

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

3 025 948

②1 N° d'enregistrement national : 14 02058

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : H 01 S 3/098 (2016.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 15.09.14.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 18.03.16 Bulletin 16/11.

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 :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : UNIVERSITE DE MONTPELLIER 2, SCIENCES ET TECHNIQUES — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) — FR.

⑦2 Inventeur(s) : GARNACHE-CREUILLOT ARNAUD, MYARA MIKHAEL, BLIN STEPHANE, SAGNES ISABELLE, BEAUDOIN GREGOIRE, SELLAHI MOHAMMED et PAQUET ROMAIN.

⑦3 Titulaire(s) : UNIVERSITE DE MONTPELLIER 2, SCIENCES ET TECHNIQUES, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS).

⑦4 Mandataire(s) : PONTET-ALLANO & ASSOCIES.

⑤4 DISPOSITIF LASER A CAVITE EXTERNE VERTICALE A EMISSION PAR LA SURFACE A DOUBLE FREQUENCE POUR LA GENERATION DE THZ ET PROCEDE DE GENERATION DE THZ.

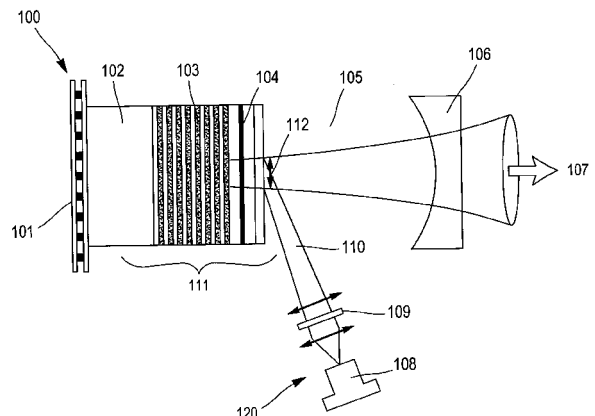
⑤7 Dispositif laser (100) de génération d'une onde optique (107) comprenant au moins deux fréquences, un tel dispositif laser (100) comprenant:

- un premier élément (111) comprenant une région de gain (104) située entre une première extrémité définie par un premier miroir (103) et une seconde extrémité définie par une région de sortie,

- un second miroir (106), distinct du premier élément (111), et agencé de façon à former avec le premier miroir (103) une cavité optique incluant la région de gain (104) et un espacement (105) entre la région de sortie et le second miroir (106),

- des moyens de pompage (120) de la région de gain (104) de façon à générer l'onde optique (107),

caractérisé en ce que le dispositif laser (100) comprend en outre des moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique (107) et agencés pour sélectionner au moins deux modes transverses de l'onde optique (107).



FR 3 025 948 - A1



« Dispositif laser à cavité externe verticale à émission par la surface à double fréquence pour la génération de THz et procédé de génération de THz »

5

### **Domaine de l'invention**

La présente invention concerne des dispositifs laser à cavité externe verticale à émission par la surface (VeCSEL pour « Vertical External Cavity Surface Emitting Laser »), et plus spécifiquement la génération de deux modes transverses stabilisés avec de tels dispositifs.

10 Le domaine de l'invention est, sans s'y limiter, celui des sources térahertz (THz) de laser à semi-conducteur ainsi que leurs applications.

### **Contexte de l'invention**

Les ondes THz couvrent le spectre électromagnétique compris entre les micro-ondes et l'infrarouge. Le domaine d'application est très large avec  
15 quelques applications prometteuses, comme par exemple en astronomie, dans les systèmes radars, en métrologie temps-fréquence, dans la détection et l'imagerie biomédicales, dans les communications sans fil à haut débit ou encore dans la sécurité. Il existe une grande variété de solutions pour l'émission THz, allant de l'optique à l'électronique, mais les solutions  
20 existantes sont souvent fastidieuses ou limitées en termes de puissance de sortie, de cohérence, d'accordabilité et/ou de modulation la bande passante : dans la gamme supérieure du spectre THz, les sources sont généralement de type pulsées et/ou requièrent un fonctionnement à basse température ; et dans la gamme inférieure du spectre THz, les sources électroniques  
25 fonctionnent habituellement facilement à température ambiante en continu et à une fréquence d'émission déterminée. De surcroît, des sources à fréquence multiples offrent une accordabilité accrue mais ne fournissent pas simultanément à la fois une puissance de sortie suffisante et une modulation de bande passante importante, mais aussi une bonne compacité  
30 ou un coût raisonnable.

- 2 -

Différentes techniques sont mises en œuvre pour générer des ondes THz, distinguables selon deux catégories :

- 5           - la première catégorie consiste en un couplage photonique d'une configuration à deux sources lasers et au travers de laquelle la différence de fréquence entre les deux sources est largement accordable. Par ailleurs, comme deux sources distinctes sont utilisées, cette première technique sera sensible aux effets de dérive de chacune des sources et la fréquence de battement n'est pas très stable ;
- 10          - la seconde catégorie consiste en un laser à deux modes : dans ce cas, la différence de fréquence est intrinsèquement plus stable car les deux modes seront sensibles à des effets communs et les effets de dérives seront homogènes sur chacun des deux modes.

15          De nombreuses tentatives bien connues pour parvenir à des sources laser térahertz double fréquences compactes, stables, continument accordables, cohérentes et puissantes ont déjà été proposées, mais aucune n'a pleinement rempli ces exigences.

20          L'une d'entre elle permet de réduire le couplage de mode et consiste en une séparation des faisceaux laser à l'intérieur d'une même cavité à deux axes. Elle présente des résultats très positifs en termes d'accordabilité et de cohérence. Toutefois, l'accordabilité se fait de manière incrémentale, la puissance de sortie est limitée à quelques milliwatts, la cavité est sophistiquée et comprend des éléments mobiles intracavité qu'il est presque impossible d'intégrer sur un seul dispositif, et la cohérence d'une telle  
25          source est dégradée.

30          Une autre technique consiste en une diode laser à cavités externes utilisant un (des) filtre(s) spectral (spectraux) qui peuvent produire deux fréquences stables, mais au détriment de la puissance de sortie, de cavités complexes , de la sensibilité/robustesse d'alignement dégradées, de la qualité de faisceau et de sa cohérence car le laser tend à exploiter deux jeux de modes longitudinaux plutôt que deux modes.

Les dispositifs laser à cavité externe verticale à émission par la surface (VeCSEL) sont des dispositifs bien connus et sont des solutions très prometteuses pour les lasers double fréquence car ils sont intrinsèquement compacts, flexibles en longueur d'onde, accordable sur un large spectre, puissants et hautement cohérents (spectralement, spatialement et également en termes de polarisation).

Le fonctionnement de laser double fréquence basé sur la coexistence de deux modes longitudinaux de génération de THz dans un VeCSEL a déjà été décrit dans *M. Wichmann et al. « Systematic investigation of single and multi-mode operation in vertical-external-cavity surface-emitting lasers » Proc. SPIE 89660N*, mais une telle conception ne permet pas le fonctionnement simultané des deux lignes laser.

Une autre démonstration de VeCSEL est décrite dans Gaya Baili et al., « *Experimental demonstration of a tunable dual-frequency semiconductor laser free of relaxation oscillations* », *Optics Letters, Vol. 34, Issue 21, pages 3421 à 3423 (2009)*. Elle traite de l'utilisation d'un VeCSEL dans la gamme du GHz et est basée sur un faisceau à double polarisation avec division de faisceau intracavité sur la puce amplificatrice.

Le but de la présente invention est de répondre aux problèmes mentionnés précédemment et de conduire par ailleurs à d'autres avantages.

Un objectif de l'invention consiste à générer un effet laser à deux modes transverses, stables et robustes/maîtrisés au sein d'une seule cavité.

Un autre objectif de la présente invention consiste à proposer des sources laser présentant une très haute stabilité (c'est-à-dire une haute cohérence ou un faible bruit de phase) de la fréquence de battement.

Un autre objectif de la présente invention consiste à proposer des sources laser adaptés pour des fonctionnements à haute puissance avec une bonne cohérence et une bonne stabilité.

Un autre objectif de l'invention consiste à proposer des sources laser disposant d'une accordabilité continue ou fine sur une large gamme de fréquences.

Un autre objectif de l'invention consiste à proposer des sources laser compactes fonctionnant à température ambiante en mode continu.

### Résumé de l'invention

On atteint ces objectifs grâce à un dispositif laser de génération d'une onde  
5 optique comprenant au moins deux fréquences, ledit dispositif laser comprenant :

- un premier élément comprenant une région de gain située entre une première extrémité définie par un premier miroir et une seconde extrémité définie par une région de sortie,
- 10 - un second miroir, distinct du premier élément, et agencé de façon à former avec le premier miroir une cavité optique incluant la région de gain et un espace libre entre la région de sortie et le second miroir,
- des moyens de pompage de la région de gain de façon à générer l'onde optique,

15 caractérisé en ce que le dispositif laser comprend en outre des moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique et agencés pour sélectionner au moins deux modes transverses de l'onde optique.

En variante, la région de gain (quelconque) peut être un élément distinct du  
20 second miroir.

D'une manière plus générale, le nombre de fréquences stabilisées émises par le laser selon l'invention correspond au nombre de modes transverses sélectionnés.

Dans certains modes de réalisation de l'invention, les moyens de  
25 pompage de la région de gain peuvent inclure des moyens optiques et électriques. Le premier élément peut être un élément semi-conducteur de type demi-VCSEL, ou tout autre type de laser dans lequel les modes transverses peuvent résonner à l'intérieur de la cavité. Le dispositif laser selon la présente invention tire profit des structures VCSEL en termes de  
30 puissance de sortie, stabilité et robustesse. De plus, l'utilisation d'un demi-

VCSEL permet d'utiliser le dispositif laser selon la présente invention à température ambiante et dans un mode continu, ce qui simplifie grandement son utilisation et le rend plus polyvalent. Les qualités optiques intrinsèques de la cavité sont très bonnes et conviennent tout particulièrement à de telles applications : les pertes optiques sont faibles et il n'y a pas d'émission spontanée amplifiée, ce qui conduit à une onde hautement cohérente. Enfin, il n'y a pas de comportement dynamique complexe et non linéaire ; et la fréquence peut être continuellement accordée sur une très large gamme de fréquences car il n'y a pas de couplage de gain et pas de couplage de mode dans la cavité. Ainsi, en ajoutant des moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase à l'intérieur de la cavité laser, il est possible de générer un laser double fréquence hautement cohérent et basé sur la stabilisation de deux modes transverses dans la cavité à axe unique de VCSEL.

Selon un autre mode de réalisation, les au moins deux modes transverses sélectionnés de l'onde optique selon la présente invention peuvent être choisis entre (i) les modes de Laguerre-Gauss stabilisés, et/ou (ii) les modes d'Hermite-Gauss stabilisés et/ou (iii) les modes de Bessel-Gauss stabilisés ou tout autre état d'émission laser : d'autres bases de mode transverses de la cavité (états propres de lumière) - ou modes instables de la cavité - peuvent être utilisés, à condition d'être générés simultanément.

Selon un autre mode de réalisation, les moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique peuvent comprendre des moyens de filtrage spatial de ladite onde optique.

Dans un mode de réalisation préféré, les moyens de filtrage spatial de l'onde optique peuvent être choisis entre (i) des moyens de diffraction de la lumière, (ii) des moyens de diffusion de la lumière et (iii) des moyens d'absorption de la lumière. Dans d'autres modes de réalisation de la présente invention, les moyens de filtrage spatial de l'onde optique peuvent être situés au niveau d'un ventre du champ longitudinal stationnaire à l'intérieur de la cavité.

Dans d'autres modes de réalisation, les moyens de diffraction de la lumière peuvent comprendre au moins un cristal photonique et/ou un réseau de

diffraction situé à au moins une extrémité de la région de gain ou sur le second miroir et être agencés pour mettre en forme la phase transversale et/ou l'intensité transversale de l'onde optique pour sélectionner les au moins deux modes transverses.

- 5 Dans d'autres modes de réalisation, les moyens d'absorption de la lumière peuvent comprendre au moins un masque, chaque masque étant agencé avec une surface ayant une absorbance non uniforme, ladite surface incluant au moins une zone d'absorption et/ou une zone de transmission afin de sélectionner au moins un mode transverse de l'onde optique parmi  
10 les au moins deux modes transverses.

Dans un mode de réalisation préféré, les moyens d'absorption de la lumière peuvent comprendre un seul masque, ledit masque étant agencé pour sélectionner les au moins deux modes transverses de l'onde optique.

- Comme cela sera décrit ci-après, les moyens d'absorption ou de diffraction  
15 de la lumière précédemment mentionnés peuvent être intégrés sur l'élément semi-conducteur. Ainsi, aucun alignement n'est nécessaire et aucun bruit mécanique ne peut être introduit par des vibrations. Ainsi, la présente invention permet de stabiliser des modes résonants à l'intérieur de la cavité en sélectionnant ces modes transverses isolés et en empêchant le  
20 couplage avec certains modes non souhaités : la source laser selon l'invention fournit une fréquence de battement très stable.

Dans un autre mode de réalisation préféré, l'épaisseur de chaque masque peut être de l'ordre de quelques nanomètres ou inférieur à la longueur d'onde.

- 25 Dans un autre mode de réalisation préféré, la zone d'absorption fournit une absorbance au moins deux fois plus élevée que l'absorbance de la zone de transmission. Dans certains autres modes de réalisation, les zones de transmission peuvent transmettre plus de 99 % de l'intensité lumineuse de l'onde, et les zones d'absorption peuvent absorber entre 5 % et 100 % de  
30 l'intensité lumineuse de l'onde.

Dans un autre mode de réalisation préféré, chaque masque peut être situé au niveau d'un ventre de l'onde optique à l'intérieur de la cavité, ou proche dudit ventre.

5 Dans un autre mode de réalisation, les moyens de pompage de la région de gain peuvent comprendre (i) un laser à pompe émettant un faisceau laser de pompage et (ii) des moyens agencés pour la mise en forme spatiale de l'intensité lumineuse du faisceau laser de pompage ; et les moyens de sélection d'au moins deux modes transverses de l'onde optique peuvent comprendre les moyens de mise en forme spatiale de l'intensité lumineuse  
10 du faisceau laser de pompage et peuvent être agencés pour projeter un motif d'intensité du faisceau de pompage sur la région de sortie du premier élément correspondant aux au moins deux modes transverses sélectionnés de l'onde optique.

15 Dans un autre mode de réalisation, le second miroir peut être un miroir concave ou un miroir à conjugaison de phase.

Dans un autre mode de réalisation, un filtre spectral peut être inséré à l'intérieur de la cavité, sur la surface de l'un des miroirs, ou dans l'espace libre.

20 Dans un mode de réalisation préféré, le dispositif laser selon l'invention peut comprendre en outre des moyens de syntonisation permettant de déplacer le second miroir de façon à changer la longueur de la cavité optique. Ainsi, il est possible d'ajuster la fréquence moyenne du laser en déplaçant le miroir externe. On pourra y parvenir à l'aide de tout moyen bien connu, tel que des actionneurs piézoélectriques par exemple, ou en  
25 ajustant la température du semi-conducteur grâce à un module de Pelletier situé au-dessus du substrat afin d'augmenter la température de manière homogène.

Dans un autre mode de réalisation, le dispositif laser selon l'invention peut comprendre en outre des moyens pour accorder la différence de fréquence  
30 entre les au moins deux modes de l'onde optique.

- 8 -

Dans un mode de réalisation préféré, les moyens de syntonisation de la différence de fréquence peuvent être des moyens de syntonisation thermique agencés pour établir un gradient thermique dans la direction transversale de l'élément semi-conducteur. La syntonisation thermique est un moyen très fin de changer la température de la cavité optique (c'est-à-dire la longueur du chemin optique) et ainsi, le présent mode de réalisation de l'invention permet d'obtenir des décalages de fréquence très fins : le dispositif laser selon l'invention est ainsi continuellement accordable.

Dans un autre mode de réalisation préféré, les moyens de syntonisation thermique peuvent comprendre l'un des composants suivants :

- au moins un élément conducteur thermique local monté transversalement sur l'élément semi-conducteur et agencé pour conduire ou dissiper la chaleur, et/ou
- des moyens de modulation de la puissance du laser de pompage afin de chauffer, et de préférence de chauffer localement :
  - la région de sortie de l'élément semi-conducteur, et/ou
  - les moyens de filtrage spatial, et/ou
- un faisceau de pompage mis en forme qui accentue/optimise le gradient thermique transverse aux deux faisceaux, avec un profil d'intensité du faisceau du laser de pompage de forme semblable à un pétale par exemple.

Selon un autre aspect de l'invention, il est proposé un procédé de génération d'une onde optique comprenant au moins deux fréquences et comprenant au moins l'une des étapes suivantes : (i) génération d'une onde optique à l'intérieur d'une région de gain, (ii) pompage de l'onde optique avec des moyens de pompage, (iii) mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique pour sélectionner au moins deux modes transverses de l'onde optique.

Dans un mode de réalisation préféré, l'étape de sélection des au moins deux modes transverses de l'onde optique peut consister en le filtrage spatial de l'intensité de l'onde optique.

Dans un autre mode de réalisation préféré, le procédé selon l'invention peut comprendre en outre une étape consistant à accorder la longueur de la cavité optique afin de décaler les au moins deux fréquences de l'onde optique.

- 5 Dans un autre mode de réalisation préféré, le procédé selon l'invention peut comprendre en outre une étape consistant à accorder la différence de fréquence entre les au moins deux modes.

Selon un autre aspect de la présente invention, il est proposé l'utilisation du dispositif laser selon l'invention pour les techniques de génération de THz  
10 par couplage photonique, dans laquelle les au moins deux modes choisis sont injectés dans un guide d'onde.

### Description des dessins

Les procédés et dispositifs selon les modes de réalisation de la présente invention seront mieux compris en référence aux dessins, donnés à  
15 uniquement des fins d'illustration et nullement limitatifs. D'autres aspects, buts et avantages de l'invention apparaîtront dans la description donnée ci-dessous.

- La FIGURE 1 décrit une vue schématique du laser double fréquence selon l'invention.
- 20 - La FIGURE 2 est un diagramme du profil transverse de température qui pourrait être mesuré à l'intérieur de l'élément semi-conducteur.
- La FIGURE 3 est une représentation schématique de la syntonisation thermique de l'élément semi-conducteur.
- La FIGURE 4 est une vue schématique des spectres de transmission  
25 optique pour un dispositif VeCSEL double fréquence.
- La FIGURE 5 est un exemple de fichier de masquage utilisé pour fabriquer des masques selon l'invention par lithographie à faisceaux d'électrons.
- La FIGURE 6 illustre des masques métalliques absorbant en chrome  
30 selon l'invention.

- 10 -

- La FIGURE 7 est une vue schématique d'un dispositif laser selon l'invention avec masque métallique absorbant situé sur l'élément semi-conducteur.
- 5 - La FIGURE 8 est une vue schématique d'un dispositif laser selon un deuxième mode de réalisation de l'invention avec deux masques métalliques absorbants séparés par un espaceur situé sur l'élément semi-conducteur.
- La FIGURE 9 est une vue de l'intensité en champ lointain du dispositif laser selon l'invention.
- 10 - La FIGURE 10 est le spectre optique mesuré du dispositif laser selon l'invention.
- La FIGURE 11 est un graphique illustrant la puissance de sortie du laser en fonction de la puissance de pompage optique.
- La FIGURE 12 est un dispositif laser selon l'invention avec un masque diffractif sur l'élément semi-conducteur.
- 15 - La FIGURE 13 illustre un autre design de masque diffractif.
- La FIGURE 14 illustre le spectre THz du VeCSEL de Laguerre-Gauss double fréquence par couplage photonique et l'évolution temporelle de son intensité de mode.
- 20 Alors que l'invention est décrite conjointement avec un certain nombre de modes de réalisation, il est évident que de nombreuses alternatives, modifications et variations apparaissent ou apparaîtraient à l'homme du métier dans les domaines applicables. En conséquence, la présente invention prétend englober tous les alternatives, modifications, équivalents
- 25 et variations qui entrent dans la portée et l'esprit de la présente invention.

### **Description détaillée de l'invention**

Ci-après, l'adjectif « longitudinal » se réfère à la direction qui correspond à celle de la propagation de l'onde optique 107 ou de l'axe de la cavité. L'adjectif « transversal » se réfère à une direction orthogonale à la direction

30 longitudinale.

Dans les descriptions suivantes, le premier élément 111 est considéré comme un élément semi-conducteur, sans limiter la présente invention.

Mode de réalisation général

5 En référence à la FIGURE 1, on décrit un mode de réalisation général de la présente invention. Ce mode permet d'obtenir des modules laser stables et compacts, fonctionnant à température ambiante, avec des modes transverses bi-fréquence robustes, stabilisés et accordables.

10 La présente invention est basée sur une technologie VeCSEL bien connue et intègre des fonctionnalités utilisant les technologies III-V ainsi qu'une cavité optique externe de type concave.

Typiquement, la technologie VeCSEL comprend un élément semi-conducteur avec une région de gain permettant de générer un rayonnement optique et un premier miroir 103. La région de gain peut comprendre par exemple des puits quantiques et elle peut être pompée électriquement ou optiquement.

15 Le premier miroir 103 peut comprendre une succession de couches constituant un réseau de Bragg qui réfléchit les ondes optiques 107. L'élément semi-conducteur est monté sur un dissipateur thermique à modules de Pelletier afin de stabiliser et de réguler la température.

20 Le tableau suivant illustre les couches constitutives du demi-VeCSEL dans un premier mode de réalisation :

<b>Description</b>	<b>Epaisseur A</b>
Couche de coiffe InGaP	350
GaAs	150
AlAs	300
GaAs	919
GaAsP	286
PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	479
GaAsP	286
PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	479
GaAsP	286

- 12 -

PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	1964
GaAsP	286
PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	1964
GaAsP	286
PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	3449
GaAsP	286
PQ InGaAs	80
GaAsP	286
GaAs	3952
AlAs	873
GaAs	733
AlAs	873
GaAs-N+	

De nombreuses autres configurations peuvent être développées, avec différents types de couches, de nombreux autres matériaux et d'autres largeurs. La présente invention entend couvrir toutes ces solutions.

5 Le miroir de Bragg a une haute réflectivité, supérieure de 99 % ou plus que celle du miroir de sortie ; par exemple, il peut être constitué de 27,5 paires de couches quart d'onde AlAs/GaAs.

10 La région de gain 104 est, par exemple, constituée de six puits quantiques InGaAs/GaAs(P) mécaniquement stables et situés au niveau du ventre du champ du laser intra-cavité. L'épaisseur optique totale de la région active comprise entre le réseau de Bragg et l'air est de 13/2 couches demi-onde.

Un tel élément semi-conducteur est fabriqué grâce à des technologies de fabrication de semi-conducteurs bien connues, telles que l'épitaxie par faisceau moléculaire (MBE pour « Molecular Beam Epitaxy »), la lithographie électronique, la gravure sèche et la gravure chimique.

15 Un second miroir externe de forme concave est prévu et agencé de façon à former une cavité optique externe avec le premier miroir 103 et à stabiliser certains modes transverses. Il faut noter que la présente invention peut

être apte à stabiliser les modes de Laguerre-Gauss et/ou les modes d'Hermite-Gauss et/ou les modes de Bessel-Gauss.

La cavité optique externe est qualifiée d' « externe » car elle comprend une partie qui est distincte de l'élément semi-conducteur. Elle ne nécessite  
5 aucun composant en sus à l'intérieur pour un fonctionnement nominal du laser. Préférentiellement, sa partie externe comprend de l'air, mais dans certains autres modes de réalisation, la cavité optique du dispositif laser 100 selon l'invention peut inclure un espaceur solide entre la région de sortie et le second miroir 106 afin de former une cavité monolithique. A titre  
10 d'exemple, une telle cavité monolithique pourrait être faite d'un monolithe de saphir ou de verre.

Dans un mode de réalisation préféré, la cavité externe a une symétrie axiale.

Le second miroir 106 peut être un miroir à base de verre diélectrique ou  
15 peut comporter des cristaux photoniques sur une surface semi-conductrice ou gravée. Sa transmittance est de quelques pourcents de façon à permettre au faisceau laser de sortir du dispositif. Typiquement, le second miroir externe est situé à 1 mm de l'élément semi-conducteur, et il a un rayon de courbure d'environ 10 mm. Dans l'exemple illustré sur la  
20 FIGURE 1, un espace libre 105 sépare le miroir externe de forme concave de l'élément semi-conducteur.

Ensuite, un pompage optique est utilisé pour exciter les électrons de basse énergie vers certains niveaux plus élevés, grâce à une diode laser mono-  
25 mode. A titre d'exemple, sa longueur d'onde peut être de 785 nm et la puissance de sortie de 300 mW. Le faisceau laser de pompage 110 est focalisé sur la surface demi-VeCSEL avec un diamètre de 50 à 100  $\mu\text{m}$ .

Le VeCSEL a été conçu afin de générer un état laser stable composé d'au moins deux modes transverses, chaque mode transverse fonctionnant sur un mode longitudinal unique avec un état de polarisation linéaire, et donc à  
30 une fréquence bien définie.

Les capacités de syntonisation du dispositif laser 100 selon l'invention sont détaillées ci-après.

La FIGURE 2 illustre le profil transverse de température 201 qui pourrait être mesuré à l'intérieur de l'élément semi-conducteur 111 et l'intensité de certains modes transverses de Laguerre-Gauss (LG) 202, 203 et 204. Le profil transverse de température est gaussien et les modes  $LG_{00}$  202,  $LG_{02}$  203 et  $LG_{03}$  204 sont représentés. La fréquence de battement entre les deux modes LG transverses repose sur un effet thermique, et plus précisément sur le gradient thermique radial 201 généré par le pompage optique : comme le faisceau de pompage est focalisé sur le demi-VCSEL avec un défaut de rendement quantique, un gradient thermique radial est alors généré.

Ainsi la longueur d'onde moyenne du spectre de gain du semi-conducteur est décalée de manière proportionnelle à ce gradient et selon un coefficient typiquement de 100 GHz/K. En conséquence, la différence de fréquence entre les modes transverses dépend de la distribution spatiale thermique (ou température modale) et le mode plus confiné présente la plus haute longueur d'onde de fonctionnement. La syntonisation du dispositif par la puissance de la pompe optique permet ainsi d'accorder la fréquence de battement dudit dispositif.

La FIGURE 3 est une représentation schématique de la syntonisation thermique sur l'élément semi-conducteur 111. Le faisceau laser de pompage 110 focalisé sur la surface de dessus 112 de l'élément semi-conducteur 111 induit un gradient thermique 301. Ainsi, l'indice de réfraction varie à l'intérieur de la cavité, et peut être différent entre deux chemins optiques axiaux (correspondant par exemple à deux modes).

Il est ainsi possible de générer plus qu'une seule fréquence 302, et il est aussi possible d'accorder la différence de fréquence entre les deux modes en modulant simplement la température de la région de gain 104. Comme la température peut être régulée de manière continue, le battement de fréquence peut ainsi être continument accordé par cette syntonisation thermique.

La syntonisation thermique peut être accomplie par tous moyens et toutes méthodes.

Dans un mode de réalisation préféré, la syntonisation thermique est assurée par le faisceau laser de pompage optique 110. En régulant la puissance du faisceau laser de pompage 110, on peut réguler la température à l'intérieur de l'élément semi-conducteur. Ainsi, il est possible de modifier localement la chaleur conduite à l'intérieur de l'élément semi-conducteur afin de réguler le gradient thermique.

Dans un autre mode de réalisation préféré, le pompage thermique peut être réalisé grâce à un dispositif de chauffage métallique local déposé sur la surface de l'élément semi-conducteur. Des couches minces métalliques sont placées transversalement afin de générer un gradient thermique lors du chauffage.

La FIGURE 4 illustre une vue schématique des spectres de transmission optique pour un dispositif VeCSEL double fréquence. En raison de leurs caractéristiques intrinsèques, les modes transverses ont des fréquences de résonance différentes qui sont situées dans des domaines de fréquence distincts 401, 402 et 403. Ainsi, comme illustré sur la FIGURE 4, le mode de  $N^{\text{ième}}$  ordre 401 est situé sur le côté gauche des spectres, alors que les ordres de  $N+1^{\text{ième}}$  et  $N+M^{\text{ième}}$  402, 403 sont situés sur le côté droit. Ainsi, pour chaque ordre, les modes transverses de Laguerre-Gauss existent dans un peigne de fréquences 411, 412, 413 qui est séparé de l'ordre suivant d'une distance correspondant à environ l'intervalle spectral libre 402 plus la différence de décalage de Gouy. Le passage entre ces peignes de fréquences peut être accompli en accordant la longueur de cavité. Néanmoins, ce type de syntonisation n'affecte pas la fréquence de battement.

Néanmoins, un tel fonctionnement n'est pas suffisant pour un fonctionnement stable à deux fréquences : un tel fonctionnement en modes transverses doit être robuste et stabilisé afin d'éviter des sauts de modes transverses et une sensibilité d'alignement. Pour y parvenir, la présente invention propose une solution originale et innovante qui consiste en des moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou de la phase de

- 16 -

l'onde optique 107 qui résonne à l'intérieur de la cavité optique, afin de sélectionner deux modes transverses et d'éviter l'apparition d'autres modes transverses préjudiciables.

5 Dans certains modes de réalisation, les moyens de mise en forme de l'intensité peuvent être des moyens de filtrage spatial de l'onde optique 107 du résonateur. Il peut s'agir par exemple d'au moins un masque situé sur ou à l'intérieur de l'élément semi-conducteur 111 - préférentiellement au niveau d'un ventre du champ de l'onde laser - et avec une forme spécifique afin de fournir des premières aires au travers desquelles l'onde optique 107  
10 peut être transmise, et d'autres aires au travers desquelles la propagation de l'onde optique 107 peut être majoritairement interrompue. En d'autres termes, le filtre spatial transversal selon l'invention induit de fortes pertes pour des modes de cavité non souhaités et de faibles pertes pour les modes souhaités.

15 Il inclut tout type de dispositifs de filtrage de lumière, comme par exemple des dispositifs de diffraction, des dispositifs de diffusion et des dispositifs d'absorption. On décrira ci-après deux modes de réalisation différents de filtrage spatial. Dans un mode de réalisation préféré, ces dispositifs peuvent être fabriqués par dépôt chimique en phase vapeur par composés  
20 organométalliques (MOCVD pour « Metal Organic Chemical Vapor Deposition ») et lithographie par faisceaux d'électrons, sans que la présente invention ne soit limitée à ces procédés de fabrication.

Dans certains autres modes de réalisation, les moyens de mise en forme de l'intensité de l'onde optique 107 à l'intérieur du résonateur peuvent être un  
25 dispositif de pompage à faisceau laser dont l'intensité est profilée.

Ainsi, le dispositif laser 100 selon l'invention est stable et hautement accordable : comme la syntonisation de la fréquence de battement repose sur des effets thermiques, la capacité de syntonisation peut être ajustée dans une certaine mesure par une régulation du gradient de température à  
30 l'intérieur de l'élément semi-conducteur, par exemple par une régulation de la puissance du faisceau laser de pompage 110 et/ou certains chauffages additionnels sur l'élément semi-conducteur.

Premier mode de réalisation : masques absorbants

Dans les descriptions suivantes, les dispositifs selon le mode de réalisation de la présente invention sont adaptés au filtrage des modes transverses de Laguerre-Gauss.

- 5 En référence à la FIGURE 5, à la FIGURE 6 et à la FIGURE 7, un filtre absorbant sub-longueur d'onde est décrit. Les dimensions globales dudit filtre sont compatibles avec l'élément semi-conducteur, car il peut être déposé sur la surface du dessus dudit élément semi-conducteur.

Dans un mode de réalisation préféré, la couche absorbante modelée peut  
10 être déposée en tout emplacement à l'intérieur de la cavité, entre le premier miroir 103 et la région de sortie.

Elle est composée d'une aire d'absorption 530 et d'une aire de transmission 520. Typiquement, l'intensité des modes transverses non souhaités de l'onde optique 107 qui résonnent à l'intérieur de la cavité peut  
15 être absorbée entre 5 % et 100 % par les aires d'absorption 530, alors que les aires de transmission 520 tendent à réduire les pertes autant que possible, et typiquement moins de 1 %.

Les formes de ces aires sont conçues afin de correspondre avec le profil transverse des modes transverses que l'on cherche à sélectionner.

- 20 La FIGURE 5 illustre un fichier de masquage utilisé pour la lithographie d'un wafer 500 destinée à concevoir le dispositif laser 100 selon la présente invention et intégrant un filtre spatial sur la surface du dessus de l'élément semi-conducteur 111. De nombreux types de motifs sont conçus sur le wafer 500 avec des caractéristiques dimensionnelles différentes. Certains  
25 d'entre eux sont plus gros que d'autres afin d'optimiser la sélection des modes transverses, en fonction de la taille du faisceau et du laser de pompage 110. De plus, il existe deux types de motifs : les premiers correspondent à des motifs simples 501, 502, constitués de lignes en forme de croix 501 ou en forme d'étoile 502, les seconds motifs sont plus  
30 sophistiqués, en forme de pétales de fleur 511, 512. Pour un type donné de

filtrage de mode transverse, ces dessins sont quasiment équivalents. Ils permettent de filtrer différents ordres de modes transverses.

Par exemple, la FIGURE 6 illustre un cliché par microscope optique de masques métalliques en chrome 610, 620, 630, 640 selon l'invention ainsi que les modes transverses de Laguerre-Gauss correspondants obtenus par simulation avec de tels filtres 615, 625, 635, 645 respectivement.

Les clichés 6.a et 6.b illustrent des masques métalliques 610, 620, 630, 640 pour deux ordres de filtrage différents des modes de Laguerre-Gauss transverses. Sur les clichés 6.a et respectivement 6.b, le motif en croix 610, 630 et le motif en forme de fleur 620, 640 sont équivalents, comme on peut l'observer sur les clichés 6.c et 6.d respectivement. Plus précisément, les clichés 6.c et 6.d illustrent les modes transverses LG correspondants qui peuvent être obtenus avec ces masques absorbants : le masque 610 et 620 permet de filtrer les modes LG<sub>00</sub>+LG<sub>02</sub> (615 et 625) alors que le masque 630 et 640 permet de filtrer les modes LG<sub>00</sub>+LG<sub>03</sub> (635 et 645).

Pour faire fonctionner un laser en double fréquence, les masques sont conçus en fonction de certains paramètres physiques. En connaissant les paramètres optiques de la cavité, les modes de Laguerre-Gauss correspondant peuvent être calculés. Plusieurs de ces modes ne peuvent pas atteindre un fonctionnement suffisant pour l'émission laser car le faisceau de pompe gaussien est focalisé au centre de la structure, autorisant ainsi uniquement (et sélectionnant ainsi) l'existence de modes transverses de faible ordre. Pour une géométrie donnée du masque, les pertes peuvent être calculées pour chaque mode de Laguerre-Gauss et les plus faibles pertes devraient être obtenues pour les modes sélectionnés LG<sub>00</sub> et LG<sub>02</sub> par exemple. Grâce à leurs distributions transversales quasi complémentaires, ces deux modes devraient coexister en raison du brûlage de trou spatial transversal.

La présente invention couvre toutes les configurations pour stabiliser/sélectionner au moins deux modes transverses : un masque peut être apte à sélectionner un, deux ou plus de deux modes transverses. Comme décrit plus bas sur la FIGURE 8, deux masques 820, 830 peuvent

être combinés afin que chacun sélectionne au moins un mode transverse différent.

Typiquement, le masque est formé par le dépôt d'une couche de 10 nm de chrome et d'une largeur de quelques microns sur le demi-VeCSEL. Les caractéristiques dimensionnelles transversales sont d'environ quelques microns, en fonction du diamètre de faisceau, et, pour ce qui concerne les dimensions longitudinales, les masques doivent être suffisamment fins pour ne pas absorber des modes transverse que l'on cherche à propager à l'intérieur de la cavité. Ils doivent être suffisamment fins pour réaliser la diffraction de lumière. Une épaisseur de 10 nm est optimale pour le chrome par exemple, mais elle dépend du coefficient d'absorption du matériau choisi. D'une manière plus générale, l'épaisseur est inférieure à la longueur d'onde de l'onde optique 107 correspondante.

Ensuite, dans un mode de réalisation préféré, le masque est déposé au niveau d'un ventre de l'onde optique 107 qui oscille à l'intérieur de la cavité optique. Le matériau de dépôt n'est pas limitatif dans la présente invention. En fonction des applications, de la longueur d'onde recherchée, des technologies et/ou des performances recherchées, on pourra déposer un matériau métallique, un matériau semi-conducteur dopé, ou un matériau attaqué chimiquement et/ou un diélectrique.

La FIGURE 7 illustre la mise en œuvre d'un tel masque absorbant 710 selon l'invention, sur la surface de dessus 701 d'un demi-VeCSEL 111. Grâce aux aires d'absorption et aux aires de transmission, deux modes transverse 720, 730 sont sélectionnés et sont - finalement - stabilisés à l'intérieur de la cavité optique laser grâce au phénomène dit de brûlage de trou spatial et transverse (« transverse spatial hole burning ») dans la région de gain 104. Ces modes oscillent entre le miroir de Bragg 103 situé à l'intérieur de l'élément semi-conducteur 111 et le second miroir concave externe 106. A la droite de la FIGURE 7, un diagramme illustre la propagation de l'intensité du champ 740 à l'intérieur de la cavité : il montre l'onde propagatrice à l'intérieur du miroir de Bragg et résonant à travers la zone active et la région de gain 104 lors d'un pompage optique.

- 20 -

La FIGURE 8 illustre une vue schématique d'un dispositif laser 800 selon un autre mode de réalisation de l'invention avec deux masques métalliques 820, 830. Chaque masque est déposé, l'un après l'autre. Tout d'abord, le miroir de Bragg 103 est déposé sur le substrat 102. Ensuite, la zone active avec la région de gain 104 est déposée et lithographiée sur le miroir de Bragg. Ensuite, un premier masque 810 avec un premier motif est déposé sur la surface ; dans l'exemple illustré il s'agit d'un masque en chrome dont l'épaisseur est 10 nm. Ensuite, un espaceur 820 est déposé avec une épaisseur qui dépend de la longueur d'onde. Dans l'exemple illustré, son épaisseur est égale à la moitié de la longueur d'onde. Ensuite, un second masque métallique absorbant 830 avec un second motif qui peut être différent du premier est déposé sur l'espaceur.

Dans un mode de réalisation préféré, chaque masque est situé sur un ventre de l'onde optique 107 qui est générée par le présent dispositif laser.

Ainsi, il est possible de filtrer spatialement et transversalement les modes de Laguerre-Gauss transverses grâce à la combinaison de deux masques absorbants.

La FIGURE 9 montre une vue de l'intensité en champ lointain du laser selon l'invention, avec un masque absorbant métallique intégré. La FIGURE 9 illustre aussi la coexistence des deux modes de Laguerre-Gauss.

La FIGURE 10 illustre le spectre optique du laser selon l'invention. Elle montre que le laser selon la présente invention assure un fonctionnement bi-fréquence, illustré par les deux pics tracés et présentant une différence de fréquence entre les deux modes de 162 GHz. En changeant les motifs des masques absorbants, il est possible de modifier la fréquence de battement jusqu'à 450 GHz.

La FIGURE 11 illustre la puissance de sortie du laser en fonction de la puissance de pompage optique. Pour le premier mode transverse, au-delà d'une valeur seuil, la puissance de sortie du laser est linéaire avec une première pente jusqu'à une valeur seuil qui correspond au second mode transverse et à partir de laquelle la pente de la puissance de sortie du laser croit : le rendement du laser selon l'invention augmente lorsque le second

mode apparaît. Sur l'exemple illustré sur la FIGURE 11, la valeur seuil de la puissance de pompage est, pour le premier mode, autour de 150 mW, et la valeur seuil pour le second mode est autour de 250 mW.

Second mode de réalisation : masques de diffraction

5 La FIGURE 12 est un dispositif laser 100 selon l'invention avec un masque diffractif sur l'élément semi-conducteur 111 conforme à la description antérieure. Il consiste en une seule couche de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  1210 complétée par un réseau 2D de trous 1220 de diamètres  $d$  agencés le long d'une grille carrée de période  $a$ . Le diamètre des trous peut être constant ou variable, selon les  
10 effets recherchés. La couche unique de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  est un miroir à cristal photonique et déposée sur la surface du dessus du demi-VeCSEL 111, comme pour les masques absorbants. Le principe est proche de celui des masques d'absorption mais il est fondé sur des effets de diffraction au lieu des effets d'absorption. Ainsi, la lumière est diffractée afin de diffracter les  
15 modes de Laguerre-Gauss qui ne sont pas souhaités.

La FIGURE 13 illustre un autre motif de masque diffractif qui introduit des pertes sur l'onde optique 107 qui oscille à l'intérieur de la cavité laser. Le masque diffractif 1310 selon ce mode de réalisation est composé de quatre réseaux de diffraction 1320, 1340, 1360, 1380 gravés sur les deux axes de  
20 symétrie du filtre spatial 1310. Dans l'exemple illustré, le pas est de  $1\ \mu\text{m}$  et la taille de chaque marque est de 200 nm. Deux modes sont sélectionnés grâce à ce masque de type cristal photonique diffractif : le mode principal  $\text{TEM}_{00}$  1305 représenté par une ligne circulaire centrée sur le masque et le mode  $\text{LG}_{02}$  représenté par une courbe concave et fermée (1301 à 1304) à  
25 chaque coin du masque.

L'épaisseur typique du dépôt diélectrique sur lequel les structures diffractives sont gravées est comprise entre environ la moitié de la longueur d'onde et le huitième de la longueur d'onde.

Les masques diffractifs peuvent être fabriqués par certaines techniques  
30 microélectroniques, comme pour les masques absorbants.

Troisième mode de réalisation : dispositif de pompage par faisceau laser modelé en intensité

Dans ce mode de réalisation particulier, la mise en forme de l'intensité de l'onde optique 107 qui résonne à l'intérieur de la cavité laser n'est plus  
5 réalisée par un masque d'absorption ; elle est désormais réalisée par pompage optique.

Dans les deux modes de réalisation précédemment exposés, le pompage optique est tout à fait homogène sur la zone correspondant au faisceau souhaitée – profil de type soit gaussien soit haut-de-forme – sur la surface  
10 active de l'élément semi-conducteur sur lequel le pompage est réalisé.

On montre avec la présente invention qu'un résultat équivalent à celui fourni par les filtres spatiaux peut être obtenu avec un modèle de pompage non homogène.

Le filtre transversal spatial est monté sur les composants optiques qui  
15 focalisent le faisceau laser de pompage 110 sur la surface active de l'élément semi-conducteur, afin de diminuer son intensité dans certaines zones, dénommées zones d'absorption, et de permettre une transmission de la lumière dans certaines autres zones, nommées zones de transmission. La forme et l'emplacement de ces zones sur le faisceau laser de  
20 pompage 110 sont agencées pour être projetés sur la surface active sur l'élément semi-conducteur, et pour qu'elles se superposent aux modes de Laguerre-Gauss transversaux que l'on cherche à intercepter. Seuls ceux correspondant aux modes de Laguerre-Gauss transversaux que l'on cherche à sélectionner seront effectivement pompés par ce laser de pompage  
25 d'intensité non homogène.

Dans certains autres modes de réalisation de la présente invention, une autre technique de mise en forme du pompage optique peut être obtenue en focalisant deux faisceaux de pompage elliptiques (les deux ellipses étant transverses l'une par rapport à l'autre) sur la puce de semi-conducteur afin  
30 de produire une aire dite de pompage de forme semblable à celle d'un pétale.

- 23 -

La FIGURE 14 illustre le spectre THz du VeCSEL de Laguerre-Gauss bi-fréquence par photo-couplage et l'évolution temporelle de son intensité de mode. Elle montre la génération laser simultanée de deux ondes optiques mutuellement cohérentes (c'est-à-dire affichant un bruit de phase relatif faible) à l'intérieur d'une unique cavité VeCSEL, dans un fonctionnement à onde entretenue à 300K et à puissance modérée (35 mW).

la FIGURE 14 illustre ainsi la génération d'onde THz cohérente par photo-couplage du VeCSEL bi-fréquence Laguerre-Gauss dans une photodiode UTC, et confirme l'étude théorique de la dynamique laser, montrant l'émission simultanée des deux modes LG, en régime permanent, du VeCSEL double fréquence.

### Revendications

1. Dispositif laser (100) de génération d'une onde optique (107) comprenant au moins deux fréquences, ledit dispositif laser (100) comprenant :
  - 5           - un premier élément (111) comprenant une région de gain (104) située entre une première extrémité définie par un premier miroir (103) et une seconde extrémité définie par une région de sortie,
  - 10           - un second miroir (106), distinct du premier élément (111), et agencé de façon à former avec le premier miroir (103) une cavité optique incluant la région de gain (104) et un espace libre (105) entre la région de sortie et le second miroir (106),
  - des moyens de pompage (120) de la région de gain (104) de façon à générer l'onde optique (107),
  - 15           caractérisé en ce que le dispositif laser (100) comprend en outre des moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique (107) et agencés pour sélectionner au moins deux modes transverses de l'onde optique (107).
2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les au moins deux modes transverses sélectionnés de l'onde optique (107) sont choisis entre les modes stabilisés suivants :
  - 20           - modes de Laguerre-Gauss, et/ou
  - modes d'Hermite-Gauss, et/ou
  - modes de Bessel-Gauss.
- 25   3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les moyens de mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique (107) comprennent des moyens de filtrage spatial de ladite onde optique (107).

4. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel les moyens de filtrage spatial de l'onde optique (107) sont choisis entre :
- des moyens de diffraction de la lumière,
  - des moyens de diffusion de la lumière,
  - 5 - des moyens d'absorption de la lumière.
5. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel les moyens de diffraction de la lumière comprennent au moins un cristal photonique et/ou un réseau de diffraction situés à au moins une extrémité de la région de gain (104) et agencé pour mettre en forme la phase transversale et/ou l'intensité transversale de l'onde optique (107) pour sélectionner les au moins deux modes transverses.
- 10
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 3 ou 4, dans lequel les moyens d'absorption de la lumière comprennent au moins un masque, chaque masque étant agencé avec une surface ayant une absorbance non uniforme, ladite surface incluant au moins une zone d'absorption et/ou au moins une zone de transmission afin de sélectionner au moins un mode transverse de l'onde optique (107) parmi les au moins deux modes transverses.
- 15
7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel les moyens d'absorption de la lumière comprennent un seul masque, ledit masque étant agencé pour sélectionner les au moins deux modes transverses de l'onde optique (107).
- 20
8. Dispositif selon les revendications 6 ou 7, dans lequel chaque masque est une couche d'épaisseur nanométrique.
- 25
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel la zone d'absorption fournit une absorbance au moins deux fois plus élevée que l'absorbance de la zone de transmission.

- 10.** Dispositif selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel chaque masque est situé au niveau d'un ventre de l'onde optique (107) à l'intérieur de la cavité.
- 11.** Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les moyens de pompage (120) de la région de gain (104) comprennent :
- un laser à pompe (108) émettant un faisceau laser de pompage (110),
  - des moyens agencés pour la mise en forme spatiale de l'intensité lumineuse du faisceau laser de pompage (110),
- caractérisé en ce que les moyens de sélection d'au moins deux modes transverses de l'onde optique (107) comprennent les moyens de mise en forme spatiale de l'intensité lumineuse du faisceau laser de pompage (110) et sont agencés pour projeter un motif d'intensité du faisceau de pompage sur la région de sortie du premier élément (111) correspondant aux au moins deux modes transverses sélectionnés de l'onde optique (107).
- 12.** Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le second miroir (106) est un miroir concave ou un miroir à conjugaison de phase.
- 13.** Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, qui comprend en outre des moyens de syntonisation de déplacement du second miroir (106) de façon à changer la longueur de la cavité optique.
- 14.** Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, qui comprend en outre des moyens de syntonisation de la différence de fréquence entre les au moins deux modes de l'onde optique (107).
- 15.** Dispositif selon la revendication 14, pour lequel les moyens de syntonisation de la différence de fréquence sont des moyens de syntonisation thermique agencés pour établir un gradient thermique dans la direction transversale du premier élément (111).

- 16.** Dispositif selon la revendication 15, dans lequel les moyens de syntonisation thermique comprennent au moins l'un des composants suivants :
- 5           - au moins un élément conducteur thermique local monté transversalement sur le premier élément (111) et agencé pour conduire ou dissiper la chaleur, et/ou
  - des moyens de modulation de la puissance du laser de pompage (108) afin de chauffer localement :
    - la région de sortie du premier élément (111), et/ou
    - 10           - les moyens de filtrage spatial, et/ou
  - un faisceau laser de pompage mis en forme (110) qui accentue et/ou optimise le gradient thermique transverse aux directions de propagation de l'onde optique (107).
- 17.** Procédé de génération d'une onde optique (107) comprenant au moins deux fréquences et comprenant au moins l'une des étapes suivantes :
- 15           - génération d'une onde optique (107) à l'intérieur d'une région de gain (104),
  - pompage de l'onde optique (107) avec des moyens de pompage (120),
  - 20           - mise en forme de l'intensité lumineuse et/ou du profil de phase de l'onde optique (107) pour sélectionner au moins deux modes transverses de l'onde optique (107).
- 18.** Procédé selon la revendication 17, dans lequel l'étape de sélection des au moins deux modes transverses de l'onde optique (107) consiste à filtrer spatialement l'intensité de l'onde optique (107).
- 25
- 19.** Procédé selon la revendication 17 ou 18, comprenant en outre l'étape consistant à accorder la longueur de la cavité optique afin de décaler les au moins deux fréquences de l'onde optique (107).

- 28 -

- 20.** Procédé selon les revendications 17 à 19, comprenant en outre l'étape consistant à accorder la différence de fréquence entre les au moins deux modes.
- 21.** Utilisation du dispositif laser (100) selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, pour des techniques de génération de THz avec photomélange, dans laquelle les au moins deux modes sélectionnés sont injectés dans un guide d'onde.
- 5

1 / 6

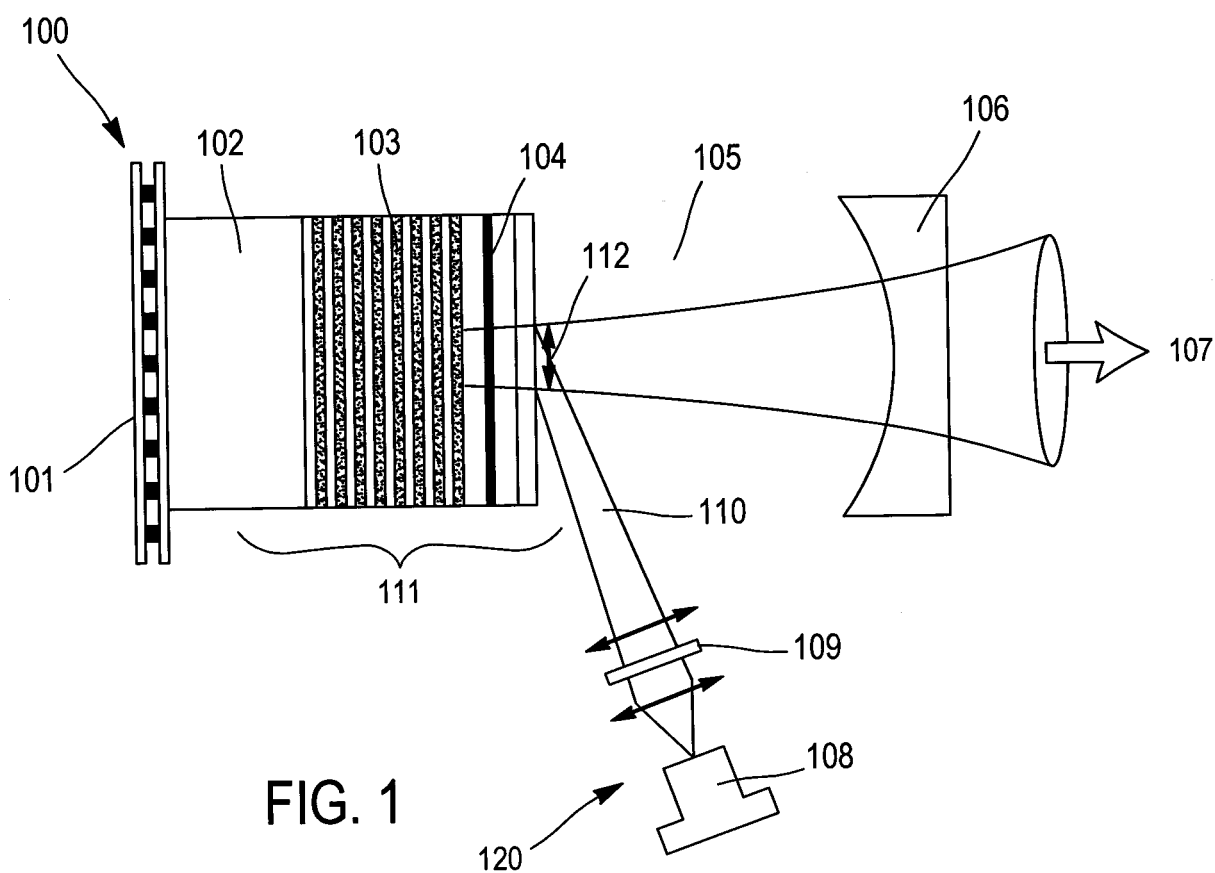


FIG. 1

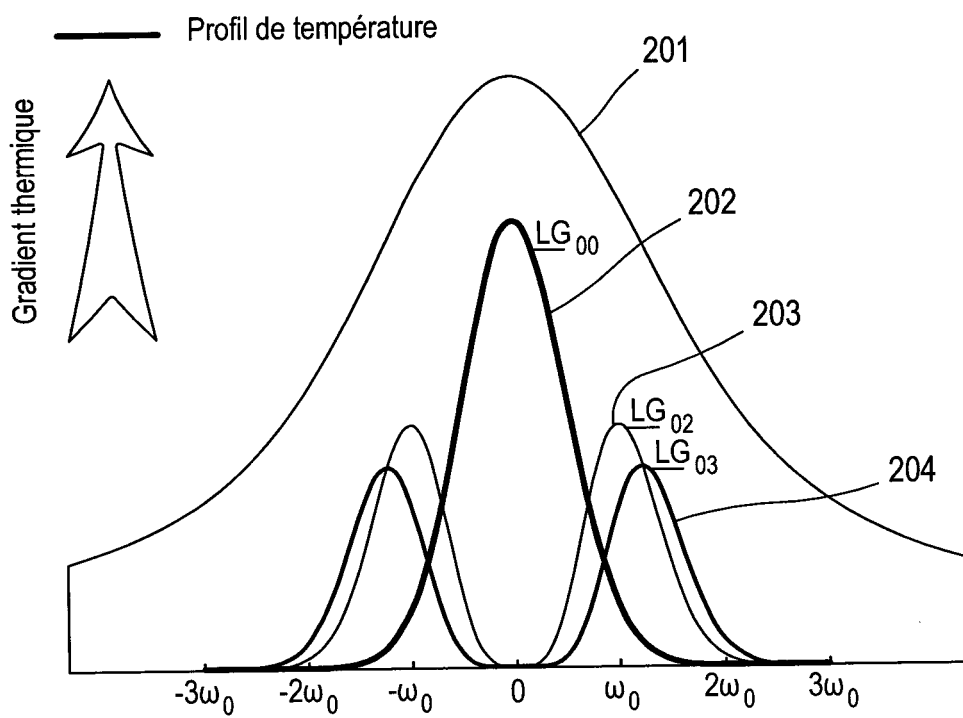


FIG. 2

2 / 6

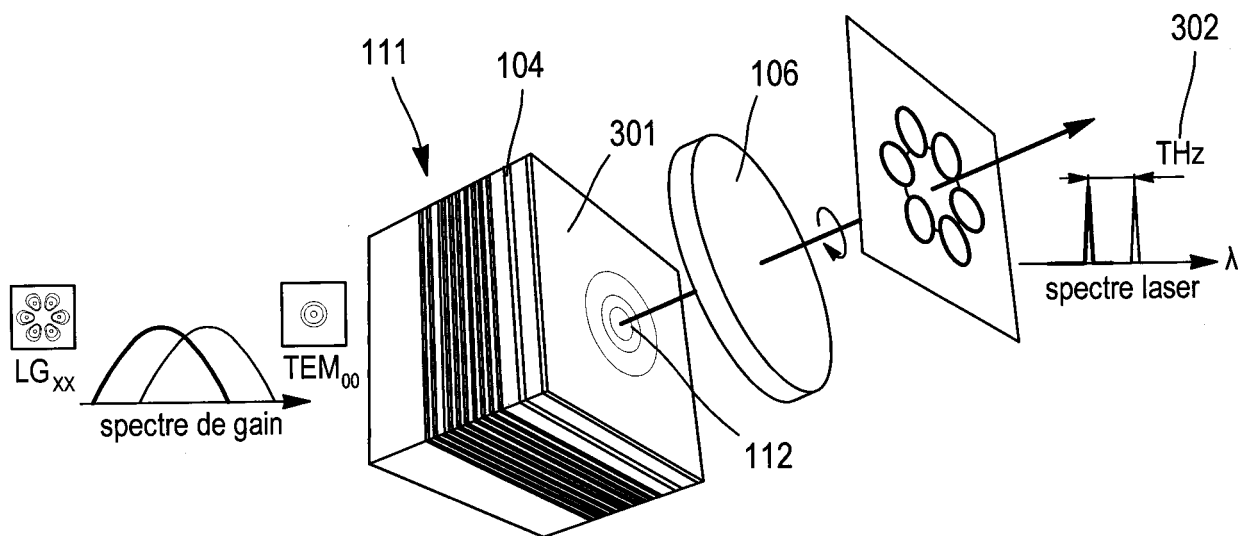


FIG. 3

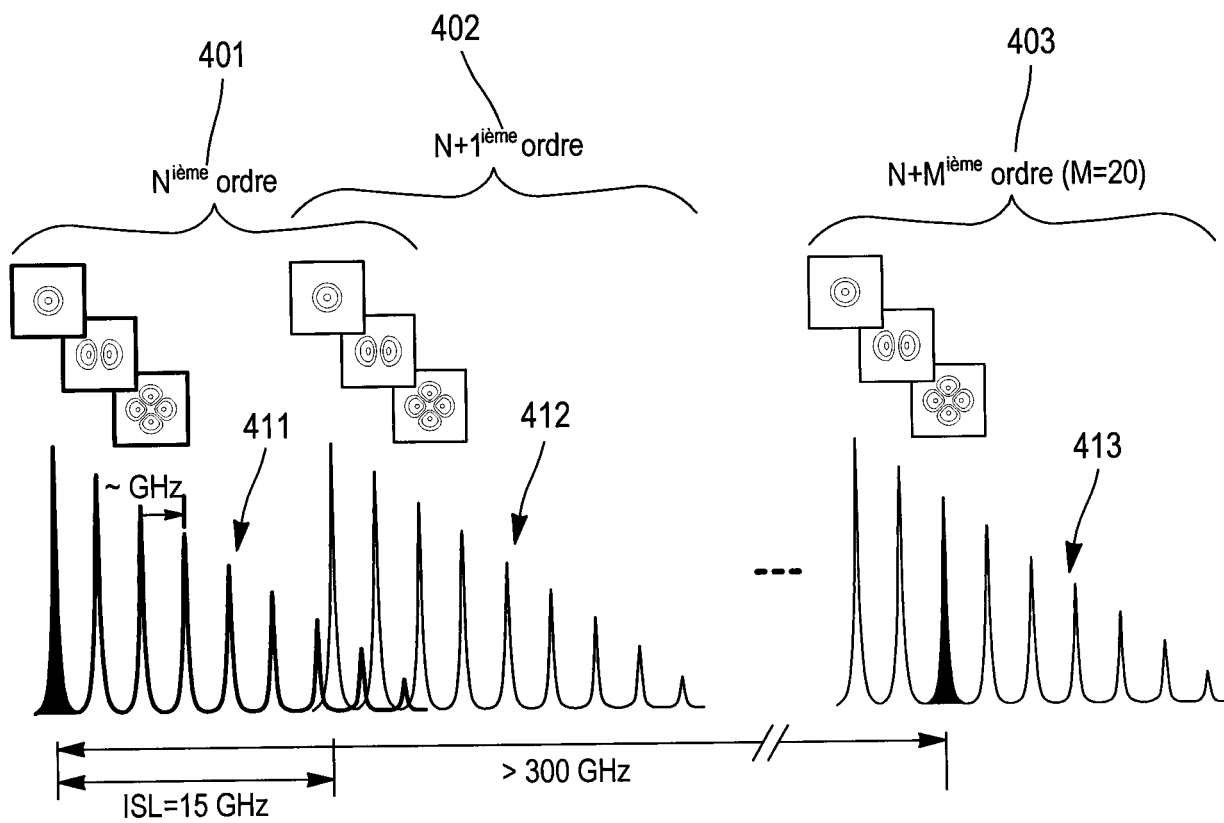


FIG. 4

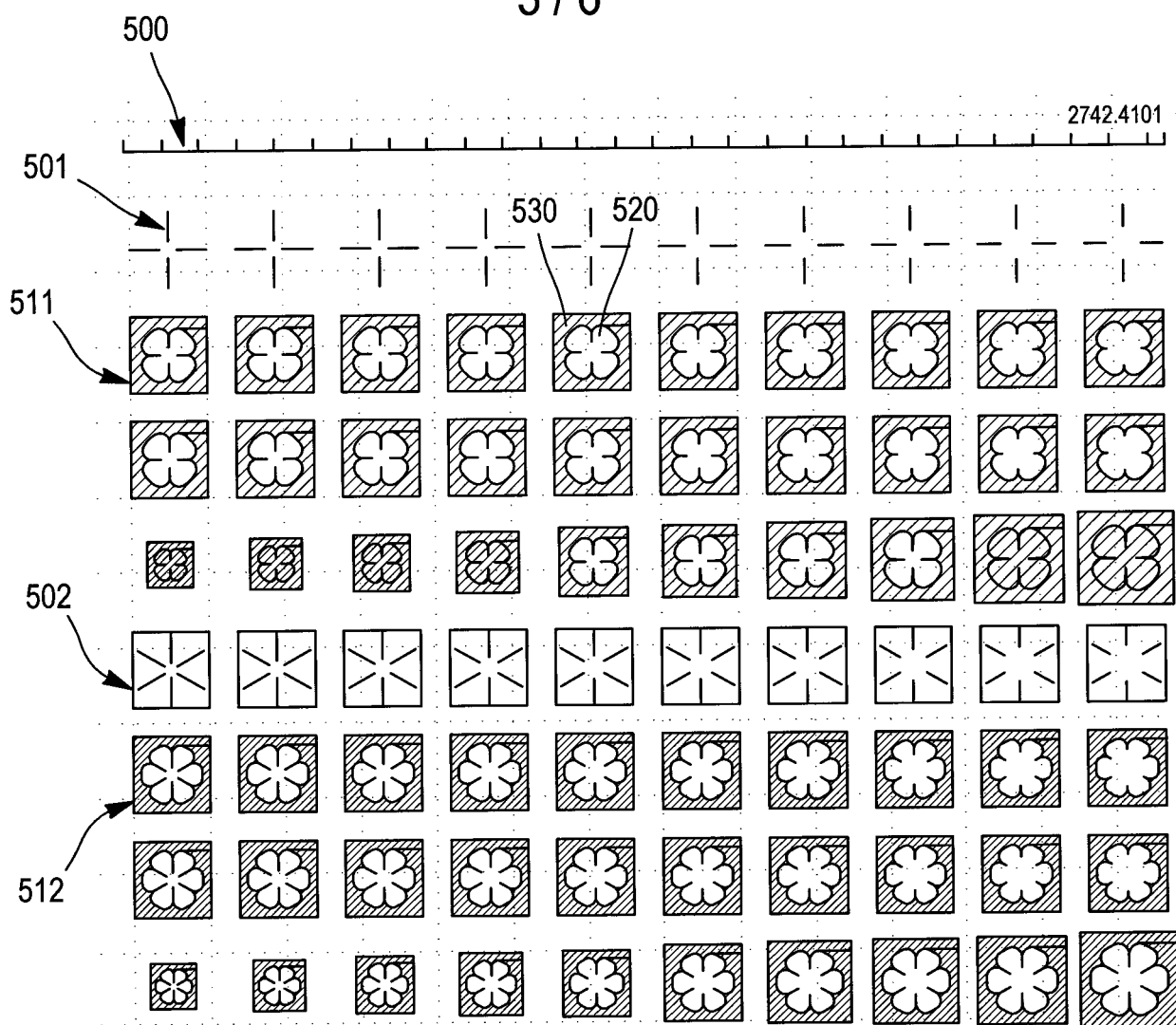


FIG. 5

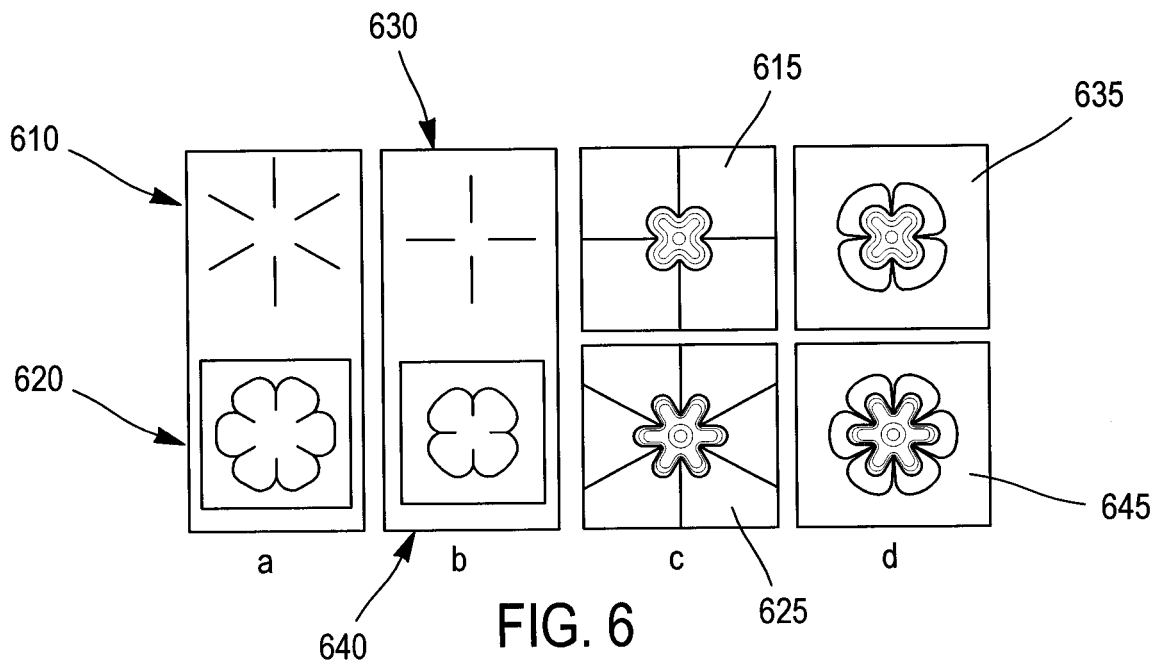


FIG. 6

4 / 6

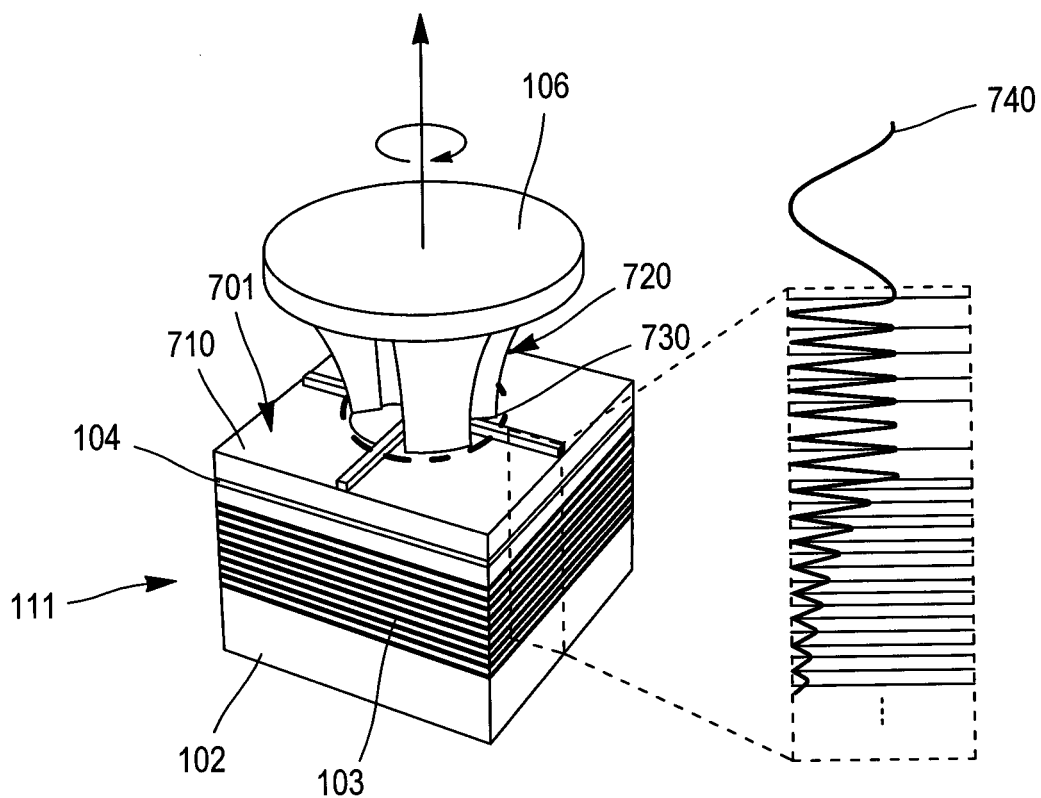


FIG. 7

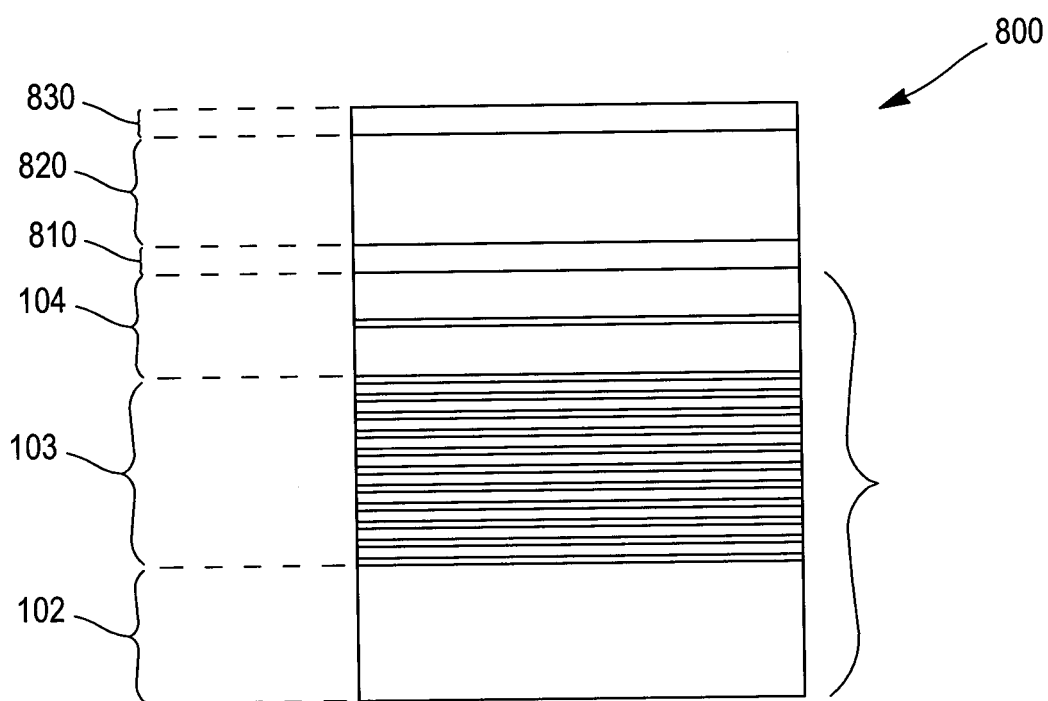


FIG. 8

5 / 6

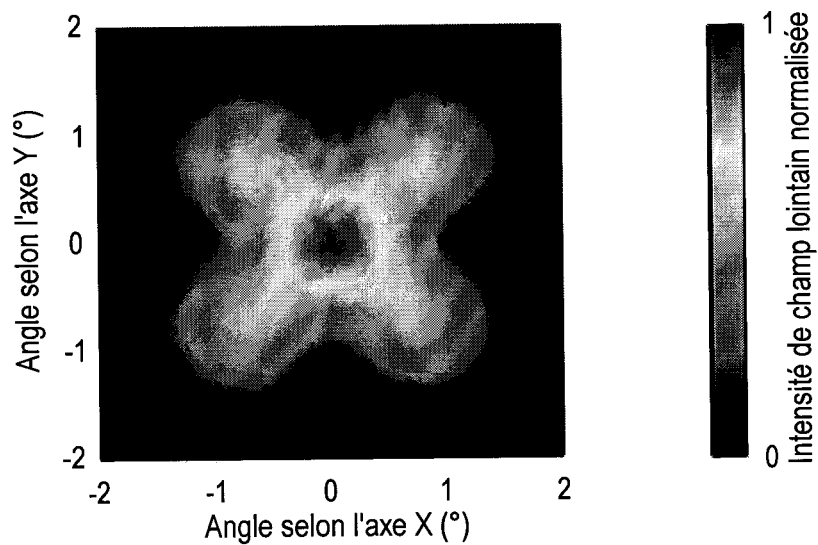


FIG. 9

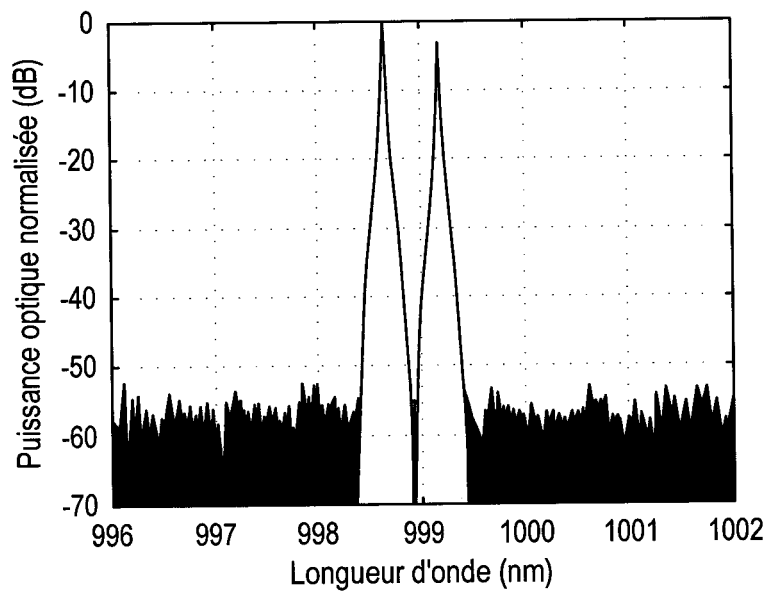


FIG. 10

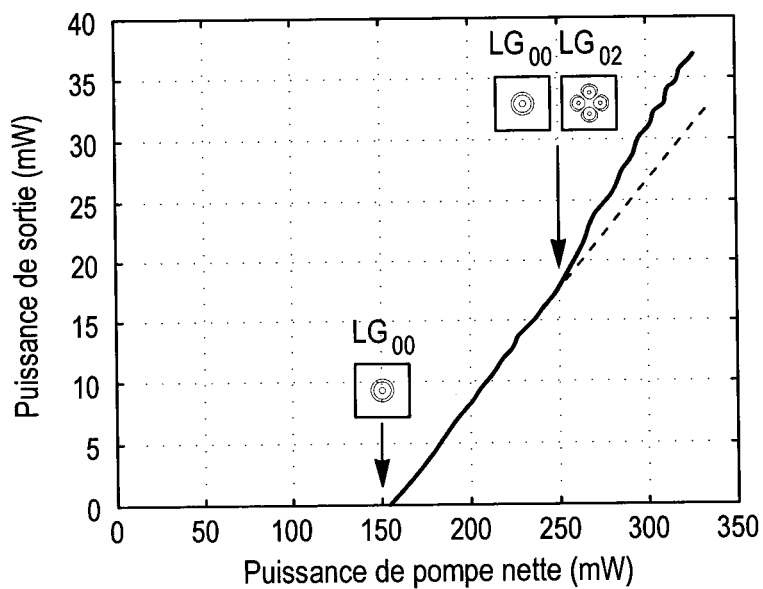


FIG. 11

6 / 6

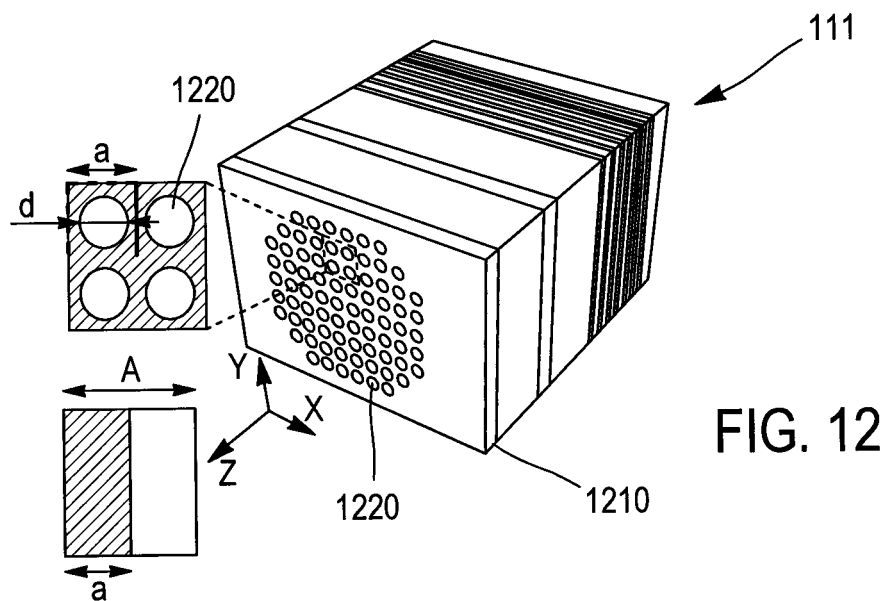


FIG. 12

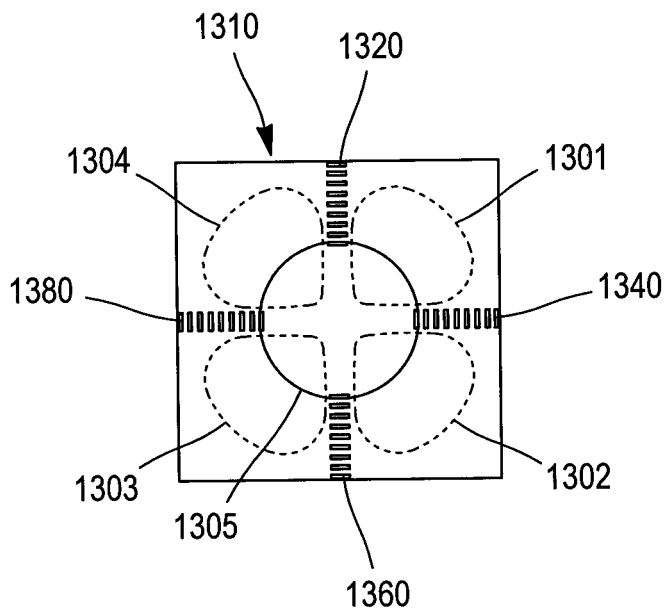


FIG. 13

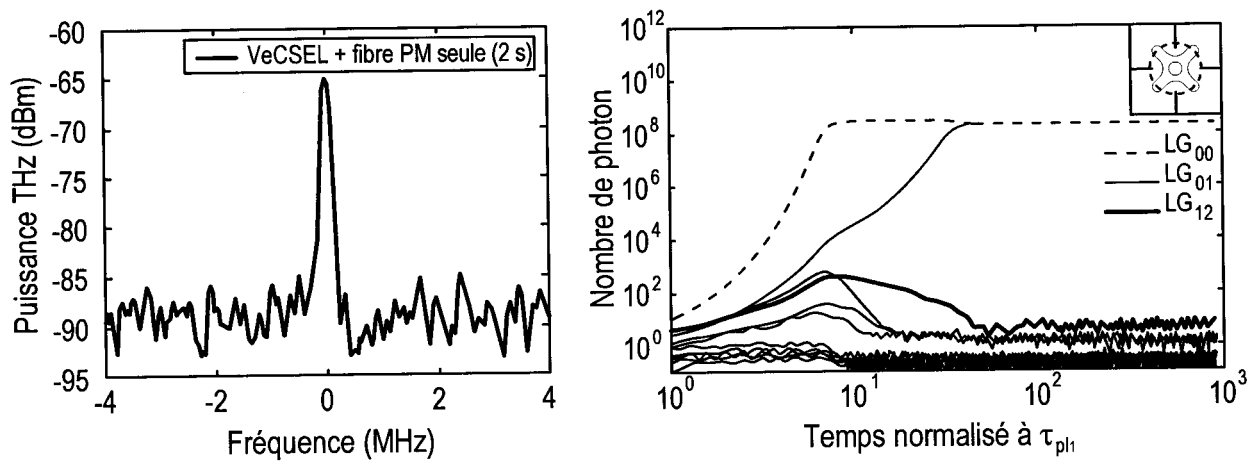


FIG. 14



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 804984  
FR 1402058

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	R. Paquet et al.: "Dual-Frequency Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser for Terahertz Generation", Proceedings of the 2nd Workshop VeCSEL, 2013, pages 33-33, XP002741992, Extrait de l'Internet: URL:http://stern.ies.univ-montp2.fr/vecsel/IMG/pdf/Proceeding.pdf [extrait le 2015-07-08]	1-12, 14-18, 20,21	H01S3/098
Y	* le document en entier *	13,19	
X	A. Garnache et al.: "Control of new spatial, temporal and polarization coherent light states with VeCSEL: VORTEX, continuum, THz, spin", Proceedings of the 2nd Workshop VeCSEL, 2013, pages 31-31, XP002741993, Extrait de l'Internet: URL:http://stern.ies.univ-montp2.fr/vecsel/IMG/pdf/Proceeding.pdf [extrait le 2015-07-08]	1,17	
Y	* le document en entier *	13,19	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01S
A		2-12, 14-16, 18,20,21	
-----		-/--	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 juillet 2015		Bésuelle, Emmanuel	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		.....	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14) 2







**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement  
national

FA 804984  
FR 1402058

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>CERUTTI L ET AL: "Single-Frequency Tunable Sb-Based VCSEs Emitting at <math>2.3\mu\text{m}</math>", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 17, no. 10, 1 octobre 2005 (2005-10-01), pages 2020-2022, XP011139575, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2005.856341 * p. 2022, 2e par. * * le document en entier * -----</p>	1-21	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
		9 juillet 2015	Bésuelle, Emmanuel
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			