

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

①1 N° de publication :

3 081 737

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

②1 N° d'enregistrement national :

18 54859

⑤1 Int Cl⁸ : **B 23 K 26/06 (2018.01), G 02 F 1/39, H 01 S 3/00**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 PROCÉDES ET SYSTEMES POUR LA GENERATION D'IMPULSIONS LASER DE FORTE PUISSANCE CRETE.

②2 Date de dépôt : 05.06.18.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 06.12.19 Bulletin 19/49.

④5 Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 11.02.22 Bulletin 22/06.

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) : *IMAGINE OPTIC Société anonyme* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : GORJU GUILLAUME, AYEB ADAM et LEVECQ XAVIER.

⑦3 Titulaire(s) : *IMAGINE OPTIC Société anonyme.*

⑦4 Mandataire(s) : *CABINET OSHA ET ASSOCIES.*

FR 3 081 737 - B1



PROCÉDÉS ET SYSTÈMES POUR LA GÉNÉRATION D'IMPULSIONS LASER DE FORTE PUISSANCE CRÊTE

ÉTAT DE L'ART

Domaine technique de l'invention

5 La présente description concerne des procédés et systèmes pour la génération d'impulsions laser de forte puissance crête destinées au choc laser. La présente description trouve des applications notamment dans le grenailage laser, la spectroscopie par choc laser, la génération d'ultrasons par laser ou le nettoyage laser de composants.

Etat de l'art

10 Les applications de traitement de surface par choc laser, c'est-à-dire avec formation de plasma, nécessitent des impulsions de très forte puissance crête, typiquement autour de 10 mégawatts (MW) ou davantage, c'est-à-dire typiquement des impulsions dont la durée est de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes ou moins et qui présentent des énergies de plus
15 d'une centaine de millijoules. Ces impulsions, focalisées sur des zones de quelques mm² typiquement, permettent d'atteindre des densités d'énergie de l'ordre de dizaines de Joule par centimètre carré pour la formation des chocs laser. Ces applications comprennent par exemple la spectroscopie par choc laser, le nettoyage laser, la génération d'ultrasons par laser, par exemple pour l'analyse de la structure cristalline d'un matériau et le « grenailage laser » (ou « laser shock peening » selon l'expression anglo-saxonne) pour l'amélioration de la durée de
20 vie et de la résistance mécanique de pièces.

Le grenailage laser est décrit par exemple dans les brevets US 6002102 et EP 1 528 645. Une première fine couche absorbante est déposée sur la pièce à traiter. En opération, les impulsions laser de fortes puissances crête vaporisent la couche absorbante ce qui génère un plasma chaud. L'expansion du plasma entraîne une onde de compression
25 intense qui permet de générer des précontraintes en profondeur dans le matériau de la pièce à traiter. Une deuxième couche, dite couche de confinement, transparente au rayonnement, par exemple de l'eau ou un matériau transparent à la longueur du rayonnement incident, par exemple du Quartz, aide l'onde de choc à se détendre vers l'intérieur de la surface à traiter. Ce procédé, appelé « grenailage laser » permet d'augmenter la résistance mécanique des pièces à
30 la fatigue cyclique. Ce procédé est généralement réalisé en transportant le faisceau en espace libre jusqu'à la zone à traiter.

Le transport de faisceaux laser de fortes puissances en espace libre engendre cependant des problèmes de sécurité et rend très complexe l'accessibilité à des endroits confinés ou hostiles (milieux immergés par exemple).

5 Pour accéder à des surfaces localisées dans des milieux confinés ou hostiles, les fibres optiques semblent des outils bien adaptés, comme décrit par exemple dans les brevets US4937421 ou US6818854. Néanmoins, certains des procédés précédemment décrits, comme le grenailage laser ou le nettoyage laser de surface, s'effectuent généralement dans des environnements industriels poussiéreux et les seuils de dommages des surfaces d'entrée et de sortie des fibres s'en trouvent nettement diminués. Par ailleurs, en dehors des aspects de
10 propreté, pour les lasers pulsés de durée d'impulsion inférieure à 1 μ s, le niveau de puissance crête pouvant être injectée dans une fibre est limité par le seuil de dommage diélectrique du matériau constituant le cœur de la fibre. Ainsi, pour des impulsions de 10 ns à 1064 nm le seuil de dommage de l'interface air-silice est autour de 1 GW/cm².

Pour limiter les risques d'endommagement à l'injection et à la propagation, l'utilisation
15 de guides d'onde avec des larges diamètres de cœur est préférée. Or les gros cœurs (typiquement supérieurs à 1 mm) sont peu flexibles et des courbures trop importantes créent des pertes par ondes évanescentes qui peuvent endommager la fibre. Un ensemble de fibres optiques (ou « bundle ») peut être utilisé, comme décrit par exemple dans le brevet US6818854. Cependant, pour limiter les pertes à l'injection et à la propagation dans ce type
20 de composant, il est préférable d'injecter l'énergie lumineuse dans chaque fibre individuellement, ce qui rend l'injection complexe et coûteuse ; par ailleurs, il est nécessaire de prévoir en sortie du composant un système optique de focalisation de forte ouverture, ce qui rend le système optique complexe, onéreux et encombrant.

Notamment pour ces raisons, l'utilisation de fibres optiques pour le transport
25 d'impulsions est en pratique limitée au transport d'impulsions de relativement faible puissance crête (inférieure à 10 MW) et pour adresser des zones faciles d'accès (chemin non tortueux).

Il y a donc un besoin pour la génération d'impulsions de forte puissance crête au moyen
d'un système avec un dispositif fibré, qui permette de repousser les seuils d'endommagement
30 des fibres et améliorer la souplesse du dispositif fibré afin d'éviter sa détérioration optique par contraintes mécaniques.

Un objet de la présente description est un procédé et un système de génération d'impulsions de forte puissance crête (typiquement autour de 10 MW ou au-dessus),

autorisant une injection sécurisée dans un dispositif fibré et assurant une propagation sécurisée sur de longues distances tout en conservant une grande souplesse.

RESUME DE L'INVENTION

- 5 Selon un premier aspect, la présente description concerne un système de génération d'impulsions laser de forte puissance crête, comprenant :
- au moins une première source lumineuse pour l'émission de premières impulsions laser;
 - un dispositif fibré pour le transport desdites premières impulsions laser, comprenant
 - 10 au moins une première fibre multimode avec un cœur unique agencé pour recevoir lesdites premières impulsions laser;
 - au moins un premier amplificateur optique agencé en sortie dudit dispositif fibré pour l'amplification optique desdites premières impulsions laser et la génération desdites d'impulsions laser de forte puissance crête.

15 Dans la présente description, on entend par « forte puissance crête » des impulsions laser présentant une puissance crête de l'ordre de, ou supérieure ou égale à, 10 MW. De telles impulsions sont adaptées, après focalisation sur des surfaces de quelques mm^2 , typiquement entre 0,1 et 10 mm^2 , à la génération de chocs laser dans un matériau donné, par exemple pour des applications de grenailage laser, nettoyage de surface, génération d'ultrasons,

20 spectroscopie, etc.

Le système ainsi décrit permet, grâce à l'amplificateur optique agencé en sortie du dispositif fibré, de disposer de très fortes puissances crêtes pour les impulsions incidentes sur le matériau dans lequel on veut générer des chocs laser tout en sécurisant les interfaces d'entrée et de sortie du dispositif fibré. Il rend possible l'utilisation d'une fibre multimode de

25 diamètre limité, typiquement, inférieur à 1 mm, avantageusement inférieur à 300 μm , ce qui confère une plus grande souplesse au dispositif fibré, et de ce fait un accès plus facile à des milieux confinés, avec des diamètres de courbure des fibres qui peuvent être réduits à moins de 15 cm.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ladite première source lumineuse émet

30 des impulsions nanosecondes, c'est-à-dire dont la durée est comprise entre 1 ns et 100 ns avantageusement entre 5 nanosecondes et 20 nanosecondes. En effet, le choc laser s'établit moins bien ou pas du tout pour des impulsions laser ultracourtes (inférieures à qq centaines de

picosecondes. Lesdites premières impulsions peuvent comprendre une ou une pluralité de raies laser.

5 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend en outre un module de mise en forme temporelle desdites premières impulsions laser.

10 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le module de mise en forme temporelle comprend des moyens configurés pour diminuer la densité spectrale de puissance (DSP) desdites impulsions par réduction de la cohérence temporelle. Cela permet de réduire la DSP avec une réduction limitée de l'énergie. La réduction de la DSP à énergie quasi constante ou avec une faible réduction de l'énergie permet de limiter les surintensités attribuées au « speckle » (également appelé « scintillement » ou « tavelures »), de sécuriser l'injection dans le dispositif fibré et de limiter les effets non linéaires.

15 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le module de mise en forme temporelle est configuré pour réduire la densité spectrale de puissance de telle sorte que l'intensité lumineuse des impulsions se trouve en-dessous du seuil de rétrodiffusion Brillouin stimulée dans le dispositif fibré. On limite ainsi les pertes d'énergie lumineuse dues aux effets non linéaires dans les fibres, notamment l'effet Brillouin. Le seuil de rétrodiffusion Brillouin diminue lorsque le diamètre de la fibre diminue (et la longueur de fibre augmente) et augmente lorsque la largeur spectrale de de la source devient supérieure à la largeur spectrale de la raie Brillouin. Ainsi, en réduisant la DSP des impulsions laser, par exemple par élargissement du spectre ou multiplication des raies laser, il est possible de garder un seuil de rétrodiffusion Brillouin élevé tout en réduisant les diamètres de cœur et/ou en augmentant la longueur de fibre. En effet, le calcul du seuil Brillouin tient compte de la convolution entre le profil spectral de la source et celui du gain Brillouin.

25 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, la diminution de la DSP est obtenue par multiplication de la ou des raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions, par exemple au moyen d'un modulateur acousto-optique.

30 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, la diminution de la DSP est obtenue par élargissement du spectre de la ou des raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, pour l'élargissement du spectre de la ou des raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions, ledit module de mise en forme temporelle comprend un dispositif réfléchissant tournant autour d'un axe de rotation donné, et

configuré pour réfléchir lesdites premières impulsions incidentes avec un élargissement spectral de type Doppler.

Le dispositif réfléchissant tournant peut être oscillant ou en rotation autour dudit axe de rotation. Il comprend une ou plusieurs surfaces réfléchissantes. Les impulsions incidentes sur la ou lesdites surfaces réfléchissantes subissent un décalage Doppler variable spatialement du fait de la vitesse angulaire variable en chaque point de la ou desdites surfaces. Ainsi, les impulsions laser réfléchies par ledit dispositif réfléchissant tournant présente un élargissement spectral et par voie de conséquence une diminution de la DSP. En outre les cohérences spatiale et temporelle des impulsions laser sont réduites, ce qui contribue à limiter les effets de speckle et les effets non linéaires.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, la ou lesdites surfaces réfléchissantes sont agencées dans des plans perpendiculaires à un même plan, dit plan d'incidence des premières impulsions, comprenant les directions des vecteurs d'onde desdites premières impulsions laser incidentes sur le dispositif réfléchissant tournant et réfléchies par ledit dispositif réfléchissant tournant.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, l'axe de rotation dudit dispositif réfléchissant tournant est perpendiculaire audit plan d'incidence desdites premières impulsions laser.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, lesdites premières impulsions étant émises à une fréquence de répétition donnée, la vitesse de rotation ou d'oscillation dudit dispositif réfléchissant tournant est synchronisée avec la fréquence de répétition desdites premières impulsions, de telle sorte que chacune desdites premières impulsions soit incidente sur une surface réfléchissante dudit dispositif réfléchissant tournant avec un angle d'incidence constant.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ledit dispositif réfléchissant tournant comprend un simple miroir présentant un mouvement de rotation ou d'oscillation autour d'un axe perpendiculaire à un plan d'incidence desdites premières impulsions laser. Par exemple, le miroir réfléchissant est agencé de telle sorte que lesdites premières impulsions laser soient incidentes sur le miroir tournant selon une direction perpendiculaire au plan dudit miroir.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ledit dispositif réfléchissant tournant comprend une pluralité de surfaces réfléchissantes, deux surfaces consécutives formant un angle non nul, et des miroirs de renvoi permettant de renvoyer chacune desdites premières impulsions sur chacune desdites surfaces réfléchissantes. Par exemple, la pluralité des surfaces réfléchissantes sont agencées sur les faces d'un polygone. En multipliant les surfaces

réfléchissantes, on peut multiplier l'élargissement Doppler. Ainsi par exemple, avec N surfaces réfléchissantes ($N \geq 2$) et N-1 miroirs de renvoi, on multiplie par N l'élargissement Doppler.

5 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, au moins une desdites surfaces réfléchissantes est non plane (par exemple concave ou convexe). Par exemple, la surface réfléchissante de sortie, c'est-à-dire sur laquelle l'impulsion laser est réfléchie en dernier, est non plane pour introduire un effet de convergence ou divergence de ladite impulsion.

10 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le faisceau lumineux formé par lesdites premières impulsions laser et incident sur la ou lesdites surfaces réfléchissantes présente des dimensions inférieures aux dimensions de la ou desdites surfaces réfléchissantes.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend en outre un module de mise en forme spatiale desdites premières impulsions laser en amont du dispositif fibré.

15 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le module de mise en forme spatiale est configuré pour uniformiser la densité spatiale de puissance desdites impulsions en entrée du dispositif fibré. L'uniformisation de la densité spatiale de puissance permet de limiter les surintensités dans la fibre liées à la distribution d'intensité gaussienne d'un faisceau par exemple,

20 Par exemple, le module de mise en forme spatiale des impulsions permet de former des impulsions dont la répartition spatiale d'intensité est de type « top hat », c'est-à-dire avec une variation spatiale de l'intensité faible, typiquement limitée à +/- 10% (hors effets granulaires liés au Speckle). Une mise en forme spatiale de type « top hat » permet en outre d'adapter le faisceau lumineux formé par lesdites premières impulsions à la dimension du cœur de la fibre multimode.

25 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend en outre au moins une source lumineuse de pompe pour l'émission d'au moins un premier faisceau laser de pompe, destiné au pompage optique dudit au moins un premier amplificateur.

30 La source lumineuse de pompe comprend par exemple une diode laser ou un ensemble de diode laser

La source de pompe peut être continue ou pulsée avec un taux de répétition relativement bas, typiquement à la fréquence de répétition des dites premières impulsions laser, c'est-à-dire inférieur à quelques kilohertz.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, la source de pompe est mise en forme temporellement de telle sorte à délivrer des impulsions de pompe dont la durée correspond sensiblement au temps de vie du niveau excité dudit au moins un premier amplificateur optique, soit typiquement de l'ordre de quelques centaines de microsecondes. Une mise en
5 forme spatiale des faisceaux de pompe est également possible, par exemple pour adapter la dimension du faisceau de pompe au diamètre de cœur de la première fibre multimode.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ledit au moins un faisceau laser de pompe est injecté dans le dispositif fibré, avec lesdites premières impulsions. Le transport dans la fibre ainsi que le pompage du milieu amplificateur dudit au moins un premier
10 amplificateur optique est alors copropagatif. Alternativement, le pompage optique du milieu amplificateur peut être transverse à ce dernier, par exemple au moyen de diodes laser.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ledit système de génération d'impulsions laser comprend une pluralité d'amplificateurs optiques, agencés par exemple les uns derrière les autres.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le dispositif fibré comprend en entrée ladite première fibre multimode et un ensemble de fibres légèrement multimodes couplés avec la dite première fibre multimode, formant par exemple ce qu'on appelle une première
« lanterne photonique », et en sortie, une deuxième fibre multimode, couplée avec lesdites fibres légèrement multimodes et comprenant un cœur unique pour la sortie desdites premières
20 impulsions laser. Ainsi, le dispositif fibré comprend deux « lanternes photoniques » tête bêche.

Dans la présente description, on appelle fibre légèrement multimode une fibre comprenant moins de 10 000 modes, typiquement entre 500 et 10 000 modes. Le diamètre de la fibre légèrement multimode est par exemple compris entre 0.05 et 0.2 mm. La fibre multimode (fibre d'entrée de la lanterne photonique) comprend plus de 20 000 modes. Le
25 diamètre de la fibre multimode est par exemple compris entre 0.5 et 1 mm.

Un tel dispositif fibré, comprenant deux « lanternes photoniques » tête bêche, permet un transport des impulsions laser dans des fibres légèrement multimodes de plus faible diamètre et donc de gagner encore en souplesse pour le transport des impulsions laser, permettant un
30 accès encore plus facile à des milieux confinés, tout en gardant en entrée et en sortie un cœur multimode unique.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le dispositif fibré comprend au moins une fibre dopée pour la pré-amplification optique desdites premières impulsions laser. Il peut s'agir de ladite première fibre multimode ou d'une ou plusieurs fibres légèrement multimodes

dans le cas d'utilisation de lanternes photoniques. La pré-amplification optique permet de minimiser encore davantage la quantité d'énergie à injecter dans la première fibre multimode.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend une deuxième source lumineuse pour l'émission de deuxièmes impulsions laser. Les deuxièmes impulsions laser présentent par exemple une longueur d'onde différente des premières impulsions laser. Les deuxièmes impulsions laser sont avantageusement transportés par le même dispositif fibré que les premières impulsions laser. Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend un deuxième amplificateur optique agencé en sortie dudit dispositif fibré pour l'amplification desdites deuxièmes impulsions laser.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend en outre des moyens de focalisation desdites impulsions laser de forte puissance crête en sortie dudit au moins un amplificateur optique.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le système de génération d'impulsions laser comprend en outre des moyens de déplacement d'une extrémité distale du dispositif fibré. Lorsqu'on a besoin de générer des chocs laser à différents emplacements d'un matériau, par exemple dans le cas du traitement d'une surface, on peut déplacer le matériau ou déplacer l'extrémité distale du dispositif fibré, c'est-à-dire l'extrémité opposée à l'extrémité proximale placée du côté de la source.

Selon un deuxième aspect, la présente description concerne un procédé de génération d'impulsions laser de forte puissance crête comprenant :

- l'émission de premières impulsions laser ;
- le transport desdites premières impulsions laser par un dispositif fibré comprenant au moins une première fibre multimode avec un cœur unique dans lequel sont injectées lesdites premières impulsions laser;
- l'amplification optique desdites premières impulsions laser au moyen d'au moins un premier amplificateur optique agencé en sortie du dispositif fibré pour former lesdites impulsions laser de forte puissance crête.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le procédé de génération d'impulsions laser comprend en outre la mise en forme spatiale et/ou temporelle desdites premières impulsions laser.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ladite mise en forme temporelle comprend la réduction de la densité spectrale de puissance par réduction de la cohérence

temporelle, par exemple par multiplication et/ou élargissement de la ou des raie(s) comprises dans lesdites premières impulsions.

Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, ladite mise en forme spatiale comprend l'uniformisation de la répartition spatiale d'intensité desdites premières impulsions laser.

5 Selon un ou plusieurs exemples de réalisation, le procédé de génération d'impulsions laser comprend en outre l'injection dans ledit dispositif fibré d'au moins un premier faisceau laser de pompe pour le pompage dudit au moins un amplificateur optique.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

10 D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à la lecture de la description, illustrée par les figures suivantes :

- FIG. 1, un schéma illustrant un système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description et sa mise en œuvre en milieu confiné ;
- FIGS. 2A – 2C, des schémas illustrant différents modes de pompage de l'amplificateur
15 optique d'un système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description ;
- FIG. 3A – 3B, des schémas illustrant la mise en forme temporelle des impulsions en amont du transport par le dispositif fibré, dans un exemple de système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description, visant à multiplier
20 les raies laser ;
- FIGS 4A – 4D, des schémas illustrant la mise en forme temporelle des impulsions en amont du transport par le dispositif fibré, dans un exemple de système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description, visant à élargir la ou les raie(s) laser par effet Doppler ;
- FIG. 5A – 5B, des schémas illustrant des moyens pour la mise en forme spatiale des impulsions en amont du transport par le dispositif fibré, dans un exemple de système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description, visant à former un faisceau de profil d'intensité constant ;
25

- FIG. 6, un schéma d'un exemple de réalisation d'un dispositif fibré dans un exemple de système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description.

Par soucis de cohérence, les éléments identiques sont repérés par les mêmes références
5 dans les différentes figures.

DESCRIPTION DETAILLEE

On s'intéresse dans la présente description à la génération d'impulsions de forte puissance crête, adaptées pour la génération de chocs laser dans un matériau.

10 L'interaction d'impulsions d'éclairement élevé (puissance lumineuse délivrée par unité de surface), typiquement de l'ordre de quelques millions de watts par cm^2 , avec un matériau, provoque un échauffement brutal de la surface éclairée et sa vaporisation sous forme d'un plasma qui se détend. C'est ce qu'on appelle un choc laser. Le choc laser est un mécanisme dans lequel le temps d'interaction lumière matière est très court, typiquement quelques
15 dizaines de nanosecondes, et de ce fait, il n'y a pas de montée en température significative de la pièce à traiter comme pour les procédés de découpe laser ou de soudure laser. Le choc laser peut être favorisé dans une direction grâce à une couche de confinement. En effet, en l'absence d'une couche de confinement, l'extension du choc laser se fait sur 4π stéradians.

Plus précisément, dans le cas du grenailage laser (ou « *laser shock peening* »), le choc
20 laser ainsi créé permet d'introduire avec une très grande précision des contraintes résiduelles de compression profondes sur un matériau. Cela permet à terme d'augmenter la tenue à la fatigue en retardant l'initiation et la propagation de fissures. Une couche de confinement permet en outre de favoriser la détente du plasma vers l'intérieur de la pièce à traiter et d'améliorer l'efficacité du traitement.

25 Dans le cas de la LIBS (abréviation de l'expression anglo-saxonne «Light Induced Breakdown Spectroscopy »), le choc laser entraîne une vaporisation de la surface à traiter. Les atomes et les ions éjectés sont portés dans des niveaux d'énergie excités et émettent, en se désexcitant, un spectre constitué de raies atomiques, dont la longueur d'onde permet d'identifier les éléments présents et dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des
30 atomes émetteurs.

Dans le cas du nettoyage par ablation, le plasma créé en surface sous l'effet du rayonnement se détend, provoquant ainsi un fractionnement et une expulsion des salissures sans endommager la surface à nettoyer.

5 Dans le contrôle par ultrasons générés par laser, on utilise l'onde ultrasonore formée par le plasma résultant de l'interaction impulsions – matière. L'onde ultrasonore se propage dans le matériau et se réfléchit aux interfaces. La déformation du matériau à l'arrivée de l'onde ultrasonore peut être analysée par le biais d'un interféromètre couplé à un deuxième faisceau laser. Cette analyse peut renseigner plusieurs caractéristiques liées au matériau à savoir son épaisseur, sa structure microscopique, ou encore d'éventuels défauts sous-jacents
10 par exemple.

La FIG. 1 présente un schéma illustrant un système 10 de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description et sa mise en œuvre au sein d'un milieu confiné 11.

15 Le système 10 comprend dans une enceinte 100 pouvant être climatisée et isolée des poussières et de l'humidité, au moins une première source lumineuse 101 pour l'émission de premières impulsions laser I_L .

20 La source lumineuse 101 est par exemple un laser pulsé, émettant des impulsions de durée comprise entre 1 et 100 ns avantageusement entre 5 et 20 ns. La source lumineuse émet par exemple à $1,064 \mu\text{m}$ (longueur d'onde d'émission des lasers néodyme (Nd) :YAG) ou à $1,030 \mu\text{m}$ (longueur de d'émission des lasers ytterbium (Yb) :YAG). La source lumineuse 101 peut comprendre de façon non limitative un laser solide, un laser à fibre, un laser semi-conducteur, un laser disque ou une combinaison de tels lasers.

La source lumineuse peut émettre des impulsions laser avec une raie laser unique ou avec une pluralité de raies laser.

25 Plusieurs sources lumineuses peuvent également être prévues, par exemple à différentes longueurs d'onde pour l'émission de premières impulsions et d'au moins des deuxièmes impulsions à des longueurs d'onde différentes.

30 Le système 10 peut comprendre également au sein de l'enceinte 100 un module de mise en forme temporelle 102 et/ou un module de mise en forme spatiale 103, visant par exemple à réduire la cohérence temporelle et/ou spatiale des premières impulsions laser et/ou à former des impulsions avec un profil d'intensité sensiblement constant. Ces modules de mise en forme spatiale et/ou temporelle visent notamment à réduire des surintensités ou « points chauds » en entrée du dispositif fibré et à limiter les effets non linéaires. Des

exemples de module de mise en forme temporelle et spatiale seront décrits dans la suite de la description.

Dans l'exemple représenté sur la FIG. 1, en sortie des modules de mise en forme temporelle 102 et spatiale 103, les premières impulsions laser sont injectées dans un dispositif
5 fibré 110. Le dispositif fibré 110 permet le transport des impulsions laser émises par la ou lesdites sources lumineuses ; il peut comprendre une fibre multimode unique avec un cœur unique agencé pour recevoir lesdites impulsions laser. Dans d'autres exemples, il peut comprendre plusieurs fibres optiques, avec toujours une première fibre optique multimode comprenant un cœur unique adapté pour recevoir l'ensemble des impulsions laser.

10 Le système 10 comprend également au moins un premier amplificateur optique 120 agencé en sortie dudit dispositif fibré 110 pour l'amplification optique desdites premières impulsions laser. Eventuellement, plusieurs amplificateurs optiques peuvent être agencés en série. En sortie du ou desdits amplificateur(s) optique(s), une mise en forme spatiale des impulsions amplifiées est possible et des exemples sont décrits au moyen des FIGS. 2A – 2C.
15 le système peut comprendre aussi au moins un deuxième amplificateur laser pour l'amplification de deuxièmes impulsions laser émises par une deuxième source à une longueur d'onde différente de la première source, le cas échéant.

Le système 10 comprend également une source lumineuse 104 pour l'émission d'un faisceau de pompe I_p . La longueur d'onde de la source lumineuse de pompe 104 dépend de la
20 longueur d'onde des impulsions émises par la source 101 et de l'amplificateur optique 120 utilisé. Par exemple, si la source laser 101 émet à une longueur d'onde autour de 1064 nm et que le cristal amplificateur de l'amplificateur optique 120 est un cristal de Nd :YAG, la source de pompe 104 pourra émettre des faisceaux de pompe à une longueur d'onde autour de 800 nm. Si le source laser 101 émet à une longueur d'onde autour de 1030 nm, et que le
25 cristal amplificateur est de type Yb : YAG, alors la source de pompe 104 pourra émettre les faisceaux de pompe à une longueur d'onde autour de 980 nm.

La source laser de pompe comprend avantageusement une ou plusieurs diodes laser.

La source laser de pompe 104 peut émettre des faisceaux de pompe en régime continu (CW) ou quasi continu (QCW).

30 Une mise en forme temporelle au moyen d'un module de mise en forme temporelle 105 permet par exemple de moduler les faisceaux de pompe en intensité. Ainsi par exemple, les faisceaux de pompe sont modulés à la fréquence de répétition des dites premières impulsions. Ils peuvent être maintenus à une intensité lumineuse constante ou quasi-constante pendant une durée donnée, par exemple de l'ordre du temps des niveaux excités des ions

terres rares qui servent au phénomène d'amplification de l'amplificateur optique 120. Une fois cette durée passée, l'intensité des faisceaux de pompe peut être réduite à zéro. Une mise en forme spatiale des faisceaux de pompe est également possible, par exemple au moyen d'un module de mise en forme spatiale 106, qui permet par exemple de sécuriser l'injection des faisceaux de pompe dans le dispositif fibré 110 en adaptant la taille du mode optique du faisceau de pompe au diamètre de cœur de la première fibre multimode.

Dans le cas d'utilisation de diodes laser de pompe, la mise en forme temporelle est faite en agissant directement sur la commande électrique de la diode.

Dans l'exemple de la FIG.1, le faisceau de pompe est injecté dans le dispositif fibré 110 avec les impulsions laser I_L au moyen de miroirs 107, 108, la lame 108 étant par exemple une lame dichroïque. Le chemin optique de la pompe lorsqu'elle est transportée par le même dispositif fibré est présenté sur les FIGS. 2A et 2B. Lorsque le dispositif de transport diffère, le pompage est représenté sur la FIG. 2C.

Lorsque le système 10 est utilisé par exemple à des fins de grenailage laser, il est possible de prévoir également pour la formation de la couche de confinement, une buse d'eau 14 alimentée par un réservoir d'eau et une pompe 12 délivrant de l'eau à la buse 14 au moyen d'un tuyau 13. L'eau n'est pas obligatoire et la couche de confinement peut tout aussi bien être obtenue grâce à un gel, une peinture ou un matériau solide transparent à la longueur d'onde des impulsions (par exemple du Quartz). Il est également possible de se passer de la couche de confinement mais cela réduit la profondeur des précontrainte induites par le processus de grenailage laser. La couche de confinement n'est par ailleurs pas utile dans les applications autres que le grenailage laser.

Le système 10 peut également comprendre des moyens de déplacement (non représentés) d'une extrémité distale du dispositif fibré. Lorsqu'on a besoin de générer des chocs laser à différents emplacements d'un matériau, par exemple dans différentes zones d'une surface dans le cas du traitement d'une surface, on peut déplacer le matériau ou déplacer l'extrémité distale du dispositif fibré, c'est-à-dire l'extrémité opposée à l'extrémité proximale placée du côté de la source et réaliser ainsi un balayage spatial de la surface à traiter par les impulsions laser amplifiées.

Les FIGS. 2A – 2C illustrent différents modes de pompage de l'amplificateur optique d'un système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description.

L'amplificateur optique 120 comprend par exemple un barreau amplificateur 20, par exemple comprenant un matériau de type Nd : YAG, Yb : YSO, Nd :YLF ou tout autre

matériau connu pour l'amplification optique. Typiquement, les dimensions d'un tel barreau amplificateur sont comprises entre 5-10 mm de diamètre est une longueur inférieure à 10 cm.

Dans l'exemple de la FIG. 2A, comme dans l'exemple de la FIG. 2B, le faisceau de pompe I_P est copropagatif avec les impulsions laser I_L , c'est-à-dire que le faisceau de pompe est injecté dans le dispositif fibré 110, comme dans l'exemple de la FIG. 1. Un pompage copropagatif est particulièrement avantageux afin de maximiser le recouvrement entre le faisceau laser de pompe et les impulsions laser à amplifier. Ainsi le processus d'amplification est plus efficace et permet d'optimiser l'énergie de pompe nécessaire.

Dans le cas des FIGS 2A, 2B, un filtre spectral 21 permet de couper le faisceau de pompe en sortie de l'amplificateur optique pour n'illuminer la pièce à traiter qu'avec les impulsions amplifiées I_L .

La FIG. 2C décrit un exemple dans lequel le pompage optique est transverse, effectué par exemple au moyen de diodes laser individuelles fibrées. Ce type de pompage n'est pas adapté à un transport copropagatif entre la pompe I_P et le signal I_L . Cette variante permet d'amener plus d'énergie de pompe en utilisant, par exemple, une fibre optique par diode de pompe.

Dans tous les cas, une mise en forme spatiale des impulsions en sortie de l'amplificateur 120 est possible au moyen d'un composant optique 22, par exemple un composant optique diffractif, par exemple de type DOE (pour « Diffractive Optic Element »), un système de microlentille, un condenseur optique, une lentille de Powel. Dans le cas d'un balayage spatial de la pièce à traiter par les impulsions laser amplifiées, cette mise en forme peut permettre par exemple de s'adapter à la géométrie de la pièce à traiter pour minimiser le recouvrement entre les différentes zones de la pièce que l'on souhaite éclairer et ainsi gagner en rapidité.

Les FIG. 3A – 3B d'une part et 4A – 4D d'autre part, illustrent différents moyens de mise en forme temporelle des impulsions en amont du transport par le dispositif fibré, dans un exemple de système de génération d'impulsions de forte puissance crête selon la présente description, visant à réduire la densité spectrale de puissance (DSP) des impulsions laser, soit en multipliant les raies laser des impulsions, soit en élargissant les raies laser.

Une réduction de la DSP permet de limiter les effets non linéaires dans la ou les fibre(s) du dispositif fibré 110 et de réduire la cohérence temporelle des impulsions laser, ce qui permet de limiter les surintensités.

Par exemple, la déposant a montré qu'il pouvait être avantageux dans un système de génération d'impulsions laser de forte puissance crête selon la présente description, de réduire

la DSP de telle sorte à se trouver, pour un diamètre de fibre donné et une longueur donnée du dispositif fibré, en-dessous du seuil de rétrodiffusion Brillouin stimulée dans le dispositif fibré.

En effet, sous l'effet de la température, les molécules qui constituent la fibre optique effectuent des petits déplacements autour de leur position d'origine. Cela entraîne l'apparition de phonons qui modifient l'indice de réfraction du cœur de la fibre, sous forme d'ondes acoustiques de faible amplitude. Lorsqu'une onde lumineuse traverse ce milieu, elle est diffusée par ces ondes acoustiques et la diffusion s'accompagne d'un effet Doppler du fait de la mobilité des ondes acoustiques (effet Brillouin spontané). Lorsque l'onde diffusée se propage dans le même sens que l'onde optique incidente on parle d'onde Stokes. Lorsque l'onde diffusée se propage dans un sens opposé à l'onde incidente, on parle d'onde anti-Stokes.

Lorsque l'onde incidente est très énergétique, en interférant avec l'onde Stokes, elle va créer une modulation d'intensité et un réseau d'indice très contrasté dans la fibre. Ce phénomène, appelé électrostriction, s'accompagne d'une diffusion stimulée qui a un gain exponentiel pour l'onde anti-Stokes ; on parle du Gain Brillouin Stimulé. L'onde stimulée est rétrodiffusée sous forme d'une onde contra-propagative entraînant ainsi des pertes énergétiques importantes pour l'onde transmise dans la fibre.

Le gain Brillouin stimulé n'apparaît que pour une intensité lumineuse guidée dans la fibre supérieure à une intensité seuil appelée seuil Brillouin (P_{th}). Au-delà du seuil Brillouin, l'intensité de l'onde rétrodiffusée en sens inverse augmente de façon exponentielle. Le seuil Brillouin est défini par (voir par exemple P. Singh et al. « *nonlinear scattering effects in optical fibers* », Progress In Electromagnetics Research, PIER 74, 379–405, 2007):

$$P_{th} = \frac{21 \cdot K \cdot A_{eff}}{g_B \cdot L_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu \otimes \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

Où A_{eff} est l'aire effective du cœur de la fibre, L_{eff} est la longueur effective de la fibre, K est une constante liée à la polarisation des rayonnements transportée pouvant varier de 1 à 2 et g_B est le gain Brillouin, $\Delta\nu$ est la largeur du spectre injecté des dites premières impulsions dans la fibre (étendue spectrale de la DSP) et $\Delta\nu_B$ est la largeur du gain Brillouin. Pour une onde monochromatique et à température ambiante, le gain Brillouin a une largeur de l'ordre de 20 MHz. Ainsi, si le spectre incident est décalé (ou élargi) sur plus de 20 MHz, l'effet Brillouin stimulé tend à diminuer. Autrement dit, plus les ondes lumineuses sont monochromatiques (avec une grande cohérence temporelle) plus l'effet Brillouin stimulé apparaît facilement.

L'équation ci-dessus montre que pour des diamètres de cœur de fibres petits du dispositif fibré (ce qu'on recherche pour gagner en souplesse), le seuil Brillouin est abaissé. Pour augmenter le seuil Brillouin, on peut chercher par exemple à élargir le spectre de la ou des raie(s) laser contenues dans les impulsions laser injectées dans le dispositif fibré ou multiplier cette ou ces raie(s).

Les FIGS. 3A – 3B illustrent des exemples de module 102 de mise en forme temporelle visant à multiplier la ou les raie(s) laser des impulsions laser injectées dans le dispositif fibré.

Ces exemples permettent une multiplication des raies laser conduisant à une diminution de la cohérence temporelle. Cela permet notamment d'augmenter le seuil Brillouin et diminuer le contraste du speckle en entrée du dispositif fibré.

L'exemple de la FIG. 3A est basé sur l'utilisation d'un modulateur acousto-optique 33 (MAO, ou AOM selon l'abréviation de l'expression anglo-saxonne « acousto-optic modulator »), utilisant l'effet acousto-optique pour diffracter et changer la fréquence optique de la lumière par ondes sonores (généralement proche des fréquences radio).

Plus précisément, le module 102 comprend un cube séparateur de polarisation 31 qui transmet les impulsions laser I_L polarisées linéairement, de spectre S_0 , vers le modulateur acousto-optique 33. Le modulateur 33 reçoit un signal issu d'un générateur électrique radiofréquence polychromatique 32. Des faisceaux diffractés F_1, F_2, \dots sont issus du modulateur 33. Si N radiofréquences constituent le signal RF polychromatique délivré par le générateur 32 et alimentant le modulateur acousto-optique 33, il est possible d'avoir jusqu'à N faisceaux diffractés dans N directions différentes en sortie du modulateur 33. Chaque faisceau diffracté est associé à une direction et a subi un décalage spectral correspondant à l'une des N radiofréquences constituant le signal RF polychromatique délivré par le générateur 32. Plus la fréquence RF est importante plus le décalage spectral et angulaire subi par le faisceau en sortie du modulateur 33 est important. Ainsi, un éventail de faisceaux discrets sont émis en sortie du modulateur 33. Cet éventail de faisceaux discrets peut être recollimaté par un système optique 34, par exemple une lentille optique. Les faisceaux ainsi collimatés passent à travers une lame quart d'onde 34 qui transforme la polarisation linéaire en une polarisation circulaire. Un miroir 36 est disposé en sortie de la lame quart d'onde pour former une configuration d'auto-collimation. Cette configuration optique permet un retour inverse des faisceaux vers le modulateur 33. Les impulsions retour retraversent la lame 35. Elles ont alors une polarisation à 90° de la polarisation initiale. En suivant le chemin inverse, elles traversent de nouveau la lentille 34 pour être acheminées dans le modulateur 33. Les

faisceaux subiront à nouveau des décalages angulaires et spectraux, le décalage spectral au retour s'ajoutant au décalage spectral subi à l'aller. Chacun des faisceaux décalés spectralement est renvoyé vers le cube séparateur de polarisation 31 et dirigé vers le dispositif fibré (non représenté sur la FIG. 3A). Le spectre résultant S_1 est élargi, comme illustré sur le schéma de la FIG. 3A du fait des différentes raies formées par le module 102 ainsi représenté.

Par exemple, si le signal polychromatique radiofréquence comprend 3 radiofréquences distinctes ν_1, ν_2, ν_3 , comprises typiquement entre 35 MHz et 350 MHz, le spectre S_1 des impulsions de sortie comprendra un peigne de fréquences optiques $\nu_0 + 2\nu_1, \nu_0 + 2\nu_2, \nu_0 + 2\nu_3$, où ν_0 est la fréquence optique centrale des impulsions émises par la source 101. Par contre le faisceau en sortie présentera une direction unique. Si les impulsions laser issues de la source 101 comprennent déjà une pluralité de raies, ces raies seront chacune multipliées comme décrit précédemment. Notons que la bande passante des amplificateurs optiques envisagés est largement supérieure aux décalages réalisés par les MAOs, les impulsions laser résultant de cette mise en forme temporelle pourront être amplifiées par l'amplificateur optique. Par exemple, un cristal de Nd :YAG possède une bande passante d'amplification de près de 30 GHz autour de 1064 nm.

Un autre montage permettant de multiplier les raies des premières impulsions laser est illustré sur la FIG. 3B.

Dans cet exemple, le module de mise en forme temporelle comprend un modulateur d'amplitude ou de phase 37 configuré pour moduler les impulsions incidentes I_L en intensité. Le modulateur d'amplitude 37 comprend par exemple une cellule de Pockels. Si l'intensité est modulée avec un signal radiofréquence polychromatique 38, le spectre S_2 en sortie de module sera enrichi des composantes spectrales issues du signal RF polychromatique 38. Ceci a pour effet d'élargir le spectre en multipliant les raies laser et la densité spectrale de puissance des impulsions issues de la source 101.

La réduction de la DSP résultant de la multiplication des raies laser comme décrite dans les exemples ci-dessus peut aller d'un facteur 2 à un facteur 10. Ainsi, par exemple, on peut à partir d'un spectre fin de largeur spectrale 100 MHz typiquement, obtenir des impulsions dont la largeur spectrale totale en entrée du dispositif fibré est de l'ordre de plusieurs centaines de MHz, ce qui permet de diminuer significativement le gain Brillouin.

Les FIGS 4A à 4D illustrent des exemples de modules de mise en forme temporelle des premières impulsions laser adaptés permettant l'élargissement du spectre de la ou des raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions.

L'élargissement spectral de la ou des raie(s) laser permet comme précédemment expliqué de diminuer les effets non linéaires dans la ou les fibres du dispositif fibré, notamment l'effet Brillouin stimulé, mais aussi de limiter le risque de surintensités dues à des phénomènes de speckle. En effet, si on élargit le spectre, on réduit la cohérence temporelle et la capacité de la lumière à interférer. Cela permet de réduire le contraste des grains de speckle et donc les surintensités.

Dans les exemples illustrés sur les FIGS 4A à 4D, le module de mise en forme temporelle 102 comprend un dispositif réfléchissant tournant autour d'un axe de rotation donné, configuré pour réfléchir lesdites premières impulsions incidentes avec un élargissement spectral de type Doppler.

Dans l'exemple illustré sur la FIG. 4A, le dispositif réfléchissant tournant comprend un simple miroir 42, agencé dans un plan perpendiculaire à un plan d'incidence Π des premières impulsions I_L . Le miroir 42 est tournant autour d'un axe de rotation 421 perpendiculaire au plan d'incidence Π et contenu dans le plan du miroir. Le miroir tournant peut présenter un mouvement de rotation ou d'oscillation autour de l'axe de rotation 421. Si l'on suppose que les impulsions sont émises avec une fréquence de répétition donnée, la vitesse de rotation ou d'oscillation du miroir est synchronisée avec ladite fréquence de répétition pour que chaque impulsion soit incidente sur le miroir 42 avec le même angle d'incidence. Par exemple, l'angle d'incidence est de 0° par rapport à la normale au miroir, comme cela est représenté sur la FIG. 4A. l'angle d'incidence n'est pas nécessairement nul mais un angle nul est plus avantageux dans le cas d'un simple miroir.

Dans l'exemple de la FIG. 4A, un élément séparateur de polarisation 40 associé à une lame quart d'onde 41 permet de séparer d'une part les impulsions incidentes sur le miroir tournant 42 et d'autre part les impulsions réfléchies par le miroir 42.

Comme représenté que la FIG. 4A, les impulsions incidentes sur le miroir tournant 42 présentent par exemple un spectre S_0 centré sur une fréquence optique ν_0 et avec une finesse spectrale donnée (courbe 401). Par ailleurs, la courbe 402 indique de façon schématique la répartition spatiale de l'intensité $I(r)$ d'une impulsion incidente (trait fin) et la répartition spatiale de la fréquence optique $\nu(r)$ (trait épais). Comme cela est visible sur la courbe 402, la répartition spatiale de la fréquence optique est constante, par exemple égale à ν_0 .

Lorsqu'une impulsion laser est incidente sur le miroir tournant 42, elle subit un décalage de fréquence Doppler $\Delta\nu_D$ variable avec le profil spatial du faisceau. En effet, spatialement, chaque point du faisceau incident sur le miroir tournant subit un décalage

doppler induit par la vitesse angulaire du miroir $\delta\theta/\delta t$. Or la vitesse angulaire varie en fonction de la distance r entre un point de miroir et l'axe de rotation.

La courbe 404 illustre ainsi de façon schématique la variation de la fréquence $\nu(r)$ de l'impulsion réfléchie résultant du décalage de fréquence Doppler $\Delta\nu_D$ variable en fonction de r .

Notons D_f le diamètre du faisceau incident sur le miroir en rotation. La partie haute du faisceau se trouvant à une distance $r=D_f/2$ subit un décalage Doppler négatif :

$$\Delta\nu_D\left(\frac{D_f}{2}\right) = \nu_0 - \nu_1,$$

où ν_0 et ν_1 sont respectivement les fréquences optiques du faisceau aux distances $r=0$ et $r=D_f/2$ de l'axe de rotation. La partie basse du faisceau se trouvant à la distance $r=-D_f/2$ subit un décalage Doppler positif :

$$\Delta\nu_D\left(\frac{-D_f}{2}\right) = \nu_2 - \nu_0,$$

où ν_2 est la fréquence optique du faisceau à la distance $r=-D_f/2$ de l'axe de rotation. Notons que le centre du faisceau se situant à une distance $r=0$ de l'axe de rotation subit un décalage Doppler nul.

Dans le cas du miroir tournant représenté sur la FIG. 4A, on peut montrer que l'amplitude total du de l'élargissement Doppler $\Delta\nu_D$ est maximisé lorsque $D_f \sim D_M$ (D_M diamètre du miroir). Dans ce cas l'amplitude du décalage Doppler est égal à :

$$\Delta\nu_D = \Delta\nu_D\left(\frac{D_f}{2}\right) - \Delta\nu_D\left(\frac{-D_f}{2}\right) = \frac{2\pi D_M}{\lambda} \cdot \frac{\delta\theta}{60}$$

$\delta\theta$ vitesse de rotation (ou d'oscillation) en RPM (1 RPM = 2π rad/min = $2\pi/60$ rad/s), λ longueur d'onde. On suppose dans cet exemple. $\Delta\nu_D\left(\frac{D_f}{2}\right)$ et $\Delta\nu_D\left(\frac{-D_f}{2}\right)$ correspondent aux décalages Doppler subit à chaque extrémité du miroir.

Ainsi, il est possible d'associer à chaque cordonnée spatiale r du faisceau une fréquence optique résultante qui lui est propre. Cet effet Doppler variable spatialement entraîne un élargissement spectral de la raie laser des impulsions (spectre S_3), comme illustré sur la courbe 403.

Les FIGS 4B à 4D illustrent d'autres exemples de dispositifs réfléchissants en rotation. Dans ces exemples, le dispositif réfléchissant tournant comprend plusieurs surfaces réfléchissantes agencées par exemple selon les faces d'un polygone. Le dispositif réfléchissant tournant comprend en outre des miroirs fixes de renvoi des impulsions laser permettant de renvoyer chaque impulsion d'une première surface réfléchissante en rotation à la suivante. Les surfaces réfléchissantes et les miroirs de renvoi sont par exemple agencés

dans des plans perpendiculaires à un plan d'incidence Π comprenant les directions des vecteurs d'onde des impulsions incidentes et réfléchies, pour rendre maximal l'effet de décalage Doppler. Les surfaces réfléchissantes présentent un mouvement de rotation ou d'oscillation autour d'un axe de rotation central, perpendiculaire au plan d'incidence, par exemple un axe passant par le barycentre du polygone, dans cet exemple un axe de symétrie du polygone. Dans les exemples présentés ci-dessous, chaque face du polygone tournant forme une surface réfléchissante ; ainsi, le dispositif réfléchissant tournant comprend N surfaces réfléchissantes et $N-1$ miroirs de renvoi. Il est possible d'avoir également N surfaces réfléchissantes ($N \geq 2$) sur un nombre limité de côtés du polygone et toujours $N-1$ miroirs de renvoi. La déposante a montré que cette configuration particulière de « polygone tournant » permettait de multiplier l'élargissement Doppler.

Dans l'exemple de la FIG. 4B, le dispositif réfléchissant tournant 43 comprend 4 surfaces réfléchissantes 431 agencées en carré, en rotation autour d'un axe de symétrie 432 et 3 miroirs de renvoi 433 ; Dans l'exemple de la FIG. 4C, le dispositif réfléchissant tournant 44 comprend 6 surfaces réfléchissantes 441 agencées selon un hexagone, en rotation autour d'un axe de symétrie 442, et 5 miroirs de renvoi 443; Dans l'exemple de la FIG. 4D, le dispositif réfléchissant tournant 45 comprend 8 surfaces réfléchissantes 451 agencées en octogone, en rotation autour d'un axe de symétrie 452, et 7 miroirs de renvoi 453. De façon générale, le dispositif réfléchissant tournant pourra comprendre N surfaces réfléchissantes, avec N compris entre 2 et 10 et $N-1$ miroirs de renvoi. Dans les exemples illustrés sur les FIGS 4B à 4D, on note respectivement S_4 , S_5 , S_6 les spectres résultants (courbes 405, 406, 407 respectivement).

Comme illustré sur les FIGS 4B – 4D, les impulsions laser I_L sont incidentes sur une surface réfléchissante du polygone avec un angle θ par rapport à la normale à la surface. Les impulsions lasers sont synchronisés temporellement avec la rotation ou l'oscillation du dispositif réfléchissant tournant de telle sorte que chaque impulsion incidente présente le même angle d'incidence avec l'une des surfaces réfléchissantes.

Afin de rendre maximal l'étalement spectral par effet Doppler, on peut prévoir que le faisceau lumineux formé des impulsions laser incident sur chaque surface réfléchissante présente un diamètre inférieur ou égale à :

$$D_f = D_M \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\theta)$$

Où D_M est un diamètre externe du polygone dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation et α est le demi angle entre le centre du polygone et une de ces facettes Le dispositif réfléchissant tournant présente une vitesse angulaire $\delta\theta$, θ est l'angle d'incidence du faisceau

par rapport à la normal à une facette réfléchissante. Chaque facette en rotation va décaler par effet Doppler la fréquence optique du rayonnement qui s'y réfléchit. Comme dans l'exemple de la FIG. 4A, le décalage Doppler subi par le faisceau est différent suivant le profil spatial du faisceau. En effet, spatialement, chaque point du faisceau incident sur une face réfléchissante subi un décalage Doppler induit par la vitesse angulaire de la face réfléchissante. Dans le cas ou faisceau arrive dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation, l'amplitude total de l'élargissement Doppler peut être maximisé. Il est alors déterminé par l'expression ci-dessous :

$$\Delta v_D = \Delta v_D \left(\frac{D_f}{2} \right) - \Delta v_D \left(\frac{-D_f}{2} \right) = \frac{2\pi D_M}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) \cos(\theta) \frac{\delta\theta}{60}$$

Grâce à la géométrie de polygone du dispositif réfléchissant tournant, les impulsions lumineuses peuvent se réfléchir sur chacune des faces réfléchissantes du polygone et il est possible de multiplier l'effet d'étalement spectral par effet Doppler. Ainsi, pour un polygone présentant N faces réfléchissantes, le spectre d'une raie incidente sur le dispositif réfléchissant tournant subira un élargissement dû à l'effet Doppler s'exprimant de la façon suivante :

$$\Delta v_D = \frac{N \cdot 2\pi D_M}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) \cos(\theta) \frac{\delta\theta}{60}$$

Par exemple, on considère des impulsions laser à 1064 nm présentant une durée d'impulsion de 20 ns et dont le spectre est limité par transformée de Fourier (largeur spectrale 50 MHz). Si le pulse laser est synchronisé temporellement avec un octogone en rotation à 55 000 rpm (rpm = rotation par minute soit 5760 rad/s) présentant un diamètre extérieur de 40 mm de façon à ce que l'angle d'incidence entre le faisceau laser et la normal à la surface aux polygones soit toujours égale à $\theta = 11.25^\circ$ et les impulsions de réfléchissent sur les 8 faces réfléchissantes du polygone alors le spectre du laser sera étalé sur environ 690 MHz. Le dispositif réfléchissant tournant aura ainsi permis d'élargir le spectre incident d'un facteur 13.

Par ailleurs, en plus d'étaler le spectre et de réduire la cohérence temporelle des impulsions laser, les différentes coordonnées spatiales du faisceau se trouvent associées à différentes composantes spectrales, ce qui permet de réduire la cohérence spatiale. Un tel module de mise en forme temporel permet donc ainsi de minimiser les pics de surintensités dus à la cohérence spatio-temporelle de la source. De plus, pour un faisceau à 1064 nm de 20 ns et de diamètre 15 mm, la limite de diffraction est autour de 67 μrad . Or pendant la durée de l'impulsion, si le polygone de 8 facettes tournant à 55000 RPM (5760 rad/s), le faisceau subit un balayage pendant sa durée de 20 ns égale à 115 μrad , soit environ 2 fois la limite de diffraction. Cela contribuera à minimiser le contraste du speckle.

Bien entendu, les méthodes présentées ci-dessus pour la réduction de la DSP ne sont pas exhaustives et peuvent être combinées.

Les FIG. 5A et 5B illustrent des exemples de mise en forme spatiale des impulsions laser I_L en amont du transport par le dispositif fibré.

5 Ces deux exemples visent à former un faisceau de profil d'intensité sensiblement uniforme, de type « top hat ». Par exemple, on pourra rechercher une variation spatiale de l'intensité lumineuse est de +/- 10% hors effets granulaires liés au speckle.

10 La FIG. 5A illustre ainsi un premier exemple de module de mise en forme 103 comprenant un DOE (pour « Diffractif Optical Element ») 51 associé à un système optique 52, par exemple une lentille optique, pour réaliser une mise en forme spatiale adaptée à la taille et à la géométrie de la fibre.

15 Sur la FIG. 5A, le profil P_0 représente le profil de l'intensité des impulsions laser émises par une source laser, par exemple de type gaussien. La déposante a montré qu'avec un profil P_1 de type « top hat », comme montré sur la FIG. 5A, on diminue le risque de 20 surintensités lors de la propagation dans le dispositif fibré. La mise en forme spatiale du faisceau dans le plan image du système optique 52 correspond à la transformée de Fourier spatiale du masque de phase imposé par le DOE 51 convoluée avec la transformée de Fourier spatiale de la répartition spatiale d'intensité du faisceau au niveau du DOE. Ainsi, le masque de phase imposé par le DOE 51 est calculé de telle sorte que le résultat de cette convolution 25 forme une répartition d'intensité « top hat », le diamètre D du faisceau étant proportionnel à la distance focale f du système optique 52.

La FIG. 5B illustre une autre variante d'un module de mise en forme spatiale 103. Dans cet exemple, la mise en forme spatiale est réalisée au moyen d'une paire de matrices de microlentilles 53, 54 et d'une lentille convergente 55.

25 La première matrice de microlentilles 53 (distance focal $F_{\mu 1}$) divise le faisceau incident en une multitude de sous-faisceaux. La seconde matrice de microlentilles 54 (distance focale $F_{\mu 2}$) en combinaison avec la lentille convergente 55 joue le rôle d'une matrice d'objectifs qui superpose les images de chacun des sous faisceaux dans un plan dit « plan d'homogénéisation » situé à la distance focale F_L de la lentille convergente. En modifiant la 30 distance entre les deux matrices de microlentilles, la taille de la mise en forme est changée. La géométrie des microlentilles prises individuellement donne la forme de l'image après le plan d'homogénéisation.

Une mise en forme spatiale telle que décrite au moyen des FIGS 5A, 5B permet par comparaison à un profil gaussien de réduire les surintensités en entrée de la fibre multimode

lors de la propagation dans le dispositif fibré. En effet, pour une même énergie et un même diamètre de faisceau, un profil circulaire « top hat » présente une intensité crête inférieure à un profil gaussien.

5 La diminution des surintensités sur le profil de puissance des impulsions laser peut également être obtenue en réduisant la cohérence temporelle des impulsions, comme expliqué précédemment.

La FIG. 6 représente un schéma d'un exemple de réalisation d'un dispositif fibré 60 dans lequel sont agencés tête bêche deux composants connus sous le terme de « lanterne photonique ».

10 Chaque composant ou « lanterne photonique » connecte un cœur de fibre multimode (au moins 20 000 modes) à plusieurs fibres légèrement multimodes (moins de 10 000 modes) ayant des cœurs de plus petits diamètres. L'agencement de ces composants est par exemple décrit dans l'article de D. Noordegraaf. et al. (*“Multi-mode to single mode conversion in a 61 port photonic lantern”*, Optics Express, Vol. 18, No. 5 (2010) pp. 4673 - 4678.). Ainsi, le
15 dispositif fibré 60 décrit sur la FIG. 6 comprend en entrée ladite première fibre multimode 61, un ensemble de fibres légèrement multimodes 62 couplés avec la dite première fibre multimode, et en sortie, une deuxième fibre multimode 63, couplée avec lesdites fibres légèrement multimodes et comprenant un cœur unique pour la sortie desdites premières impulsions laser. Il peut y avoir par exemple entre 10 et 20, avantageusement entre 10 et 100
20 fibres légèrement multimodes.

Un tel dispositif peut présenter des pertes en transmission, typiquement inférieures à 15%, mais présente une très grande souplesse du fait de l'utilisation des fibres légèrement multimodes de plus petit diamètre (typiquement entre 50 μm et 200 μm). Par ailleurs, les pertes peuvent être compensées en utilisant des fibres 62 dopées entre les tronçons mono-cœur d'injection et de couplage (61, 63). Ces pertes pourront également être compensées
25 grâce à l'amplificateur optique 120 en sortie du dispositif fibré.

Ainsi, il est possible au moyen du dispositif fibré 60 d'injecter des impulsions laser de haute énergie (typiquement > 300 mJ pour des pulses de 10 ns) dans un cœur unique et de propager lesdites impulsions jusqu'à la zone à traiter sur plusieurs fibres de plus petit
30 diamètre. Une fois la fonction de transport multifibres réalisé, le rayonnement optique est amplifié au moyen de l'amplificateur optique 120 puis délivré sur la surface à traiter. En délivrant l'énergie à partir d'un cœur unique, l'amplification et la mise en forme du faisceau par un composant d'optique diffractif par exemple de type DOE, système de microlentille, condenseur optique, lentille de Powel, est facilitée.

Par ailleurs, le fait que l'entrée et les sorties du dispositif fibré soient des fibres multimodes avec des cœurs de diamètres importants (typiquement entre 300 μm et 1 mm) sécurise la sensibilité aux endommagements induits par laser pour les faces d'entrée et sortie du dispositif fibré.

5 Bien que décrite à travers un certain nombre d'exemples de réalisation détaillés, les procédés et systèmes de génération d'impulsion de forte puissance crête comprennent différentes variantes, modifications et perfectionnements qui apparaîtront de façon évidente à l'homme de l'art, étant entendu que ces différentes variantes, modifications et perfectionnements font partie de la portée de l'invention, telle que définie par les
10 revendications qui suivent.

REVENDICATIONS

1. Système (10) de génération d'impulsions laser de forte puissance crête comprenant :

- 5 - au moins une première source lumineuse (101) pour l'émission de premières impulsions laser nanosecondes, de durée comprise entre 1 ns et 100 ns (I_L);
- un dispositif fibré (110) pour le transport desdites premières impulsions laser, comprenant au moins une première fibre multimode avec un cœur unique agencé pour recevoir lesdites premières impulsions laser;
- 10 - au moins un premier amplificateur optique (120) agencé en sortie dudit dispositif fibré pour l'amplification optique desdites premières impulsions laser afin de générer lesdites impulsions laser de forte puissance crête.

2. Système de génération d'impulsions laser selon la revendication 1, comprenant en outre un module (102) de mise en forme temporelle desdites premières impulsions laser, agencé en amont du dispositif fibré, configuré pour diminuer la densité spectrale de puissance desdites impulsions par réduction de la cohérence temporelle.

3. Système de génération d'impulsions laser selon la revendication 2, dans lequel ledit module (102) de mise en forme temporelle comprend des moyens configurés pour multiplier la ou les raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions.

4. Système de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications 2 ou 3, dans lequel ledit module (102) de mise en forme temporelle comprend des moyens configurés pour élargir le spectre de la ou des raie(s) laser contenues dans lesdites premières impulsions.

5. Système de génération d'impulsions laser selon la revendication 4, dans lequel lesdits moyens comprennent un dispositif réfléchissant tournant (42 – 45) autour d'un axe de rotation donné, configuré pour réfléchir lesdites premières impulsions incidentes avec un élargissement spectral de type Doppler.

6. Système de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre un module (103) de mise en forme

spatiale desdites premières impulsions laser, agencé en amont du dispositif fibré, configuré pour uniformiser la densité spatiale de puissance desdites impulsions.

5 7. Système de génération d'impulsions laser selon la revendication 6, dans lequel ledit module (103) de mise en forme spatiale comprend un élément optique diffractif (51) et un système optique (52), l'élément optique diffractif étant configuré pour former une répartition spatiale d'intensité de type « top hat » pour lesdites impulsions.

10 8. Système de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant en outre au moins une source lumineuse (104) pour l'émission d'au moins un premier faisceau laser de pompe, destiné au pompage optique dudit au moins un premier amplificateur.

15 9. Système de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit dispositif fibré (110) comprend en entrée ladite première fibre multimode, un ensemble de fibres légèrement multimodes couplés avec la dite première fibre multimode, et en sortie, une deuxième fibre multimode, couplée avec lesdites fibres légèrement multimodes et comprenant un cœur unique pour la sortie desdites premières impulsions laser.

10 10. Système de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit dispositif fibré (110) comprend au moins une fibre dopée pour la pré-amplification optique desdites premières impulsions laser.

20 11. Procédé de génération d'impulsions laser de forte puissance crête comprenant :

- l'émission de premières impulsions laser nanosecondes, de durée comprise entre 1 ns et 100 ns;
- le transport desdites premières impulsions laser par un dispositif fibré comprenant au moins une première fibre multimode avec un cœur unique dans lequel sont injectées
- 25 lesdites premières impulsions laser;
- l'amplification optique desdites premières impulsions laser au moyen d'au moins un premier amplificateur optique agencé en sortie du dispositif fibré pour former lesdites impulsions laser de forte puissance crête.

12. Procédé de génération d'impulsions laser selon la revendication 11, comprenant en outre la mise en forme temporelle desdites premières impulsions laser en amont du transport par le dispositif fibré, ladite mise en forme temporelle comprenant la réduction de la densité spectrale de puissance par réduction de la cohérence temporelle desdites premières impulsions laser.

5

13. Procédé de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications 11 ou 12, comprenant en outre la mise en forme spatiale desdites premières impulsions laser en amont du transport par le dispositif fibré, ladite mise en forme spatiale comprenant l'uniformisation de la densité spatiale de puissance desdites premières impulsions laser.

10

14. Procédé de génération d'impulsions laser selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, comprenant en outre l'injection dans ledit dispositif fibré d'au moins un faisceau laser de pompe pour le pompage dudit au moins un premier amplificateur optique.

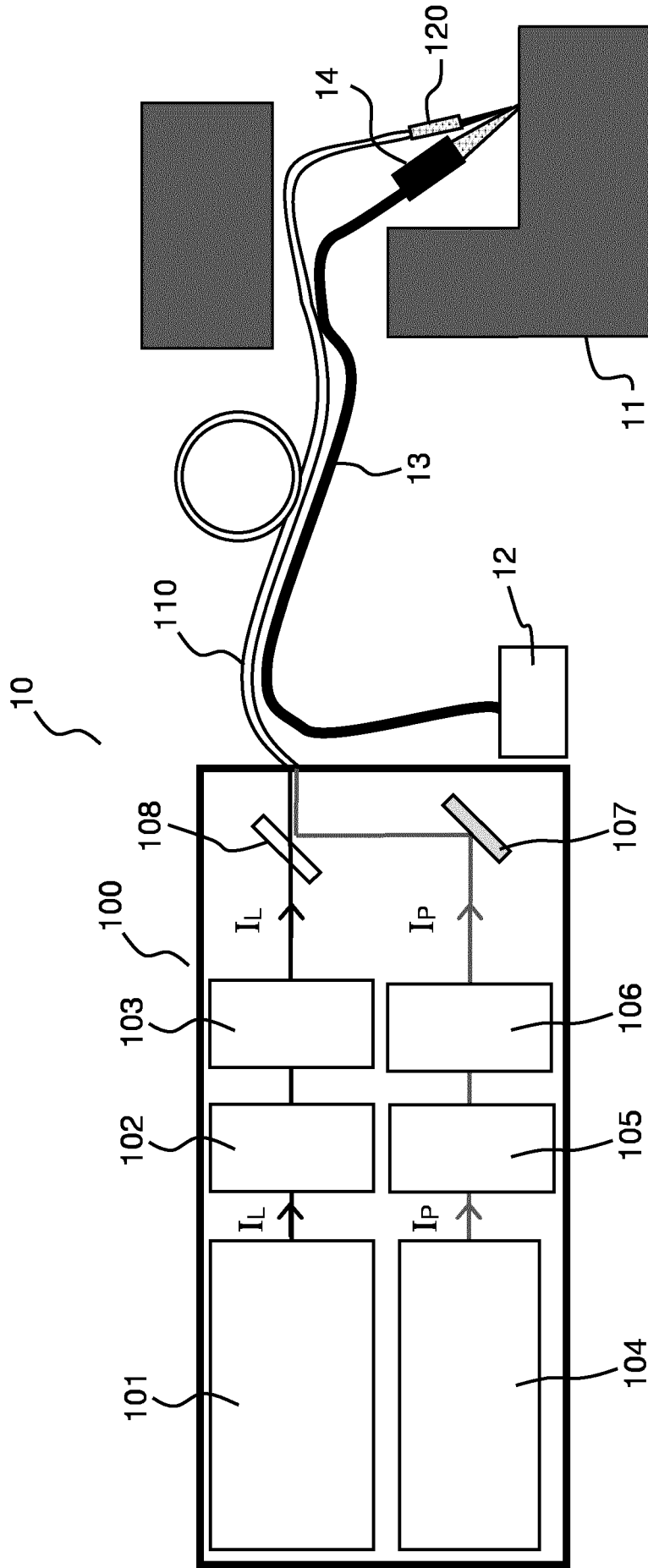


FIG.1

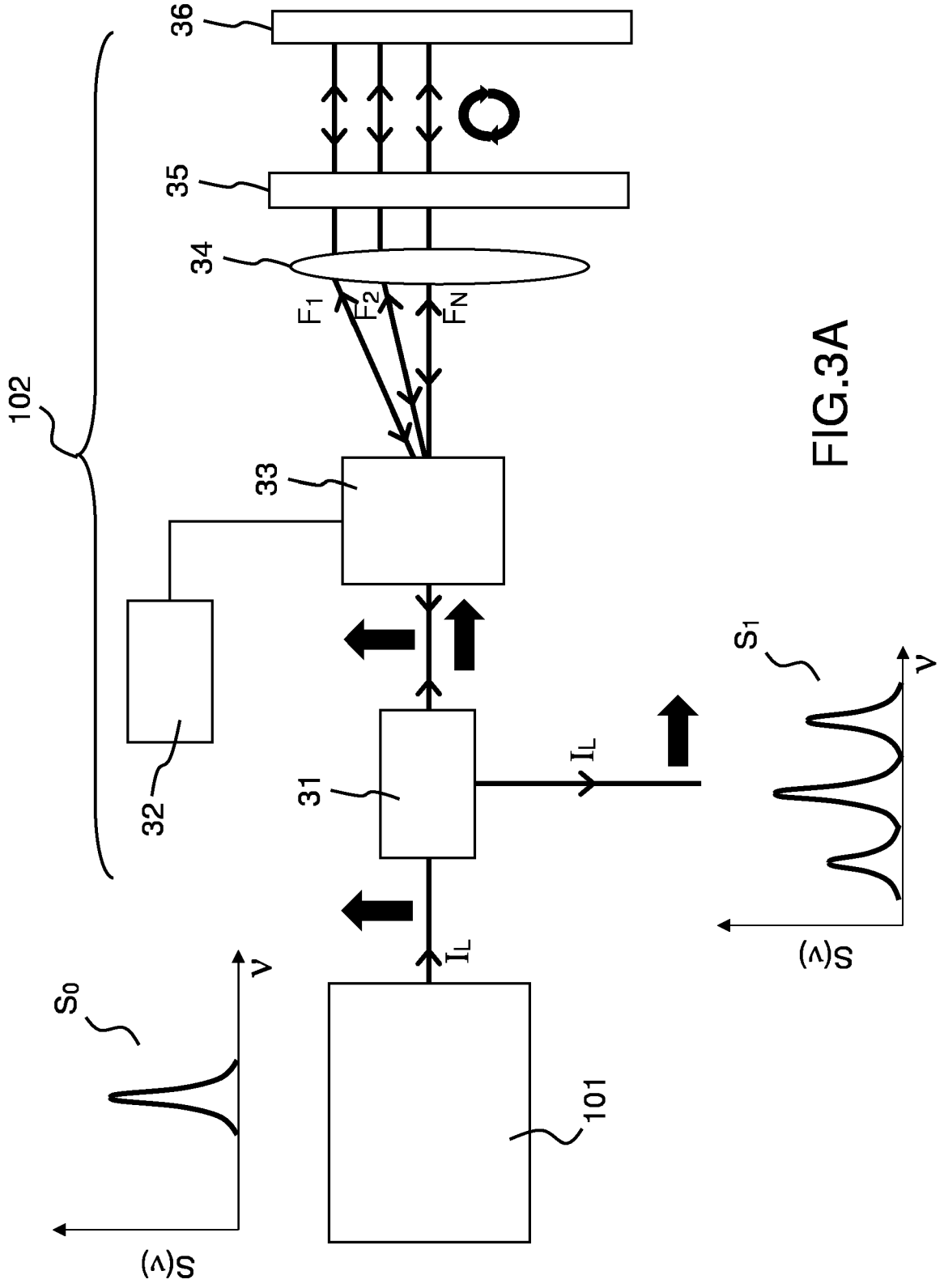


FIG.3A

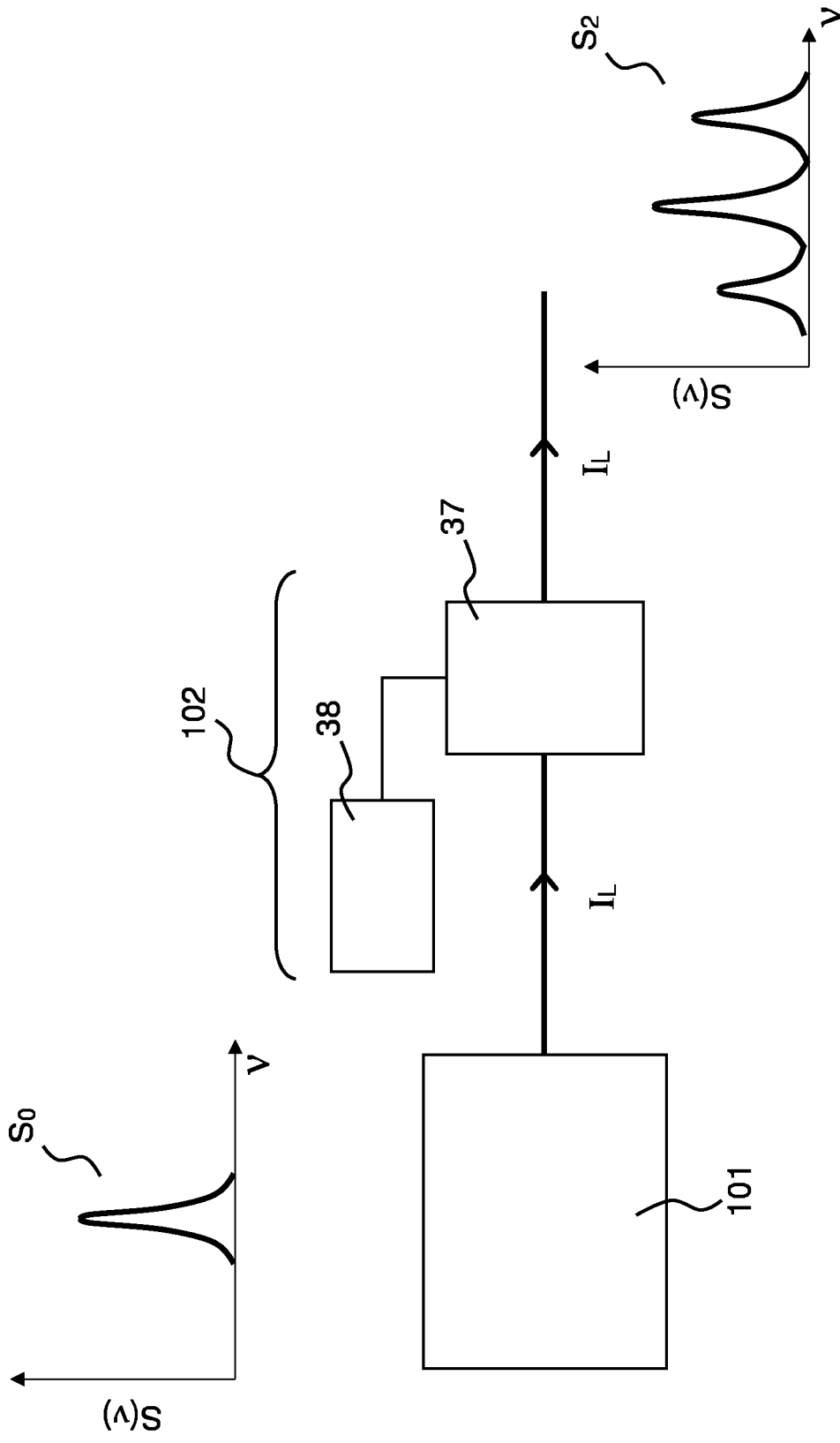


FIG.3B

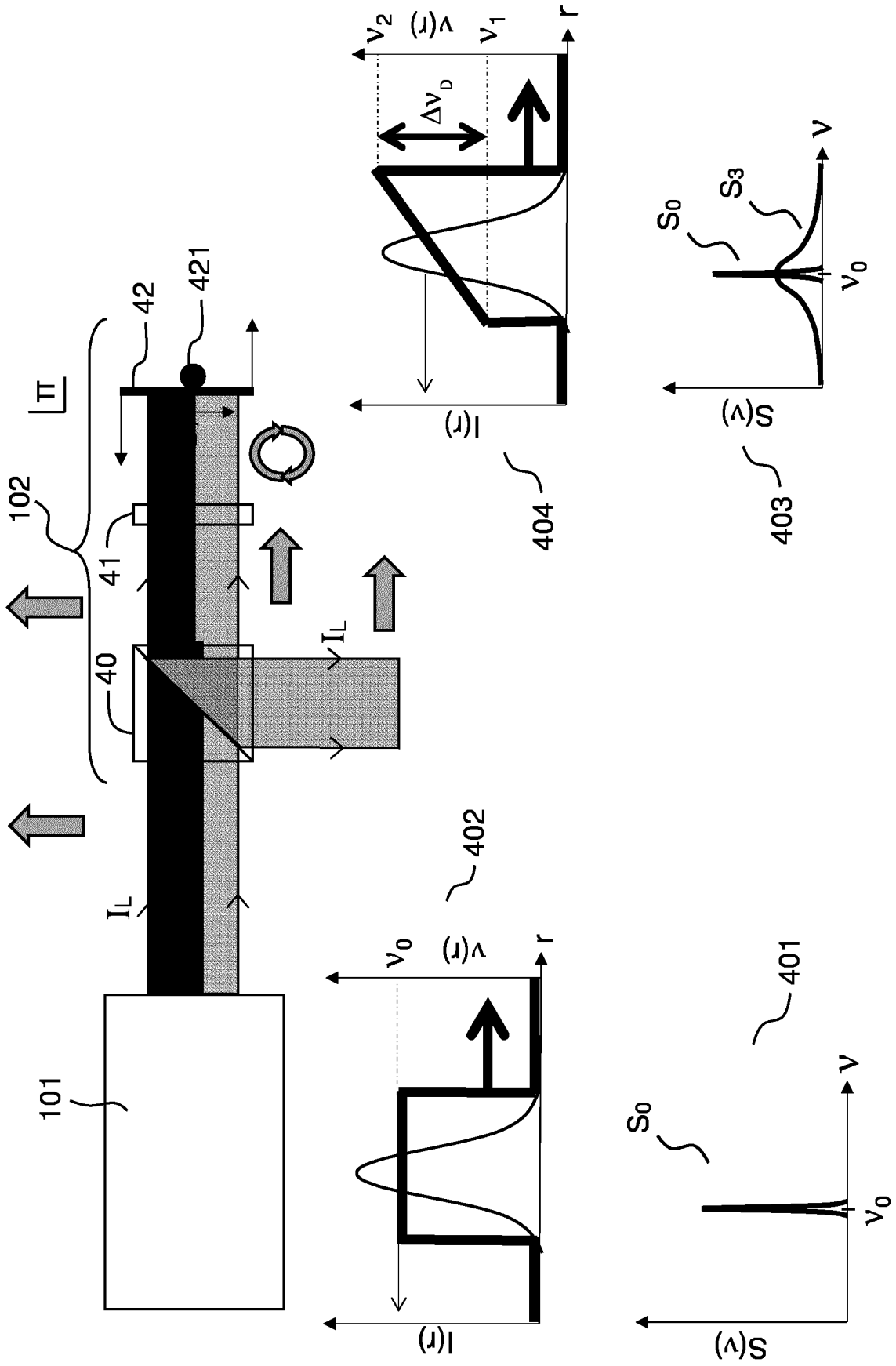


FIG.4A

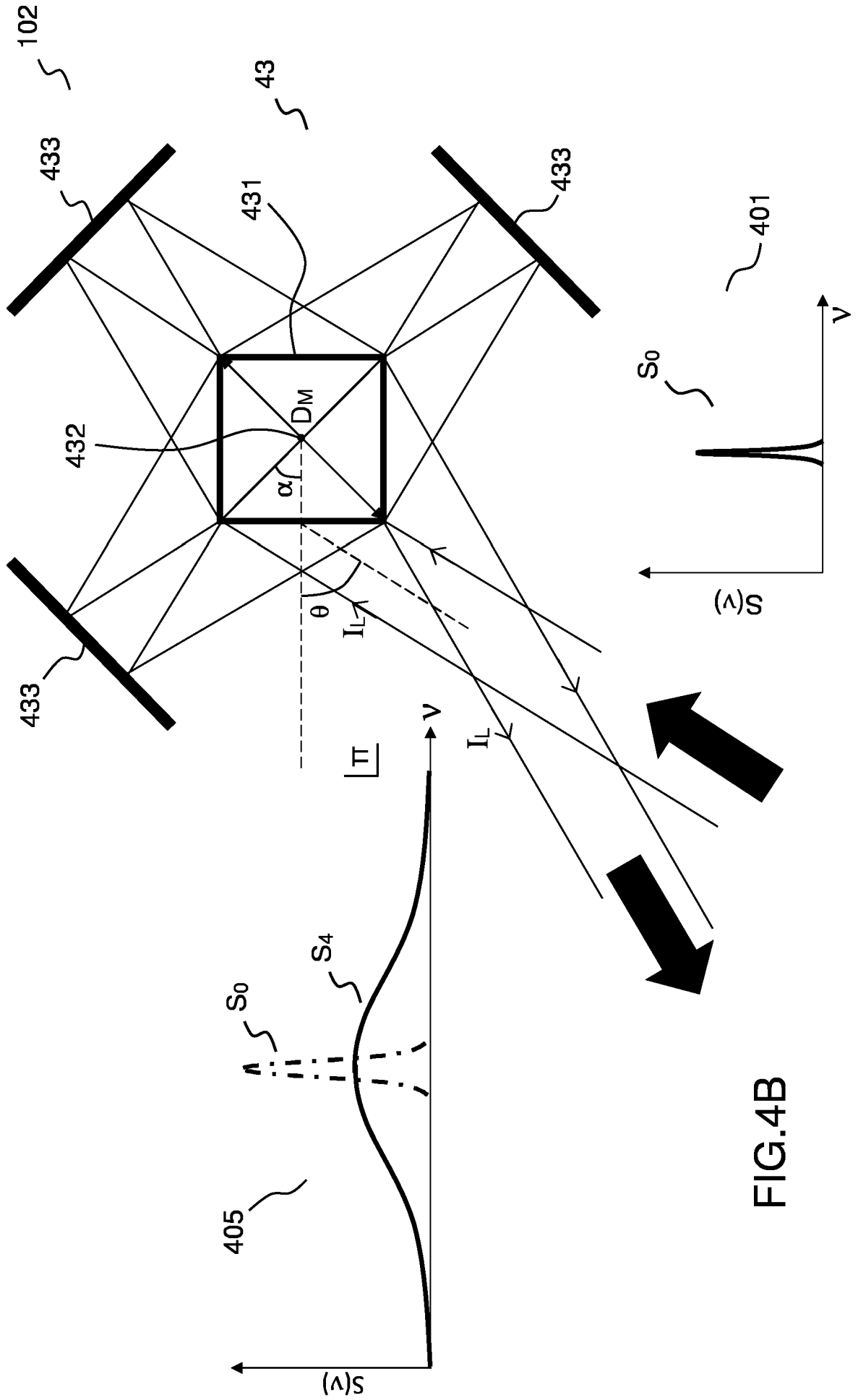


FIG.4B

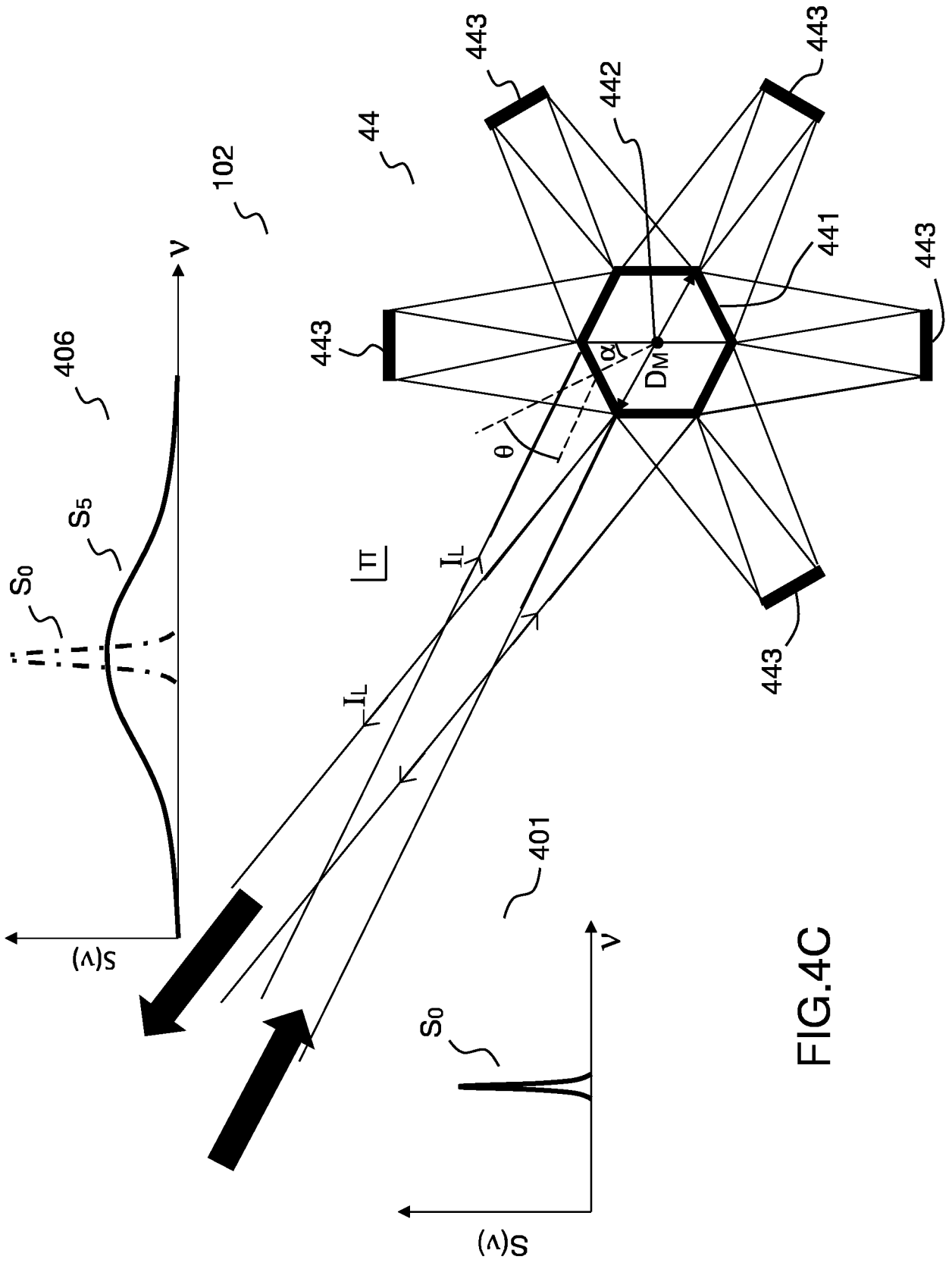


FIG.4C

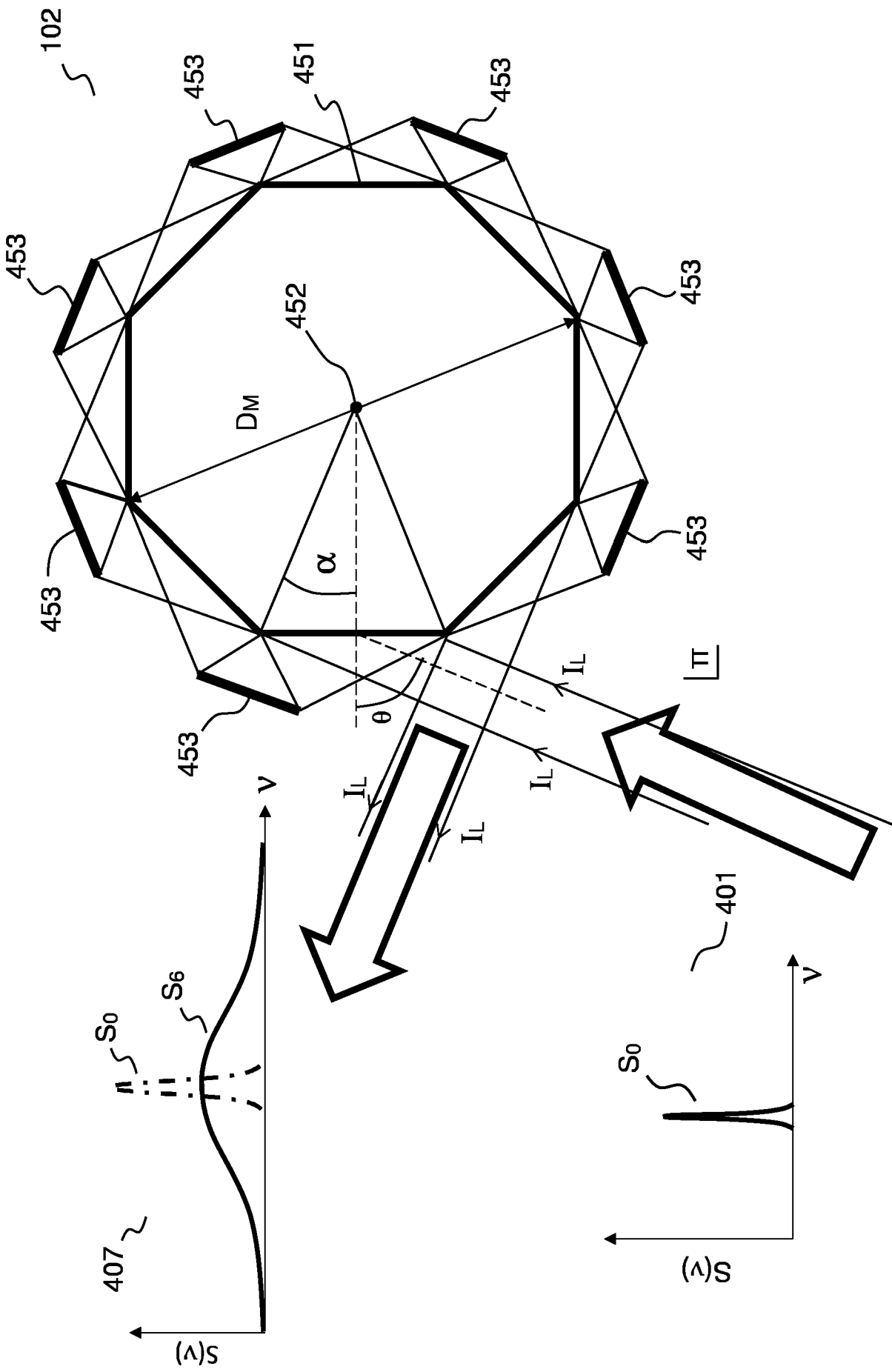


FIG.4D

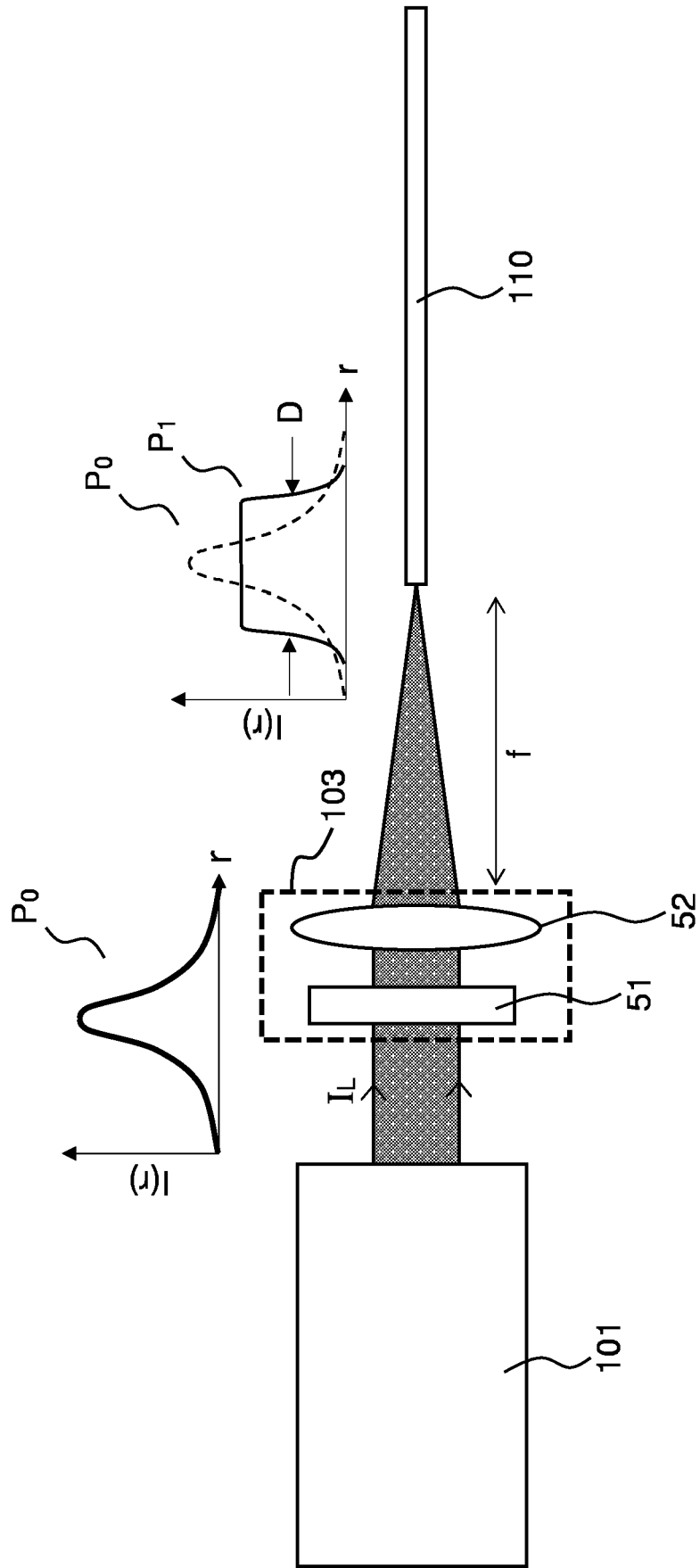


FIG.5A

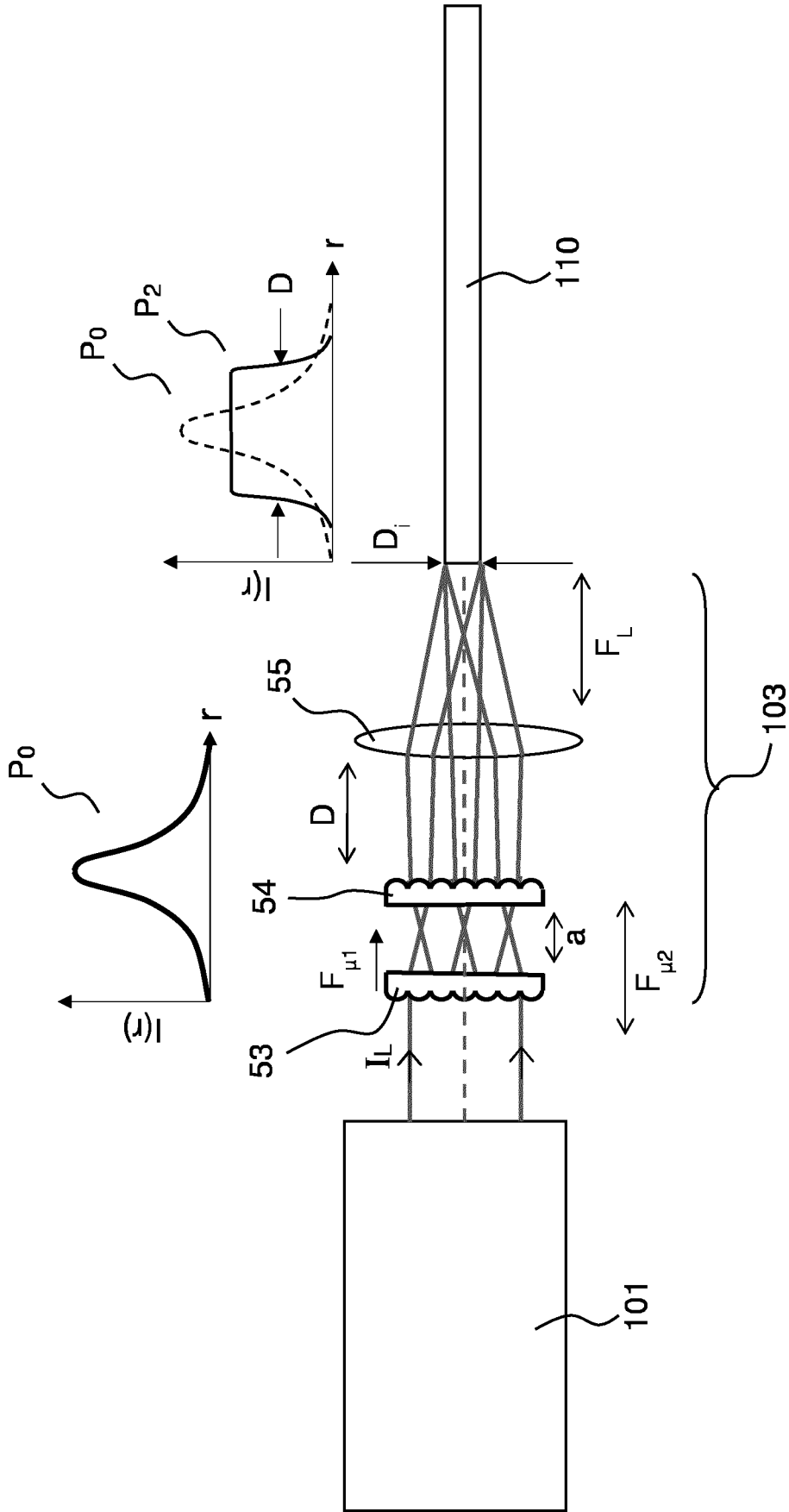


FIG.5B

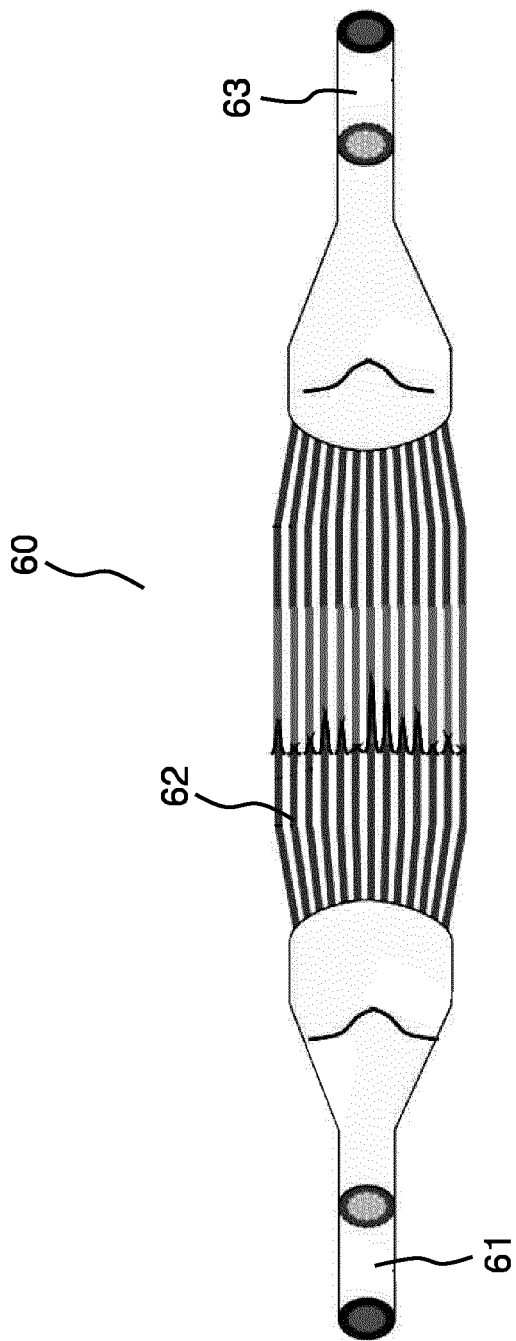


FIG.6

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

US 2014/293404 A1 (PIERROT SIMONETTE [FR]
ET AL) 2 octobre 2014 (2014-10-02)

US 2004/150887 A1 (HIRAI TAKAYUKI [JP])
5 août 2004 (2004-08-05)

VISHWA PAL ET AL: "Generating flat-top
beams with extended depth of focus",
APPLIED OPTICS,
vol. 57, no. 16, 1 juin 2018 (2018-06-01),
page 4583, XP055557499,
US
ISSN: 1559-128X, DOI: 10.1364/AO.57.004583

EP 3 029 860 A1 (ALCATEL LUCENT [FR])
8 juin 2016 (2016-06-08)

US 2018/080770 A1 (CHAMOUN JACOB N [US] ET
AL) 22 mars 2018 (2018-03-22)

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