

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①1 N° de publication : **3 108 412**

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **20 02799**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **G 02 F 1/365 (2019.12), G 02 B 6/14**

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 Guide d'onde multimode configuré pour générer une radiation monomode à partir d'une radiation monomode.

②2 Date de dépôt : 23.03.20.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 24.09.21 Bulletin 21/38.

④5 Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 18.02.22 Bulletin 22/07.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *Compagnie Industrielle des Lasers  
CILAS Société anonyme —FR et Université de  
Limoges Etablissement public — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : MILLOT Guy, COUDERC Vincent,  
KRUPA Katarzyna, TONELLO Alessandro, WABNITZ  
Stefan et MONTAGNE Jean-Eucher.

⑦3 Titulaire(s) : *Compagnie Industrielle des Lasers  
CILAS Société anonyme, Université de Limoges  
Etablissement public.*

⑦4 Mandataire(s) : GEVERS & ORES.

**FR 3 108 412 - B1**



## **Description**

### **Titre de l'invention : Guide d'onde multimode configuré pour générer une radiation monomode à partir d'une radiation monomode.**

#### **Domaine technique**

[0001] La présente invention concerne le domaine des guides d'onde. En particulier, il concerne les guides d'onde multimodes, tels que des fibres optiques multimodes.

#### **ÉTAT DE LA TECHNIQUE**

[0002] Les guides d'onde multimodes ne sont généralement pas utilisés pour les amplificateurs lasers. En effet, les guides d'onde multimodes permettent de propager simultanément plusieurs modes transverses d'une radiation. Ainsi, une radiation sensiblement monomode en entrée d'un guide d'onde multimode et se propageant dans le guide d'onde devient en sortie une radiation multimode plus divergente qu'une radiation monomode. Cela limite donc l'utilisation d'un guide d'onde multimode dans de nombreuses applications telles que l'imagerie biologique, les LIDAR (« Light Detection And Ranging » en anglais pour « détection et estimation de la distance par la lumière »), la désignation laser, la spectroscopie, la microspectroscopie, etc. L'utilisation d'un guide d'onde monomode paraît être une bonne solution afin de minimiser le nombre de modes en sortie du guide d'onde. Toutefois, ce type de guide d'onde est limité quant à la puissance de la radiation laser pouvant s'y propager. Un guide d'onde multimode permet une propagation de radiations lasers présentant une puissance plus importante que la puissance possible dans un guide d'onde monomode. Par ailleurs, la largeur d'une fibre multimode est, en général, plus grande que la largeur d'une fibre monomode. Cette largeur plus importante permet de repousser l'apparition d'effets non linéaires parasites importants, ce qui préserve la qualité spectrale de la radiation laser. La propagation des radiations lasers sur un nombre réduit de modes dans les guides d'onde multimodes revêt donc un intérêt important pour garantir une radiation laser avec de bonnes qualités spatiales et spectrales en sortie du guide d'onde.

#### **Exposé de l'invention**

[0003] La présente invention a pour objet de pallier les inconvénients d'une fibre multimode en proposant un guide d'onde permettant de minimiser le nombre de modes qui guident les radiations jusqu'à la sortie dudit guide d'onde.

[0004] À cet effet, l'invention concerne un guide d'onde non linéaire multimode configuré pour générer une radiation de sortie sensiblement monomode à un mode d'ordre souhaité à partir d'une radiation d'entrée sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel, la radiation d'entrée étant couplée à une radiation

de pompe.

[0005] Selon l'invention, le guide d'onde présente :

- un profil d'indice selon une section transversale du guide d'onde comprenant au moins un maximum, le ou les maxima du profil d'indice correspondant respectivement à au moins un maximum d'intensité de la radiation de sortie au mode d'ordre souhaité ;
- au moins un ion dopant configuré pour absorber la radiation de pompe, le ou les ions dopants présentant un profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale du guide d'onde comprenant au moins un maximum.

[0006] Ainsi, grâce au guide d'onde, un réseau d'indice périodique peut être produit par auto-imagerie et par effet Kerr, ce qui permet un échange d'énergie entre les modes afin que l'énergie de tous les modes soit transférée vers le mode souhaité.

[0007] De plus, le guide d'onde présente un cœur cylindrique et une gaine périphérique recouvrant le cœur cylindrique.

[0008] De façon non limitative, le profil d'indice présente une forme de cloche.

[0009] Avantageusement, le profil d'indice présente une dissymétrie par rapport à un axe central du guide d'onde.

[0010] Par exemple, le guide d'onde est enroulé afin d'induire la dissymétrie du profil d'indice.

[0011] Selon une particularité, le profil d'indice selon la section transversale répond à la condition suivante :  $(n_1^2 - n_2^2) \left( \frac{R\pi}{\lambda_0} \right)^2 \leq 100$ ,

dans laquelle :

$R$  correspond au rayon du cœur cylindrique,

$n_1$  correspond à l'indice maximal du cœur cylindrique,

$n_2$  correspond à l'indice de la gaine périphérique,

$\lambda_0$  correspond à la longueur d'onde de la radiation d'entrée.

[0012] Selon une autre particularité, le guide d'onde forme une fibre optique effilée adiabatique.

[0013] De façon non limitative, le profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale présente une forme de cloche.

[0014] Avantageusement, la concentration d'ions dopants selon la section transversale présente une dissymétrie par rapport à l'axe central du guide d'onde.

[0015] L'invention concerne également un système amplificateur.

[0016] Selon l'invention, le système comprend :

- au moins un guide d'onde tel que décrit ci-dessus,
- une source de radiation configurée pour générer une radiation d'entrée sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel,
- au moins une source de radiation de pompe configurée pour générer une radiation

de pompe apte à être absorbée par le ou les ions dopants,

- un dispositif de couplage configuré pour coupler la radiation d'entrée générée par la source de radiation et la radiation de pompe avant de se propager dans le guide d'onde.

[0017] Selon une particularité, la radiation d'entrée générée par la source de radiation est également une radiation à modes longitudinaux bloqués en phase.

### **BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES**

[0018] L'invention, avec ses caractéristiques et avantages, ressortira plus clairement à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

[0019] [fig.1] La figure 1 représente une vue en coupe d'un mode de réalisation du système amplificateur comprenant le guide d'onde.

[0020] [fig.2] La figure 2 représente un exemple de profil d'indice du guide d'onde.

[0021] [fig.3] La figure 3 représente les images périodiques d'un réseau périodique produit par auto-imagerie.

[0022] [fig.4] La figure 4 représente un réseau d'indice produit à partir du réseau périodique de la figure 3 grâce à l'effet Kerr.

### **DESCRIPTION DÉTAILLÉE**

[0023] La figure 1 représente un mode de réalisation du guide d'onde 1. Ledit guide d'onde 1 est configuré pour générer une radiation de sortie 11 sensiblement monomode à un mode d'ordre souhaité à partir d'une radiation d'entrée 21 sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel. La radiation d'entrée 21 est couplée à une radiation de pompe 31.

[0024] Une radiation sensiblement monomode correspond à une radiation présentant un nombre réduit de modes longitudinaux et spatiaux. Par exemple, une radiation sensiblement monomode présente environ un à cinq modes longitudinaux et spatiaux.

[0025] Selon sa section transversale, le guide d'onde 1 présente un profil d'indice (de réfraction) 15 comprenant au moins un maximum (d'indice) 16 (figure 2). Le ou les maxima 16 du profil d'indice 15 correspondent respectivement à au moins un maximum d'intensité de la radiation de sortie 11 au mode d'ordre souhaité.

[0026] Le guide d'onde 1 présente également au moins un ion dopant configuré pour absorber la radiation de pompe 31. Le ou les ions dopants présentent un profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale du guide d'onde 1 comprenant au moins un maximum (de concentration d'ions dopants).

[0027] De façon non limitative, le ou les ions dopants peuvent correspondre à un ion Ytterbium ou un néodyme (Erbium, Thulium, etc.).

[0028] Le guide d'onde 1 multimode ainsi configuré autorise un transfert de puissance des modes se propageant dans le guide d'onde 1 vers un mode d'ordre souhaité. Par exemple, il autorise un transfert de puissance des modes d'ordres élevés se propageant

dans le guide d'onde 1 vers un seul mode d'ordre bas, en particulier vers le mode fondamental.

- [0029] Une propagation de la radiation d'entrée 21 couplée à la radiation de pompe 31 dans le guide d'onde 1 produit un réseau d'indice 7 périodique ou quasi périodique pour la longueur d'onde de la radiation d'entrée 21 et pour la longueur d'onde de la radiation de pompe 31. Le réseau d'indice 7 périodique est issu de l'auto-imagerie (ou effet « Talbot ») et de l'effet Kerr.
- [0030] L'auto-imagerie permet d'obtenir périodiquement une image 6 de la radiation incidente 41 en entrée du guide d'onde 1 au bout d'une longueur spécifique du guide d'onde 1. La longueur spécifique correspond à une longueur pour laquelle tous les modes en entrée du guide d'onde 1 se retrouvent avec leur même état de phase relatif. La figure 3 représente les endroits dans le guide d'onde 1 où les modes en entrée du guide d'onde 1 se retrouvent avec leur même état de phase relatif. Ainsi, une image 6 de la radiation incidente 41 se reproduit périodiquement dans le guide d'onde dans la direction de propagation de radiation. L'auto-imagerie permet alors de produire un réseau périodique ou apériodique. Le réseau est périodique ou apériodique selon que le profil du guide d'onde 1 est stable ou évolutif en diamètre.
- [0031] L'effet Kerr permet de moduler l'indice du guide d'onde 1 par une radiation se propageant dans ledit guide d'onde 1. L'effet Kerr transforme alors le réseau périodique ou apériodique, produit par l'auto-imagerie, en réseau d'indice 7 périodique ou apériodique. La figure 4 représente le réseau d'indice 7 périodique ou apériodique obtenu à partir du réseau périodique ou apériodique de la figure 3.
- [0032] L'effet Raman peut également être à l'origine de la modification du réseau d'indice 7 à cause de son gain préférentiellement fort au niveau des nœuds du réseau.
- [0033] Le réseau d'indice 7 périodique ou apériodique permet de favoriser les mélanges à quatre ondes et donc de rompre l'orthogonalité entre les modes et de permettre un échange d'énergie entre eux. Pour une puissance de radiation d'entrée 21 élevée, l'énergie précédemment répartie sur un ensemble de modes se retrouve transférée vers un mode d'ordre souhaité, en particulier vers le mode fondamental, ce qui correspond à un nettoyage spatial de la radiation de sortie 11
- [0034] Selon un mode de réalisation, le guide d'onde 1 présente un cœur cylindrique 12 et une gaine périphérique 13 recouvrant le cœur cylindrique 12.
- [0035] Selon d'autres modes de réalisation, le guide d'onde peut prendre d'autres formes, telles qu'une forme dont la section transversale est carrée, ovale, etc.
- [0036] Avantageusement, le cœur cylindrique 12 est cristallin.
- [0037] De façon non limitative, le cœur cylindrique peut être fabriqué à partir d'un grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme ou à partir d'un cristal dopé à l'Ytterbium.
- [0038] De façon non limitative, le profil d'indice 15 présente une forme de cloche. La forme

de cloche peut correspondre à une forme triangulaire, une forme gaussienne, une forme super-gaussienne, une forme lorentzienne, une forme pseudo-parabolique, etc.

[0039] Par ailleurs, le profil d'indice 15 selon la section transversale présente une dissymétrie par rapport à l'axe central 14 du guide d'onde 1, comme représenté sur la figure 2. L'axe central 14 correspond à un axe longitudinal du guide d'onde 1 situé au centre du guide d'onde 1.

[0040] La dissymétrie du profil d'indice 15 peut être induite par un enroulement du guide d'onde 1.

[0041] De préférence, le profil d'indice 15 selon la section transversale du guide d'onde 1 répond à la condition suivante :  $(n_1^2 - n_2^2) \left( \frac{R\pi}{\lambda_0} \right)^2 \leq 100$ ,

dans laquelle :

$R$  correspond au rayon du cœur cylindrique,

$n_1$  correspond à l'indice maximal du cœur,

$n_2$  correspond à l'indice de la gaine périphérique,

$\lambda_0$  correspond à la longueur d'onde de la radiation d'entrée.

[0042] Cette condition permet d'obtenir un guide d'onde 1 possédant un nombre de modes sensiblement inférieur à cent modes.

[0043] Le guide d'onde 1 peut former une fibre optique effilée adiabatique. Cette forme de guide d'onde 1 permet une évolution (telle qu'une amélioration) de l'auto-imagerie et de l'effet Kerr.

[0044] Par ailleurs, le profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale présente une forme de cloche. De la même manière que pour le profil d'indice 15, la forme de cloche peut correspondre à une forme triangulaire, une forme gaussienne, une forme super-gaussienne, une forme lorentzienne, une forme pseudo-parabolique, etc.

[0045] De même, la concentration d'ions dopants selon la section transversale peut présenter une dissymétrie par rapport à l'axe central 14 du guide d'onde 1.

[0046] L'invention concerne également un système amplificateur 5.

[0047] Le système amplificateur 5 comprend au moins un guide d'onde 1.

[0048] Le système amplificateur 5 comprend également au moins une source de radiation 2 configurée pour générer la radiation d'entrée 21 sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel. La source de radiation 2 peut être une source à impulsions non symétriques temporellement.

[0049] Par exemple, la source de radiation 2 peut comprendre un laser Nd :YAG produisant une radiation de sortie 21 à une longueur d'onde de 1064 nm et à une impulsion de 60 ps.

[0050] La radiation d'entrée 21 générée par la source de radiation 2 peut être une radiation à modes longitudinaux bloqués en phase.

- [0051] Le système amplificateur 5 comprend en outre au moins une source de radiation de pompe 3 configurée pour générer la radiation de pompe 31 apte à être absorbée par le ou les ions dopants. La source de radiation de pompe 3 peut correspondre à une diode de puissance. La source de radiation de pompe 3 peut fonctionner en régime pulsé ou continu. Elle peut être fibrée ou non fibrée. Elle peut être multimode ou monomode spatialement.
- [0052] Le système amplificateur 5 comprend aussi un dispositif de couplage 4 configuré pour coupler la radiation d'entrée 21 générée par la source de radiation 2 et la radiation de pompe 31 avant de se propager dans le guide d'onde 1.
- [0053] Le dispositif de couplage 4 peut comprendre un isolateur, une lentille de couplage, un modulateur spatial de lumière pour contrôler en phase et en amplitude l'onde (radiation) qui se propage dans le guide d'onde 1 (fibre), une lame d'onde ( $\lambda/2$  et/ou  $\lambda/4$ ) pour tourner ou décomposer la polarisation. La lame d'onde, la position de la lentille de couplage et/ou le modulateur spatial de lumière permettent de choisir le mode d'ordre souhaité.
- [0054] Le dispositif de couplage 4 peut exciter les modes avec une radiation spatialement divergente.
- [0055] Avantagement, le dispositif de couplage 4 peut être fibré ou massif. Il peut comprendre un filtre spectral et/ou un filtre spatial pour améliorer la radiation de pompe 31. Il peut être à fibres multimodes paraboliques ou à fibres monomodes.
- [0056] Le système 5 peut être utilisé en source laser en rajoutant deux miroirs partiellement réfléchissants disposés respectivement à une extrémité du guide d'onde 1 (non représenté).
- [0057] Le système peut comprendre plusieurs guides d'onde 1 couplés ou non.
- [0058] Le nettoyage spatial de la radiation de sortie 11 permet de garder une cohérence entre plusieurs amplification parallèles réalisées dans deux guides d'onde 1 différents.

## Revendications

- [Revendication 1] Guide d'onde (1) multimode non linéaire configuré pour générer une radiation de sortie (11) sensiblement monomode à un mode d'ordre souhaité à partir d'une radiation d'entrée (21) sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel, la radiation d'entrée (21) étant couplée à une radiation de pompe (31), caractérisé en ce qu'il présente :
- un profil d'indice (15) selon une section transversale du guide d'onde (1) comprenant au moins un maximum (16), le ou les maxima (16) du profil d'indice (15) correspondant respectivement à au moins un maximum d'intensité de la radiation de sortie (11) au mode d'ordre souhaité ;
  - au moins un ion dopant configuré pour absorber la radiation de pompe (31), le ou les ions dopants présentant un profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale du guide d'onde (1) comprenant au moins un maximum.
- [Revendication 2] Guide d'onde selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il (1) présente un cœur cylindrique (12) et une gaine périphérique (13) recouvrant le cœur cylindrique (12).
- [Revendication 3] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que le profil d'indice (15) présente une forme de cloche.
- [Revendication 4] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le profil d'indice (15) présente une dissymétrie par rapport à un axe central (14) du guide d'onde (1).
- [Revendication 5] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il est enroulé afin d'induire la dissymétrie du profil d'indice (15).
- [Revendication 6] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le profil d'indice (15) selon la section transversale répond à la condition suivante :  $(n_1^2 - n_2^2) \left( \frac{R\pi}{\lambda_0} \right)^2 \leq 100$ .
- dans laquelle :
- $R$  correspond au rayon du cœur cylindrique (12),
  - $n_1$  correspond à l'indice maximal du cœur cylindrique (12),
  - $n_2$  correspond à l'indice de la gaine périphérique (13),

- $\lambda_0$  correspond à la longueur d'onde de la radiation d'entrée (21).
- [Revendication 7] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il forme une fibre optique effilée adiabatique.
- [Revendication 8] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le profil de concentration d'ions dopants selon la section transversale présente une forme de cloche.
- [Revendication 9] Guide d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que la concentration d'ions dopants selon la section transversale présente une dissymétrie par rapport à l'axe central (14) du guide d'onde (1).
- [Revendication 10] Système amplificateur, caractérisé en ce qu'il comprend :
- au moins un guide d'onde (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9,
  - une source de radiation (2) configurée pour générer une radiation d'entrée (21) sensiblement monomode dans le domaine spatial et dans le domaine temporel ;
  - au moins une source de radiation de pompe (3) configurée pour générer une radiation de pompe (31) apte à être absorbée par le ou les ions dopants,
  - un dispositif de couplage (4) configuré pour coupler la radiation d'entrée (21) générée par la source de radiation (2) et la radiation de pompe (31) avant de se propager dans le guide d'onde (1).
- [Revendication 11] Système selon la revendication 10, caractérisé en ce que la radiation d'entrée (21) générée par la source de radiation (2) est également une radiation à modes longitudinaux bloqués en phase.

[Fig. 1]

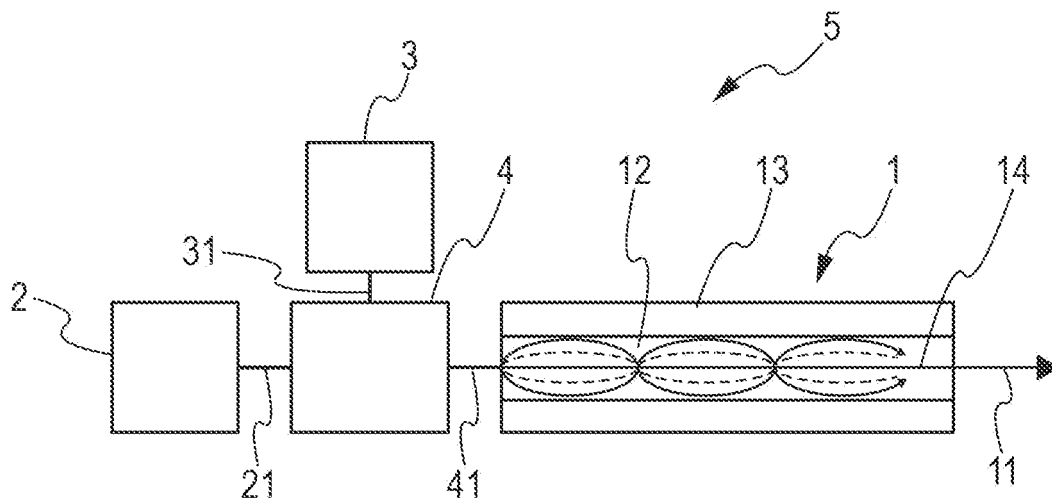


Fig. 1

[Fig. 2]

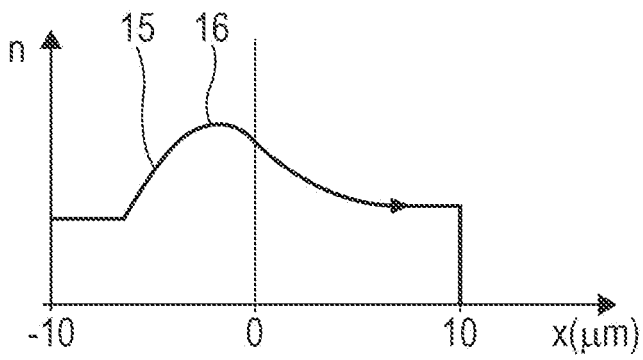


Fig. 2

[Fig. 3]

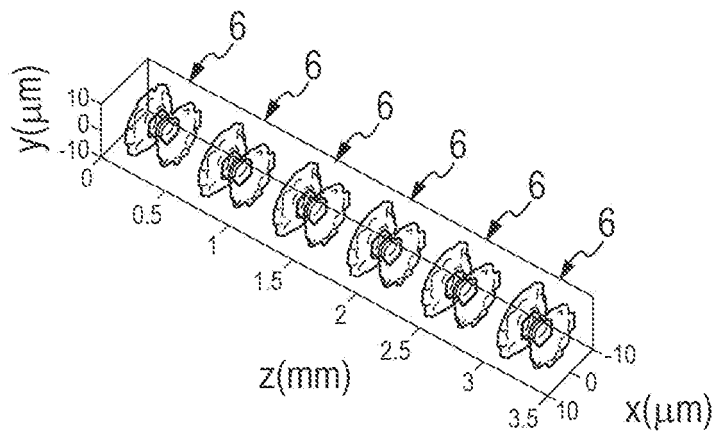


Fig. 3

[Fig. 4]

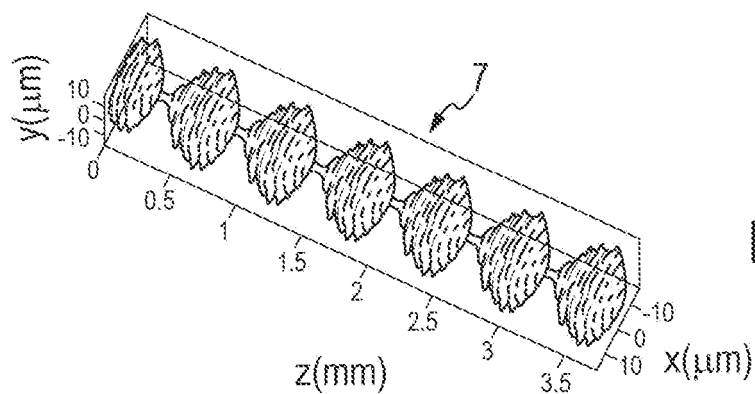


Fig. 4

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

EP 1 811 616 A2 (FURUKAWA ELECTRIC NORTH AM INC [US]) 25 juillet 2007 (2007-07-25)

CHRISTOPHE A. CODEMARD ET AL: "Tandem Pumping of Large-Core Double-Clad Ytterbium-Doped Fiber for Control of Excess Gain",  
LASERS, SOURCES AND RELATED PHOTONIC DEVICES,  
1 janvier 2010 (2010-01-01), page AWA3, XP055450689,  
Washington, D.C.  
DOI: 10.1364/ASSP.2010.AWA3  
ISBN: 978-1-55752-880-3

US 2012/219026 A1 (SARACCO MATTHIEU [US] ET AL) 30 août 2012 (2012-08-30)

GUÉNARD ROMAIN ET AL: "Spatial beam self-cleaning in multimode lanthanum aluminum silicate glass fiber",  
OPTICAL FIBER TECHNOLOGY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL,  
vol. 53, 17 septembre 2019 (2019-09-17), XP085916915,  
ISSN: 1068-5200, DOI:  
10.1016/J.YOFTE.2019.102014  
[extrait le 2019-09-17]

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT