergie thermique accumulée par le barreau de verre 101 lors du fonctionnement du laser solide 10. Cette fenêtre en saphir pourrait être remplacée dans une autre variante par tout élément dans un matériau, qui est transparent pour le faisceau de pompe de la diode de pompe 11, et qui présente un coefficient de conductivité thermique supérieur à celui du barreau 101 en sorte de dissiper l'énergie thermique engendrée dans ce barreau 101 en cours de pompage. Plus le coefficient de conductivité thermique de la fenêtre 105 est élevé, meilleur est le refroidissement du barreau 101. A titre d'exemple, dans une autre variante mettant en œuvre un barreau 101 en verre, et une longueur d'onde de pompe d'environ 975nm, on pourrait remplacer la fenêtre en saphir, par une fenêtre en AlN.

La fenêtre en saphir est montée sur l'une 106_a des faces d'un radiateur 106, présentant en son centre une ouverture traversante 106_b, qui permet le passage du faisceau de pompe jusqu'à l'ensemble fenêtre en saphir 105/ miroir 103/barreau 101, la seconde face 105_b de la fenêtre 105 venant fermer cette ouverture 106_b. Ce radiateur 106, qui est en contact avec la fenêtre 105, a pour fonction d'évacuer vers l'extérieur l'énergie thermique qui est absorbée par la fenêtre en saphir 105 en cours de pompage, et présente à cet effet une surface de dissipation importante (comparativement à la surface de la fenêtre 105). Ce radiateur 106 est par exemple en cuivre ou en aluminium. Il pourrait également s'agir d'un élément Peltier permettant d'absorber activement l'énergie thermique de la fenêtre 105.

La mise en œuvre en combinaison du radiateur 106 et de la fenêtre 105 permet avantageusement de rendre stable la cavité plan/plan 102, par un refroidissement efficace de l'ensemble miroir d'entrée 103/ barreau de verre 101. En effet, en l'absence de refroidissement de l'ensemble le miroir d'entrée 103/ barreau 101, ou

si le refroidissement de cet ensemble n'est pas assez efficace, en cours de fonctionnement du laser, sous l'action du faisceau de pompe, il se produit une déformation et une dilatation de l'ensemble miroir d'entrée 103/ barreau 101, lequel ensemble devient assimilable à une
5 lentille (effet de lentille thermique). Cette lentille associée à un miroir de sortie plan 104 forme dans ce cas une cavité instable, ce qui rend le laser inopérant. De plus, un refroidissement inefficace peut aboutir à une destruction du barreau 101.

En amont de l'ensemble radiateur 106/fenêtre en saphir 105/
10 miroir d'entrée 103/barreau de verre 101 est montée une lentille de focalisation 112, qui est centrée sur l'axe optique de la cavité.

Le laser solide 1 comprend également de manière usuelle un étalon rotatif 109 (lame mince), qui est positionné dans la cavité 102, en étant centré sur l'axe optique de cette cavité, et qui permet un
15 premier réglage grossier de la fréquence d'émission du laser solide 10, par un réglage de la position angulaire initiale de l'étalon 109.

Pour stabiliser la polarisation du rayonnement en sortie du laser solide 10, lorsque le matériau actif (barreau 101) est isotrope, tel que le verre co-dopé Ytterbium/Erbium, l'étalon 109 est réalisé dans un
20 matériau à pouvoir polarisant, tel que par exemple le matériau commercialisé sous la marque déposée « POLARCOR ». En revanche, si le matériau actif est anisotrope, l'étalon 109 peut être réalisé dans un matériau isotrope, tel que par exemple le verre.

La diode de pompe 11 permet un pompage optique du laser
25 solide à travers le miroir d'entrée 103. Dans un exemple particulier de réalisation, on utilise une diode laser multimodes de puissance inférieure à 1W. Plus particulièrement, pour le pompage du verre co-dopé Ytterbium/Erbium 101, on utilise par exemple une diode à semi-conducteur GaInAsP qui permet d'obtenir une longueur d'onde de
30 pompe (λ_p) de l'ordre de 975nm .

L'utilisation d'un milieu actif réalisé au moyen d'un verre (ou

cristal) co-dopé en Ytterbium et Erbium, combinée avec un refroidissement de ce milieu actif par la face d'entrée (miroir dichroïque 103 associé à la fenêtre 105 et au radiateur de dissipation 106) et avec l'utilisation d'une cavité 102 de type plan/plan permet
5 avantageusement d'obtenir, à faible coût, un laser solide 10 qui présente un encombrement faible et qui est capable d'émettre en sortie un faisceau laser 2 de longueur d'onde λ_1 ($\lambda_1 = c/f_1$) réglée à $1,56\mu\text{m}$, et présentant une puissance suffisante en régimes monomode transverse et monomode longitudinal.

10 Générateur (3) d'harmonique

Le générateur 3 comprend deux lentilles de focalisation 31 et 32 entre lesquelles est placé un cristal non linéaire 30 à base de cristaux (PP : KTiOPO_4) permettant d'obtenir un quasi-accord de phase. D'une manière générale, ce cristal (PP : KTiOPO_4) pourrait être remplacé par
15 tout cristal connu équivalent remplissant la même fonction, et par exemple par un cristal à base de KNbO_3 . Le générateur 3 permet à partir du premier faisceau 2 en entrée de générer en sortie une seconde harmonique ($N=2$) dont la fréquence (f_2) est le double de la fréquence du premier faisceau 2, laquelle seconde harmonique est
20 déviée par le miroir dichroïque 5 en direction de la cellule d'absorption 7 (faisceau 4b). L'utilisation d'un cristal 30 de type (PP :KTP) permet avantageusement d'obtenir une puissance de seconde harmonique plus importante comparativement par exemple à l'utilisation d'un monocristal de type KNbO_3 .

25 Moyens de polarisation 6 et Cellule d'absorption 7

Les moyens de polarisation 6 comportent successivement et alignés selon le même axe optique : une lame demi-onde 62, un cube polariseur 61, et une lame quart-d'onde 63. En fonctionnement, le faisceau entrant 4b de fréquence (f_2) correspondant à la seconde
30 harmonique générée par le cristal 30 est envoyé sur le cube polariseur 61. La lame demi-onde 62 permet de diriger une très faible partie de

la puissance de ce faisceau entrant $4b$ en direction d'une première photodiode $9a$. L'essentiel de la puissance de ce faisceau entrant $4b$ traverse une première fois le cube polariseur 61, puis passe par la lame quart-d'onde 63. Cette lame rend circulaire (droite ou gauche) la polarisation du faisceau issu du cube polariseur 61. Le faisceau $4b$ polarisé circulairement traverse la cellule d'absorption 7, est réfléchi à 180° par le miroir 8, puis retransverse, en sens inverse, successivement la cellule d'absorption 7 et la lame quart d'onde 63. Du fait de sa polarisation circulaire, ce faisceau retour est réfléchi par le cube polariseur 61 en direction d'une seconde photodiode $9b$, positionnée à l'opposée de la première photodiode $9a$.

Asservissement par absorption saturée

La figure 3 représente les niveaux d'énergie du Rubidium (Rb) 85 et 87. Pour réaliser l'asservissement de la fréquence (f_1) du faisceau laser (2) on utilise par exemple comme transition (T), la transition D_2 ($5S_{1/2}/F=2 \rightarrow 5P_{3/2}/F=3$) du Rubidium (Rb) à $0,7801\mu\text{m}$. Cette transition D_2 couple les niveaux $5S_{1/2}$ (niveau fondamental) et $5P_{3/2}$ (niveau excité, durée de vie $0,15\mu\text{s}$) qui possèdent avantageusement une structure fine. D'autres transitions atomiques du Rubidium pourraient également être utilisées pour réaliser l'asservissement.

Lorsque la pulsation (ω_l) du faisceau $4b$ traversant la cellule 7 de Rubidium est proche de la pulsation (ω_0) de la transition atomique (T) choisie, l'atome absorbe une partie de l'intensité du faisceau $4b$ (voir figure 4). Cette absorption d'énergie est importante lorsque la fréquence du faisceau $4b$ n'est pas éloignée de plus d'une fois la largeur du niveau excité. Le déplacement des atomes du gaz de Rubidium provoque cependant, par effet Doppler, un élargissement de la largeur de la transition (T). Ainsi en cas d'absorption simple (faisceau $4b$ traversant une seule fois la cellule d'absorption 7), on obtient en réalité une courbe d'absorption du type de celle de la figure 5. Ainsi, en cas d'absorption simple le pic d'absorption (figure 5)

est en pratique trop large pour permettre un asservissement qui soit suffisamment précis à quelques MHz près.

L'absorption saturée permet de pallier au problème précité d'élargissement du pic d'absorption par effet Doppler. En effet, le faisceau retour, qui est renvoyé par le miroir 8 dans l'exemple de la figure 1, en retraversant la cellule d'absorption 7, permet de réaliser une inversion de population, ce qui rend le milieu (gaz Rb) transparent pour les atomes de vitesse nulle. Dans ce cas, si l'intensité du faisceau 4b est suffisante pour saturer la transition (T), le signal électrique, en fonction de la fréquence du laser, renvoyé par la photodiode 9b présente l'allure donnée sur la figure 6. On comprend ainsi que l'asservissement peut être ainsi avantageusement nettement plus précis qu'en cas d'absorption simple.

On comprend à la lumière de l'explication ci-dessus, que pour obtenir un fonctionnement en absorption saturée, il est essentiel que la puissance de la Nième harmonique (seconde harmonique / faisceau 4b dans l'exemple de la figure 1) qui est utilisée pour l'asservissement soit suffisante pour saturer la transition choisie et obtenir sur le photodétecteur 9b un signal conforme à la figure 6.

20 Moyens d'asservissement 9 / modulation de la transition atomique

Dans l'exemple particulier de la figure 1 les moyens d'asservissement 9 permettent de réaliser l'asservissement de la fréquence du faisceau laser 2 par détection synchrone, grâce à une modulation de la transition atomique (T).

25 Ces moyens d'asservissement 9 comportent un solénoïde 90 qui entoure la cellule d'absorption 7, et une boucle de rétroaction (I). Cette boucle de rétroaction (I) comprend essentiellement un générateur de tension sinusoïdale 91, un module de détection synchrone 92, et un amplificateur de tension 93.

30 Le générateur de tension sinusoïdale 91 permet d'alimenter le solénoïde 90 avec une tension sinusoïdale de fréquence f donnée de

l'ordre par exemple de quelques centaines de KHz. En fonctionnement, la cellule d'absorption est ainsi soumise à un champ magnétique modulé en amplitude, créé par le solénoïde 90. Ce champ magnétique modulé permet de déplacer les sous-niveaux Zeeman de la transition (T) (par exemple la transition atomique D_2 dans le cas du Rubidium). Ce déplacement est dans une large mesure proportionnel notamment à la valeur du champ magnétique créé. Il en résulte que le signal d'absorption S1 (délivré par le photodétecteur 9a) est modulé en permanence en fréquence sur une très faible plage (typiquement pour déplacer les niveaux d'énergie sur quelques MHz).

Le signal d'absorption S1 est traité par le module de détection synchrone 92. Ce module 92 reçoit également en entrée la tension sinusoïdale délivrée par le générateur 91, et permet de manière usuelle d'extraire du signal d'absorption S1 un signal d'erreur (ϵ), sous la forme d'une tension continue dont la valeur est proportionnelle au décalage de fréquence entre la fréquence du faisceau 4b traversant la cellule d'absorption 7 et la fréquence de la transition (T) choisie. Le signal d'erreur (ϵ) est amplifié par un amplificateur de tension 93, qui délivre à destination de la cale piézoélectrique 108 un signal de commande 94 (tension continue). Ce signal de commande 94 permet d'ajuster en permanence et de manière fine la longueur de la cavité du laser solide (distance entre les miroirs d'entrée 103 et de sortie 104) et par là-même la fréquence d'émission f_1 du laser solide 10.

La source laser de l'invention dont une variante particulière de réalisation a été décrite en référence à la figure 1 permet avantageusement de réaliser un étalon en fréquence qui présente les caractéristiques et avantages suivants :

- émission d'un rayonnement monomode transverse (faisceau 4a), ce qui permet de faciliter le couplage de l'onde électromagnétique avec des fibres optiques et des guides d'ondes planaires,
- émission d'un rayonnement monomode longitudinal (faisceau 4a),

- ce qui permet d'obtenir une bonne finesse spectrale ,
- très bonne stabilité en fréquence et en puissance du faisceau de sortie 4a,
 - fréquence d'émission (f_1) connue de manière absolue, ce qui
- 5 permet d'utiliser le faisceau 4a dans des techniques de multiplexage/ démultiplexage actives,
- longueur d'onde d'émission (λ_1) stabilisée autour de $1,56\mu\text{m}$, ce qui permet son utilisation comme étalon de fréquence dans le domaine des télécommunications,
- 10 - source laser compacte et de faible encombrement, ce qui permet de l'insérer facilement dans des systèmes embarqués et dans des chaînes de traitement dans le domaine des télécommunication.

A titre indicatif, dans une réalisation conforme à l'exemple de la figure 1 qui vient d'être décrit, le laser solide 10 était conçu de telle

15 sorte que le faisceau laser 2 généré par ce laser solide était stabilisée autour de $1,56\mu\text{m}$ avec une précision de $\pm 10^{-8}$, et présentait une puissance de sortie (puissance du faisceau 4a) supérieure ou égale à 50mW en régimes monomode transverse et monomode longitudinal, cette puissance pouvant atteindre 100mW. La longueur L de la cavité

20 valait environ 5mm. Les longueur, largeur et hauteur du laser solide 10 valaient respectivement 50mm, 30mm et 30mm. Le faisceau laser 2 en sortie du laser solide 10 présentait une très bonne qualité transverse, et était de ce fait facile à coupler avec une fibre optique. En particulier, le paramètre M^2 qui définit la qualité transverse de ce

25 faisceau était inférieur à 1,1. La seconde harmonique (faisceau 4b) générée par le générateur 3 à partir de ce faisceau laser 2 présentait une puissance supérieure à $1\mu\text{W}$, ce qui était suffisant pour saturer la transition ($5S_{1/2}/F=2 \rightarrow 5P_{3/2}/F=3$) du Rubidium de la cellule d'absorption 7.

30 Variante de réalisation de la figure 2

La variante de réalisation de la figure 2 se différencie d'une

manière générale de la variante de la figure 1 par la mise en œuvre d'une détection synchrone basée non plus sur une modulation de la transition (T), mais sur une modulation de fréquence du faisceau 4b. Par soucis de simplification, sur cette figure 2, les éléments qui ont été
5 repris de la variante de la figure 1 ont été référencés de la même manière que sur la figure 1.

Dans la variante de la figure 2, pour réaliser la modulation de fréquence du faisceau 4b, les moyens d'asservissement comportent un élément acousto-optique 95 qui est intercalé entre le miroir 5 et les
10 moyens de polarisation 6 ; Dans l'exemple illustré, cet élément acousto-optique 95 est plus particulièrement intercalé entre la lentille de focalisation (l) et la lame demi-onde 62. Dans une autre variante, cet élément acousto-optique pourrait être intercalé entre le miroir 5 et la lentille de focalisation (l). Cet élément acousto-optique, en
15 fonction du signal alternatif de fréquence (f) qui lui appliqué en entrée, permet une modulation de fréquence du faisceau laser 4b. De manière similaire à la variante de la figure 1, on réalise ainsi une modulation du signal d'absorption (S1) délivré par le photodétecteur 9a, lequel signal est traité de la même manière par le module de
20 détection synchrone pour extraire le signal d'erreur (ϵ).

Dans une autre variante de réalisation, l'élément acousto-optique pourrait être remplacé par un électro-optique réalisant une modulation de phase sinusoïdale du faisceau 4b.

L'invention n'est pas limitée aux deux variantes de réalisation
25 qui ont été décrites à titre d'exemples en référence aux figures 1 et 2. En particulier, et de manière non exhaustive, en remplacement du Rubidium, on pourrait également utiliser tous les alcalins connus, et notamment le Potassium, Césium, Hydrogène, Sodium, Lithium,... Plus généralement, on peut utiliser tout élément ou composé chimique
30 présentant des raies d'absorption différenciées, et adapté à la mise en œuvre d'un asservissement selon la variante de la figure 1 (modulation

de la transition atomique), ou de la variante de la figure 2 (modulation du faisceau 4b). L'invention peut d'une manière plus générale être appliquée à la réalisation d'une source laser stabilisée autour d'une longueur d'onde (λ_1) quelconque prédéterminée, 5 pouvant être différente de la valeur $1,56\mu\text{m}$, qui est à ce jour spécifique du domaine des télécommunications. Dans le cadre de l'invention, la source laser pourra être réalisée au moyen d'un laser solide (« solid state laser ») pompé optiquement qui peut être différent du laser solide 10 particulier de la figure 1, c'est-à-dire d'une 10 manière plus générale au moyen d'un laser mettant en œuvre dans une cavité, un élément en matériau actif cristallin ou amorphe. Enfin, le laser solide 10 décrit en référence à la figure 1, à titre de variante préférée de réalisation étant nouveau en soi, il peut avantageusement être utilisé pour réaliser tout type de source laser, et son utilisation 15 n'est pas nécessairement limitée à la réalisation d'une source laser stabilisée en fréquence selon l'invention.

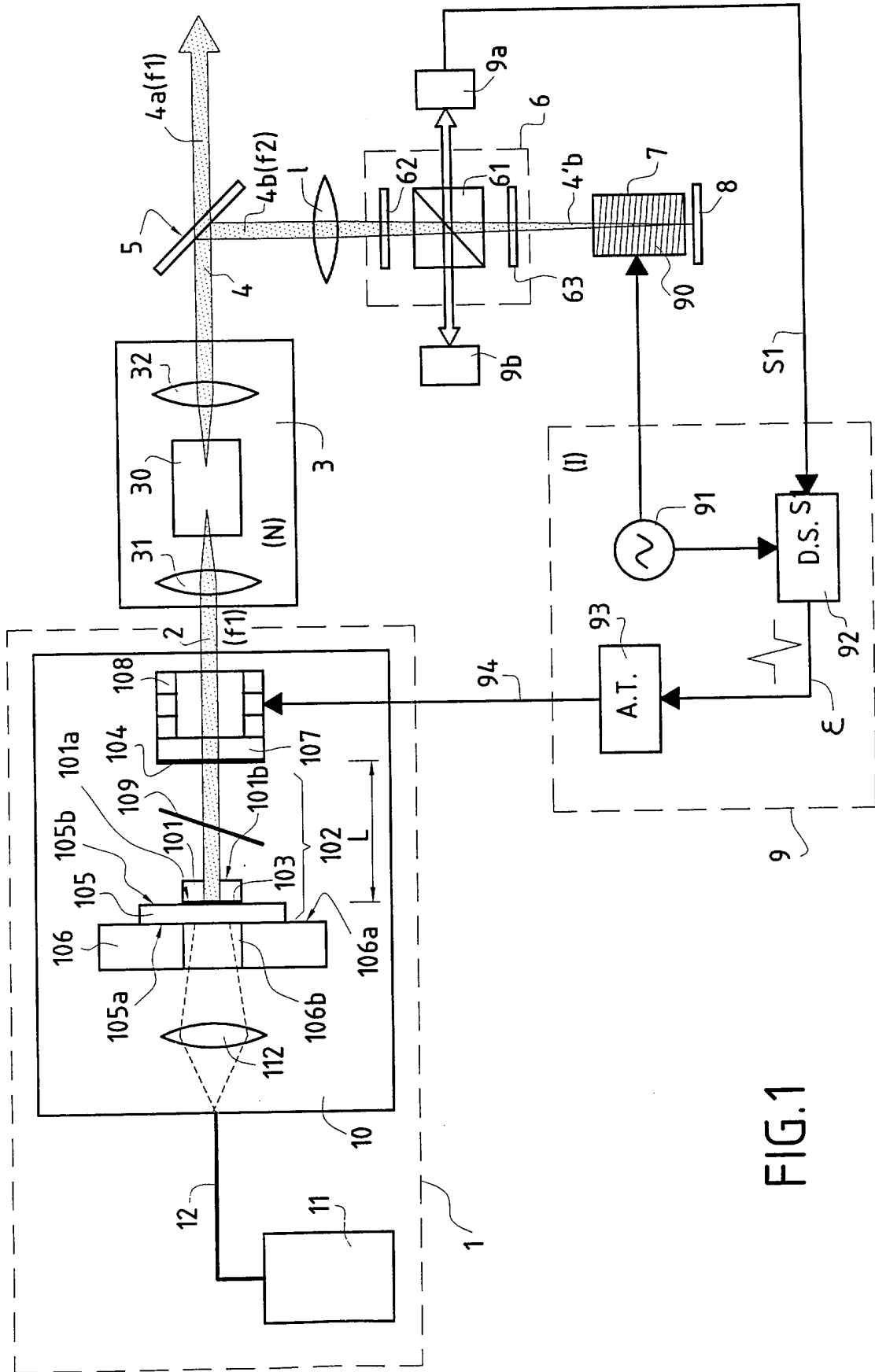
REVENDEICATIONS

1. Laser solide (10) comportant une cavité (102) qui est délimitée par un miroir d'entrée (103) et un miroir de sortie (104), et à l'intérieur de laquelle est positionné un élément en matériau actif (101) destiné à être pompé optiquement, caractérisé en ce que le miroir d'entrée (103) est déposé sur l'une (101a) des faces de l'élément en matériau actif et forme avec le miroir de sortie (104) une cavité plan/plan (102), et en ce qu'il comprend des moyens de refroidissement de l'ensemble miroir d'entrée/élément en matériau actif, lesquels moyens de refroidissement permettent de rendre stable la cavité plan/plan.
5
2. Laser solide selon la revendication 1 caractérisé en ce que les moyens de refroidissement comportent une fenêtre (105) qui est au contact du miroir d'entrée (103), et qui est réalisée dans un matériau transparent à la longueur d'onde de pompe, et présentant une conductivité thermique supérieure à la conductivité thermique de l'élément actif (101), en sorte de permettre un dissipation de l'énergie thermique engendrée dans l'élément en matériau actif (101) en cours de pompage.
10
3. Laser solide selon la revendication 2 caractérisé en ce que la fenêtre (105) est en saphir ou AlN.
15
4. Laser solide selon la revendication 2 ou 3 caractérisé en ce que les moyens de refroidissement comportent un radiateur (106), qui est au contact de la fenêtre (105) et qui permet d'évacuer vers l'extérieur l'énergie thermique absorbée par cette fenêtre (105) en cours de pompage.
20
5. Laser solide selon l'une des revendications 1 à 4 caractérisé en ce que l'élément en matériau actif (101) est un verre ou cristal co-dopé en ions Ytterbium/ Erbium.
25
6. Laser solide selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 caractérisé en ce qu'il est conçu pour émettre un rayonnement
30

en régimes monomode transverse et monomode longitudinal, avec une puissance supérieure ou égale à 50mW.

- 5 7. Laser solide selon l'une des revendications 1 à 6 caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (108) de réglage de la longueur (L) de la cavité (102).
8. Laser solide selon la revendication 7 caractérisé en ce que les moyens (108) de réglage de la longueur (L) de la cavité (102) comportent une cale piézoélectrique, le miroir de sortie (104) étant monté sur l'une des faces de ladite cale piézoélectrique.
- 10 9. Source laser stabilisée en fréquence caractérisée en ce qu'elle comporte un laser solide (10) visé à l'une des revendications 7 ou 8, et des moyens d'asservissement (9) de la fréquence d'émission (f_1) du laser solide qui commandent les moyens (108) de réglage de la longueur (L) de la cavité (102).
- 15 10. Source laser selon la revendication 9 caractérisée en ce qu'elle comprend en outre une cellule d'absorption (7) contenant un élément chimique d'absorption, et en ce que les moyens d'asservissement (9) permettant d'asservir sur une transition (T) de l'élément chimique d'absorption, la fréquence (f_1) du faisceau émis par le laser solide (10).
- 20 11. Source laser selon la revendication 10 caractérisée en ce que l'élément chimique d'absorption est choisi parmi le groupe : Rubidium, Potassium, Césium, Hydrogène, Sodium, Lithium.
- 25 12. Source laser selon la revendication 10 ou 11 caractérisée en ce qu'elle comprend en outre un générateur (3) qui permet de générer, à partir du faisceau laser (2) émis par le laser solide (10), un faisceau lumineux (4b), dit $N^{\text{ième}}$ harmonique, dont la fréquence est égale à (N) fois la fréquence (f_1) du faisceau laser (N entier supérieur ou égal à 2), et qui est prévu pour traverser
- 30 la cellule d'absorption (7).
13. Source laser selon la revendication 12 caractérisée en ce qu'elle

- comprend en outre des moyens de déflexion optique (8) qui ont pour fonction de faire passer la N^{ième} harmonique au moins deux fois de suite à travers la cellule d'absorption (7), en sorte de permettre un fonctionnement en absorption saturée, et en
- 5 ce que le laser solide (10) et le générateur de N^{ième} harmonique sont conçus de telle sorte que la puissance de la N^{ième} harmonique en sortie du générateur (3) est suffisante pour obtenir une saturation de ladite transition (T) de l'élément chimique d'absorption.
- 10 14. Source laser selon la revendication 13 caractérisée en ce que le générateur d'harmonique (3) comporte un cristal (30) non linéaire à base de cristaux (PP :KTP).
- 15 15. Source laser selon l'une des revendication 9 à 14 caractérisée en ce que les moyens d'asservissement (9) sont conçus pour délivrer un signal de commande (94) pour le réglage de la fréquence d'émission (f1) du laser solide (10), à partir d'une détection synchrone basée sur une modulation de la transition (T).
- 20 16. Source laser selon l'une des revendication 12 à 14 caractérisée en ce que les moyens d'asservissement (9) sont conçus pour délivrer un signal de commande (94) pour le réglage de la fréquence d'émission (f1) du laser solide (10), à partir d'une détection synchrone basée sur une modulation de la Nième harmonique (4b).
- 25 17. Source laser selon l'une des revendication 1 à 16 caractérisée en ce que la longueur d'onde (λ_1) du faisceau laser (2) émis par le laser solide (10) est stabilisée autour de 1,56 μ m.



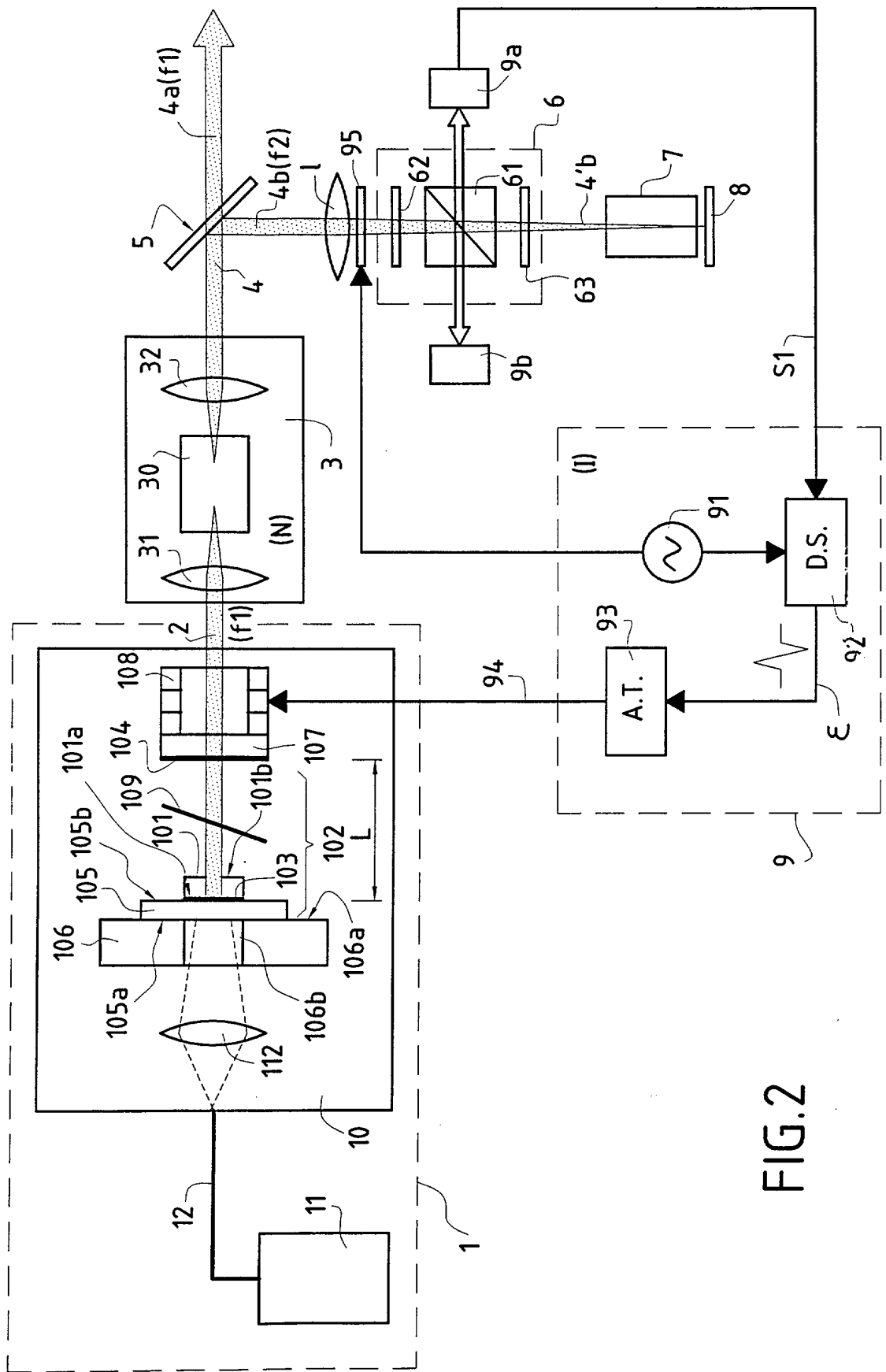


FIG. 2

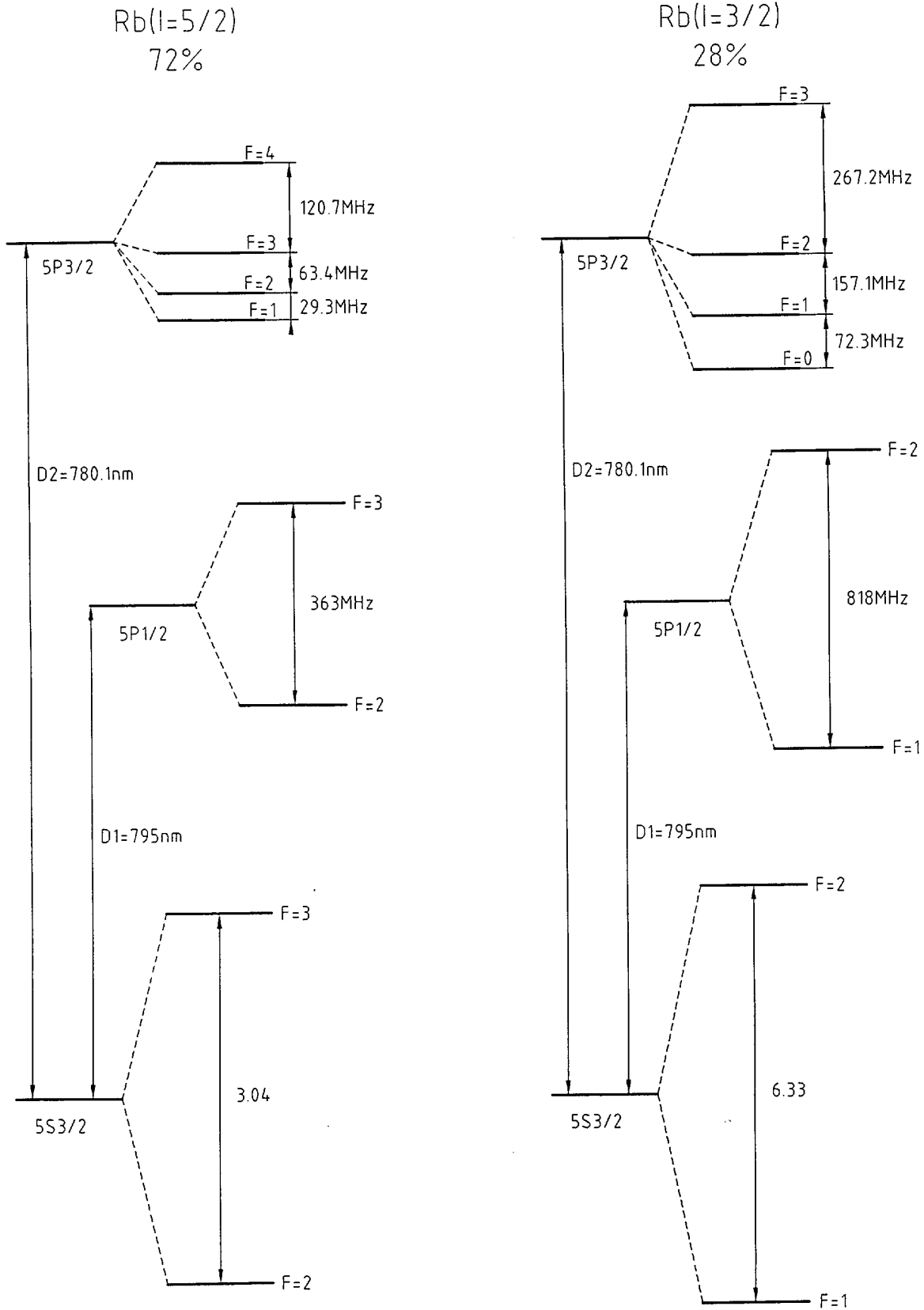


FIG.3

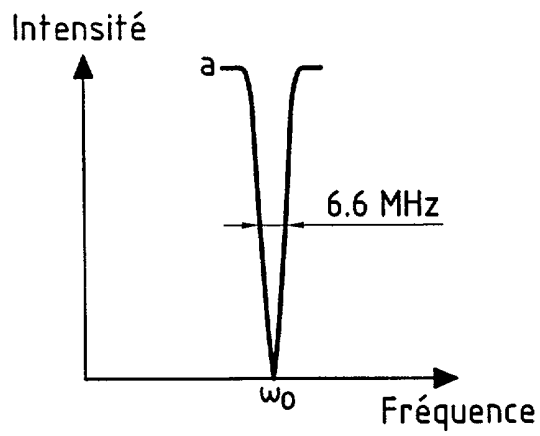


FIG.4

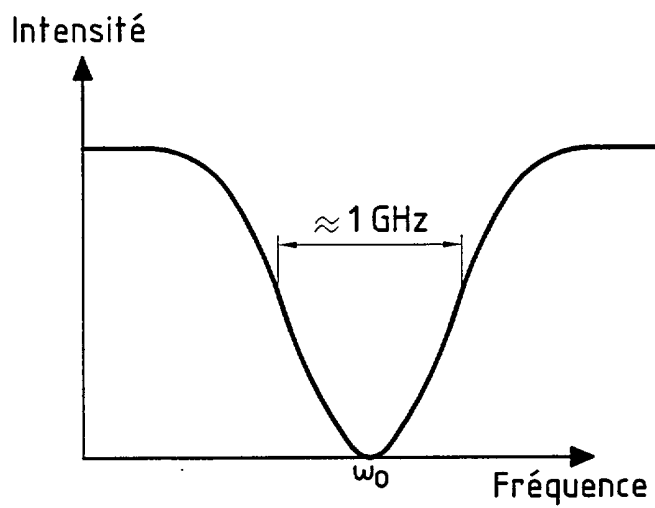


FIG.5

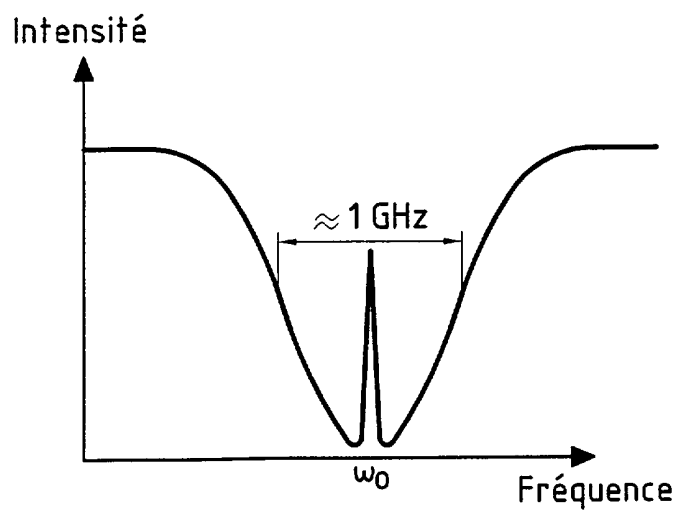


FIG.6



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 604992
FR 0107975

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		
X	ITOH T ET AL: "Q-SWITCHING AND MODE SELECTION OF COUPLED-CAVITY ER, YB:GLASS LASERS" JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, PUBLICATION OFFICE JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. TOKYO, JP, vol. 36, no. 2B, 15 février 1997 (1997-02-15), pages L206-L208, XP000733111 ISSN: 0021-4922	1,5-8	H01S3/137
Y	* page 1 *	2-4,9-17	
Y	DE 41 32 063 A (DEUTSCHE AEROSPACE) 8 avril 1993 (1993-04-08) * abrégé; figure 5 *	2-4	
Y	SVELTO C ET AL: "Frequency stabilization of a novel 1.5- mu m Er-Yb bulk laser to a /sup 39/K sub-Doppler line at 770.1 nm" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, APRIL 2001, IEEE, USA, vol. 37, no. 4, pages 505-510, XP002192406 ISSN: 0018-9197 * abrégé *	9-17	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			H01S
A	GB 2 324 645 A (PRECISION INSTR DEV CENTER NAT) 28 octobre 1998 (1998-10-28) * abrégé *	1	
A	US 5 063 568 A (CHIBA KAZUHARU ET AL) 5 novembre 1991 (1991-11-05) * abrégé *	1,9-17	
		-/--	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
7 mars 2002		Galanti, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS 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		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	

3
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 604992
FR 0107975

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	<p>VERED MAHAL ET AL: "QUASI-PHASE-MATCHED FREQUENCY DOUBLING IN A WAVEGUIDE OF A 1560-NM DIODE LASER AND LOCKING TO THE RUBIDIUM D2 ABSORPTION LINES" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 21, no. 16, 15 août 1996 (1996-08-15), pages 1217-1219, XP000623768 ISSN: 0146-9592 * abrégé; figure 1B *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1,9-17	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		7 mars 2002	Galanti, M
<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>	

3
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0107975 FA 604992**

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 d'07-03-2002
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
DE 4132063 A	08-04-1993	DE 4132063 A1	08-04-1993
GB 2324645 A	28-10-1998	DE 29708086 U1	03-07-1997
US 5063568 A	05-11-1991	CA 1303118 A1	09-06-1992
		DE 68912122 D1	17-02-1994
		DE 68912122 T2	01-06-1994
		EP 0411131 A1	06-02-1991
		WO 9003054 A1	22-03-1990
		JP 7028078 B	29-03-1995