

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
26 octobre 2006 (26.10.2006)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2006/111684 A2

(51) Classification internationale des brevets :
H01S 3/23 (2006.01) **H01S 3/067** (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2006/050358

(22) Date de dépôt international : 19 avril 2006 (19.04.2006)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
05 50997 19 avril 2005 (19.04.2005) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **FEM-LIGHT** [FR/FR]; 351 Cours De La Libération, F-33405 Talence (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **METIVIER, Philippe** [FR/FR]; 52 Avenue du Grésivaudan, F-38700 Corenc (FR).

(74) Mandataires : **MICHELET, Alain** etc.; Cabinet HARLE et PHELIP, 7 rue de Madrid, F-75008 Paris (FR).

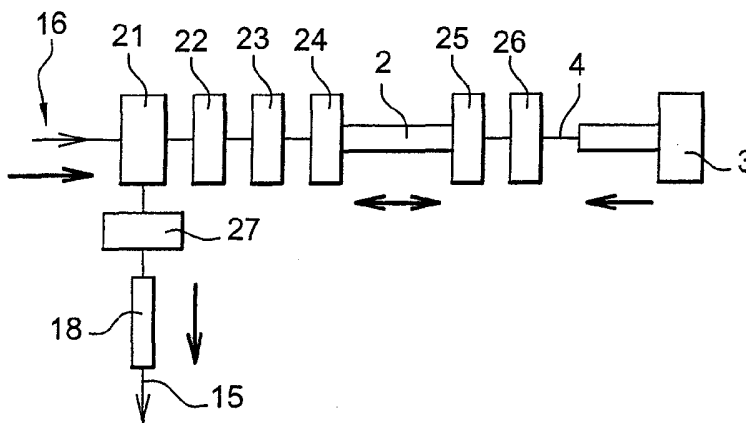
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: DEVICE FOR GENERATING LASER IMPULSES AMPLIFIED BY OPTICAL FIBRES PROVIDED WITH PHOTON LAYERS

(54) Titre : DISPOSITIF DE GENERATION D'IMPULSIONS LASER AMPLIFIEES PAR FIBRES OPTIQUES A COUCHES PHOTONIQUES



(57) Abstract: The invention relates to a device for generating amplified laser pulses comprising at least one pulse laser controlled by means of a switch unit transmitting a spatially multiplex master laser beam into elementary laser beams which are amplified in a parallel manner by at least two optical amplifiers, wherein each amplified elementary laser beam is directed to a single focussing volume. According to said invention, each optical amplifier (12) comprises a fibre with photon layers (2), at least one laser diode optical pumping means (3, 5) producing at least one pump wave (4) for longitudinally pumping said fibre and a means (7) for focussing the amplified beam (15) produced by the fibre in a focussing volume and a silica or glass elongated fibre comprising a doped core, wherein each optical amplifier is continuously pumped and the generation of amplified optical pulses is obtainable directly by the pulse laser. The inventive device has a multiplexing, parallel amplification and each beam focussing configuration for guaranteeing the synchronisation of the optical pulses produced by the assembly of fibre optical amplifiers in such a way that they come up according to a predetermined time sequence in the focussing volume.

[Suite sur la page suivante]

WO 2006/111684 A2



RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) Abrégé : L'invention concerne un dispositif de génération d'impulsions laser amplifiées comportant au moins un laser impulsionnel piloté par au moins un moyen de déclenchement émettant un faisceau laser maître multiplexe spatialement en des faisceaux laser élémentaires qui sont amplifiés en parallèle par au moins deux amplificateurs optiques, chacun des faisceaux laser élémentaires amplifiés étant dirigé vers un volume de focalisation unique. Selon l'invention, chaque amplificateur (12) optique comporte une fibre à couches photoniques (2), au moins un moyen de pompage (3, 5) optique à diodes laser produisant au moins une onde de pompe (4) pour pompage longitudinal de ladite fibre et un moyen de focaliser (7) dans le volume de focalisation le faisceau amplifié (15) produit par la fibre, la fibre allongée en silice ou verre comportant un cœur dopé, le pompage de chaque amplificateur optique étant en continu et la génération des impulsions optiques amplifiées étant obtenue directement par le laser impulsionnel, ledit dispositif ayant une configuration du multiplexage, de l'amplification parallèle et de la focalisation de chaque faisceau permettant de garantir la synchronisation des impulsions optiques produites par l'ensemble des amplificateurs optiques à fibre afin qu'elles arrivent selon un séquençement temporel prédéterminé dans le volume de focalisation.

Dispositif de génération d'impulsions laser amplifiées par fibres optiques à couches photoniques

La présente invention concerne un dispositif de
5 génération d'impulsions laser par fibres optiques à couches
photoniques. Ces impulsions laser sont dans la gamme de
temps des nanosecondes et la gamme d'énergie des multi-
millijoules. Elle a des applications notamment dans la
10 réalisation de sources secondaires par excitation de plasma
dans les domaines où des rayonnements électromagnétiques
de très courte longueur d'onde, par exemple ultraviolet voire
X, doivent être obtenus comme par exemple pour la
photolithographie de fabrication de composants en
électronique.

15 La course à l'intégration dans le domaine électronique
conduit à la réalisation de structures de puces électroniques
de plus en plus petites. Ces structures sont réalisées par
photolithographie et la réduction de taille nécessite
l'utilisation de sources électromagnétiques à longueurs
20 d'ondes de plus en plus courtes vers les ultraviolets
extrêmes, voire les rayons X. Les plasmas sont un des
moyens de réaliser de telles sources à courte longueur
d'onde.

On connaît dans le domaine des lasers, des
25 amplificateurs optiques à fibre en verre formée d'un cœur
dopé et d'au moins une gaine périphérique qui assure le
guidage d'onde produite. Le cœur est dopé par un ion de
terre rare, Néodyme ou Ytterbium en général. Le guidage est
assuré par la mise en œuvre d'une structure photonique
30 obtenue par un ensemble géométrique de canaux ou
capillaires aériques (trous). Cette structure abaisse
artificiellement l'indice vu par l'onde produite et permet des
propagations mono-modes pour des diamètres de cœur de
fibre de l'ordre de 50µm. Ce diamètre de cœur important
35 permet d'étaler l'énergie de l'onde produite sur une plus

grande surface et de repousser les deux limitations fondamentales des amplificateurs à fibre que sont la tenue au flux et les effets non-linéaires. Avec une telle technologie on peut envisager de produire des impulsions laser avec des énergies de l'ordre de 1mJ à 10mJ tout en gardant des durées d'impulsions courtes grâce à la conception de cette fibre qui permet l'obtention du gain laser sur des longueurs typiques de fibre inférieures à 1m. Une telle fibre qui est dénommée ici fibre laser à couches photoniques ou MPF (« Multiclad Photonic Fiber ») a été présentée dans l'article de J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Hönniger, F. Salin, F. Röser, A. Liem, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, J. Broeng, A. Petersson, and C. Jakobsen, "High-power rod-type photonic crystal fiber laser," Opt. Express **13**, 1055-1058 (2005).

On peut rappeler ici la différence que l'homme de l'art fait entre un laser à solide (« solid-state laser ») et un laser à fibre (« fiber laser »). A cette fin, on peut mentionner les documents suivants : BABUSHKIN et al, Proc. SPIE 2005 Vol 5709 page 98 dans l'introduction ; le Brevet FR 2 859 545 (CEA) aux page 9 lignes 25-32 et page 13 ligne 32 ; ou encore, HEADLEY et al, Proc. SPIE 2005 vol 5709 page 343, aux 5 premières lignes de l'introduction. Il apparaît clairement qu'un laser à solide désigne communément un laser dont le milieu amplificateur est un solide massif (cristallin ou vitreux) se présentant sous la forme d'un bloc de matériau homogène de dimensions au moins millimétriques (généralement appelé barreau) dans lequel l'onde laser se propage librement alors qu'un laser à fibre fait forcément intervenir un milieu amplificateur se présentant sous la forme d'un guide d'onde de dimensions micrométriques dans lequel l'onde laser subit un guidage forcé. Or, la forme de l'onde émise par le laser est fixée par le résonateur et, dans le cas d'un laser à solide, elle subit donc les effets thermiques dans le barreau alors que l'onde émise par un laser à fibre

conserve toutes les propriétés de guidage de la fibre (onde monomode transverse dans le cas d'une fibre mono-mode et multi-mode transverse pour une fibre multi-mode). Il y a donc une différence fondamentale entre un dispositif impliquant un
5 laser à fibre et un laser à solide.

Par ailleurs, l'état de l'art par les demandes de brevet du CEA FR-2 814 599 ou FR-2 859 545, fait apparaître la possibilité d'associer en parallèle plusieurs lasers solides pompés de manière à multiplier la densité lumineuse au point
10 focal d'une cible et de manière à obtenir globalement des énergies impulsionnelles importantes pratiquement impossibles à obtenir avec des structures solides monolithiques classiques garantissant à la fois de tels niveaux d'énergie et une qualité de faisceau requise.

15 On connaît également d'autres documents de l'état de la technique qui sont indiqués à la suite :

- US 5 790 574 (1998 - JMAR) qui concerne une source à verrouillage de modes (« modelocked laser ») et qui produit des trains d'impulsions picosecondes dont le point de
20 focalisation est modifié à très grande vitesse par un système PZT. La source, comme les amplificateurs, présente une structure très classique de barreau laser (notamment en Nd:YAG). Sur la figure 1 de ce document, le laser maître est un laser à verrouillage de modes (« modelocked ») et les
25 impulsions ont des durées sub-nanosecondes. D'autre part, les impulsions sont doublées en fréquence avant d'être focalisées. De plus les différents faisceaux font un léger angle entre eux et ne sont donc pas focalisés en un seul point. Leurs intensités lumineuses ne peuvent donc pas
30 s'additionner imposant à chaque faisceau d'atteindre le minimum requis pour la production de rayonnement X.

- L'article JVS&T jan 2003 Vol 21 n1 pages 280-287 (GAETA & Co - JMAR) concerne un laser à solide Nd:YAG ne présentant aucun amplificateur fibré. La durée des impulsions
35 est sub-nanoseconde. Le taux de répétition est de 300 Hz.

L'intensité sur cible est de l'ordre de $3 \cdot 10^{14} \text{W/cm}^2$, ce qui est environ 10 000 fois trop important pour la production de rayonnement EUV à 13.5 nm.

- L'article Proc. SPIE 2004 Vol 5620 pages 137-146 (TUNNERMANN & Co - Univ Jena) donne des résultats détaillés sur la technologie MPF (« Multiclad Photonic Fiber »). L'ensemble des résultats porte sur des lasers ayant une seule voie (structure linéaire) et il n'est pas fait mention de la possibilité d'utiliser des amplificateurs en parallèle.
- L'article OPTICS EXPRESS avril 2004 Vol 12 n7 pages 1313-1319 (LIMPERT & Co - Univ Jena) présente une solution d'amplification d'impulsions picosecondes à partir de la technique MPF. Comme pour le précédent document, il n'y a pas de mise en parallèle d'amplificateurs.
- L'article Proc. SPIE 2005 Vol 5709 pages 98-102 (BABUSHKIN- IPG) présente une solution de laser à fibre avec une diode semi-conductrice pilotée en courant pour émettre directement la largeur d'impulsion souhaitée, cette impulsion de diode étant ensuite pré-amplifiée puis amplifiée par des amplificateurs à fibre conventionnelle pour générer une impulsion laser ayant une puissance crête de plusieurs dizaines de kW. L'amplificateur à une structure linéaire (un seul bras) et il n'est pas fait mention de la possibilité d'augmenter la puissance par multiplication des bras d'amplification.
- L'article Proc. SPIE 2005 Vol 5709 pages 133-141 (PAYNE- Southampton univ.) présente une solution de recombinaison cohérente de lasers à fibre, exclusivement orientée vers la montée en puissance pour des faisceaux continus et cohérents. Cet article présente la possibilité théorique de multiplexer un faisceau maître de manière à amplifier chaque voie avec un ampli à fibre photonique. Ces différents faisceaux sont alors recombinaisonnés de façon cohérente, ce qui impose de contrôler finement la phase relative des faisceaux. Cette présentation est synthétisée par

la figure 2 qui montre un laser maître dont la stabilité en fréquence est assurée par une source DFB d'une largeur spectrale de 60 kHz qui est ensuite pré-amplifiée avant multiplexage spatial. Le schéma fait apparaître que la
5 différence entre les trajets optiques des faisceaux multiplexés doit rester inférieure à la longueur de cohérence du laser maître.

- Les articles OPTICS EXPRESS avril 2003 Vol 11 n7 pages 818-823 (LIMPERT & Co - IENA) et OPTICS
10 EXPRESS Feb 2005 Vol 13 n4 pages 1055-1058 (LIMPERT & Co - CELIA) présentent les résultats que l'on peut obtenir avec une fibre MPF courte.

L'article HEADLEY, SPIE Jan 2005 N°5709 p 343-353 présente une méthode d'amplification d'impulsions utilisant
15 des fibres multimodes à saut d'indice et un couplage de la pompe par des paquets de fibres. On y insiste sur la difficulté à obtenir une propagation monomode dans une fibre à saut d'indice de grand cœur et présente une structure d'amplification en ligne. L'article fait brièvement allusion aux
20 fibres photoniques pour écarter leur utilisation

- FR 2 859 545 (CEA) concerne la mise en parallèle de lasers à solide synchronisés par des moyens électroniques (synchronisation active).

- L'article JOAP jan 1999 vol 85,n°2 Page 672– (LIN et
25 AI – Univ Essex) mentionne l'intérêt de générer une pré-impulsion (« prépulse ») avant une impulsion principale pour pomper un plasma afin de réaliser un laser à rayons X à 7,3 nm.

- US 2004/002295 (Weulersse -CEA) concerne la mise
30 en œuvre d'au moins trois lasers massifs synchronisés de manière électronique (synchronisation active).

- EP 1 041 686 (TRW) porte sur la réalisation d'une onde plane de forte puissance par recombinaison cohérente couplée à un détecteur de phase spatiale. Les faisceaux

finaux ne sont pas synchronisés et les émissions sont continues.

La présente invention propose une source laser de forte puissance en mode impulsionnel intégrée multi-millijoules en régime nanoseconde qui présente de nombreux avantages par rapport aux dispositifs connus et qui permet en outre, notamment, la réalisation de sources secondaires de rayonnements électromagnétiques par excitation de plasma ou de cristaux non linéaires afin de générer de tels rayonnements électromagnétiques en utilisant ladite source laser comme moyen d'excitation primaire. Cet avantage est obtenu par la mise en oeuvre d'une « amplification distribuée » sur plusieurs fibres photoniques (MPF) permettant de profiter des avantages relatifs aux fibres photoniques et à l'utilisation d'une architecture parallèle.

La source de l'invention comporte un laser « maître » fonctionnant en cadence (oscillateur) déclenché par au moins un moyen de déclenchement dont le faisceau émis est réparti (multiplexé) en N sous-sources qui sont distribuées à N amplificateurs optiques du type fibre à couches photoniques (MPF) pompée, chacun des amplificateurs étant pompé par des diodes laser et réémettant un faisceau optique vers un volume de focalisation unique commun aux N amplificateurs. Le volume de focalisation peut correspondre à un matériau solide, liquide ou gazeux qui sera ainsi excité pour la génération secondaire d'une source à une longueur d'onde différente de celle du laser déclenché. Le laser « maître » est un laser oscillateur impulsionnel haute cadence utilisant par exemple une fibre à couches photoniques (MPF).

Ainsi, l'invention concerne un dispositif de génération d'impulsions laser amplifiées comportant au moins un laser impulsionnel piloté par au moins un moyen de déclenchement émettant un faisceau laser maître multiplexé spatialement en des faisceaux laser élémentaires qui sont amplifiés en parallèle par au moins deux amplificateurs optiques, chacun

des faisceaux laser élémentaires amplifiés étant dirigé vers un volume de focalisation unique.

Selon l'invention, chaque amplificateur optique comporte une fibre à couches photoniques, dite MPF, au moins un moyen de pompage optique à diodes laser produisant au moins une onde de pompe pour pompage longitudinal de ladite fibre et un moyen de focaliser dans le volume de focalisation le faisceau amplifié produit par la fibre, la fibre allongée en silice ou verre comportant un cœur dopé, une première couche périphérique à structure photonique de guidage d'onde laser entourée d'une couche de confinement d'onde de pompe, la couche de confinement étant entourée d'une gaine, le guidage et le confinement étant obtenus par mise en œuvre de capillaires aériques au sein de la fibre, le pompage de chaque amplificateur optique étant en continu et la génération des impulsions optiques amplifiées étant obtenue directement par une source laser impulsionnelle fonctionnant en cadence, ledit dispositif ayant une configuration du multiplexage, de l'amplification parallèle et de la focalisation de chaque faisceau permettant de garantir la synchronisation des impulsions optiques produites par l'ensemble des amplificateurs optiques à fibre afin qu'elles arrivent selon un séquençement temporel prédéterminé dans le volume de focalisation.

Dans divers modes de mise en œuvre de l'invention, les moyens suivants pouvant être utilisés seuls ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles, sont employés :

- chaque amplificateur optique à une fibre à couches photoniques d'une longueur inférieure à 1m,
- les faisceaux laser élémentaires amplifiés sont chacun très proches de la limite de diffraction,
- les faisceaux laser élémentaires amplifiés présentent chacun un paramètre M^2 inférieur à 2,
- le laser impulsionnel émettant un faisceau laser maître qui est ensuite multiplexée spatialement puis amplifiée

par des amplificateurs optiques est un laser impulsif à fibre amplificatrice à couches photoniques (MPF),

5 - le dispositif comporte un oscillateur laser impulsif produisant le faisceau laser maître suivi d'au minimum deux amplificateurs optiques en parallèle, (le laser impulsif avec son moyen de déclenchement est un oscillateur)

- l'ensemble comporte entre deux et cent amplificateurs optiques en parallèle,

10 - la fréquence de répétition des impulsions laser est d'au moins 10kHz,

- la durée des impulsions laser produites par chacun des amplificateurs optiques est comprise entre 1ns et 30 ns,

- la durée de l'impulsion laser au point de focalisation est comprise entre 1ns et 100 ns,

15 - la puissance moyenne dans le volume de focalisation est au moins de 1kW,

- la puissance moyenne dans le volume de focalisation est au moins de 3kW,

20 - le volume de focalisation correspond à la zone d'intersection des faisceaux laser élémentaires amplifiés et présente un volume inférieur à 1000 μ m cube,

- le volume de focalisation est une zone sensiblement sphérique ou ovoïde où au moins 90% de l'énergie laser est concentrée dans un volume inférieur à 1000 μ m cube,

25 - les faisceaux lasers élémentaires amplifiés produits par l'ensemble des amplificateurs optiques sont focalisés selon une géométrie sphérique dans laquelle la cible est située au centre de la sphère perpendiculaire à l'ensemble des faisceaux incidents,

30 - les faisceaux incidents forment une couronne autour du volume de focalisation, (les faisceaux sont répartis sur une circonférence de la sphère correspondant au volume de focalisation, dans le cas où il y a focalisation selon une géométrie sphérique donc)

- la densité d'énergie au point de focalisation par impulsion est d'au moins 1.10^{10}W/cm^2 ,

- la stabilité de l'énergie des impulsions est d'au moins 1% à 3σ ,

5 - le dispositif comporte en outre des moyens pour générer un plasma émettant un rayonnement électromagnétique dans la gamme des ultraviolets extrêmes de longueur d'onde approximativement de 13,5nm,

10 - les extrémités de la partie guidée (extrémités des fibres amplificatrices) des faisceaux laser amplifiés sont disposées dans l'espace autour du volume de focalisation,

15 - les extrémités de la partie guidée (extrémités des fibres amplificatrices) des faisceaux laser amplifiés sont disposées sensiblement à une même distance autour du volume de focalisation, (les extrémités des fibres MPF amplificatrices vers le volume de focalisation sont disposées sensiblement à une même distance autour du volume de focalisation)

20 - les extrémités de la partie guidée (extrémités des fibres amplificatrices) des faisceaux laser amplifiés sont disposées diamétralement deux à deux, en vis-à-vis, autour du volume de focalisation, (les extrémités des fibres MPF amplificatrices vers le volume de focalisation sont disposées diamétralement deux à deux, en vis-à-vis, autour du volume de focalisation)

25 - les extrémités de la partie guidée (extrémités des fibres amplificatrices) des faisceaux laser amplifiés sont disposées autour du volume de focalisation de manière à ce qu'aucun faisceau laser amplifié ne soit en vis-à-vis d'un autre faisceau laser amplifié, (pour éviter une éventuelle destruction de source laser par injection d'un faisceau laser amplifié dans une autre fibre amplificatrice en vis-à-vis),

30 - les extrémités de la partie guidée (extrémités des fibres amplificatrices) des faisceaux laser amplifiés sont

disposées radialement équiangulairement autour du point de focalisation dans un même plan

- chaque fibre comporte un dispositif de pointage dynamique de manière à garantir le même point de focalisation de chaque faisceau indépendamment des contraintes environnementales,

- le dispositif de pointage dynamique comprend deux miroirs ajustables angulairement, des détecteurs de position et de direction du faisceau laser amplifié disposés en aval desdits miroirs et des moyens de piloter l'orientation des miroirs en fonction du signal d'erreur fournit par les détecteurs,

- les détecteurs sont (par exemple) des détecteurs quatre-quadrants, l'un des détecteurs étant placé au foyer d'un moyen de focalisation afin d'être sensible à la direction du faisceau incident,

- le moyen de pompage de chaque amplificateur optique comporte au moins une source à diode(s) laser émettant une onde de pompe renvoyée longitudinalement dans la fibre par un miroir dichroïque (ou tout autre élément optique équivalent) permettant d'injecter simultanément dans l'amplificateur optique le faisceau laser élémentaire issu du laser impulsif et la pompe,

- le moyen de pompage comporte au moins une source à diode(s) laser émettant une onde de pompe, l'onde de pompe étant injectée longitudinalement dans la fibre à travers un miroir dichroïque, le faisceau laser élémentaire correspondant pouvant être injecté dans ladite fibre grâce audit miroir dichroïque,

- le moyen de pompage permet d'envoyer dans la fibre amplificatrice une onde de pompe à une extrémité de ladite fibre,

- le moyen de pompage permet d'envoyer dans la fibre amplificatrice deux ondes de pompe, soit une onde de pompe à chacune des deux extrémités de ladite fibre,

- le moyen de pompage permet d'envoyer dans la fibre amplificatrice deux ondes de pompe polarisées perpendiculairement entre-elles à une même extrémité de ladite fibre,
- 5 - la fibre de l'amplificateur optique est utilisée en double passage pour le faisceau laser amplifié, la séparation entre l'onde incidente et l'onde émergente de l'amplificateur étant opérée par un moyen de séparation de la polarisation,
- 10 - l'amplificateur à fibre MPF est utilisé en double passage, le faisceau laser maître entrant dans la fibre MPF par la même extrémité que celle par laquelle sort le faisceau amplifié, la/les ondes de pompes étant envoyées dans la fibre par l'autre extrémité de la fibre MPF,
- 15 - le laser impulsionnel oscillateur est constitué d'un moyen de déclenchement et d'un milieu amplificateur de type MPF, (amplifiant le signal grâce à la configuration à MPF)
- 20 - le laser impulsionnel oscillateur émettant un faisceau laser maître est ensuite multiplexée spatialement puis amplifiée par des amplificateurs optiques est un laser impulsionnel à fibre amplificatrice à couches photoniques (MPF),
- 25 - le laser oscillateur est en outre suivi d'un module amplificateur à fibre photonique MPF produisant le faisceau laser maître,
- 30 - le dispositif comporte un laser impulsionnel,
- le dispositif comporte au moins deux laser impulsionnels synchronisés entre-eux dans le temps, chacun émettant (directement ou par l'intermédiaire d'un module amplificateur à fibre photonique MPF) un faisceau laser maître multiplexé spatialement vers au moins deux amplificateurs optiques en parallèle,
- 35 - le faisceau laser maître est multiplexée spatialement puis relié aux différents amplificateurs optiques par des guides optiques (fibres optiques de guidage) dont les longueurs sont déterminés pour que les impulsions des

faisceaux laser élémentaires amplifiés produites par l'ensemble des amplificateurs optiques arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé,

- 5 - le faisceau laser élémentaire amplifié de chaque amplificateur optique est relié au volume de focalisation par une fibre photonique non-amplificatrice dont la longueur et la configuration sont déterminées pour que les impulsions des faisceaux laser élémentaires amplifiés produites par
10 l'ensemble des amplificateurs optiques arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé.

Les notions de mode et de limite de diffraction qui concernent chaque faisceau laser élémentaire amplifié sont
15 connues de l'homme du métier, mais si nécessaire on pourra se reporter à l'article « Laser Beams and Resonators » de H.Kogelnik et T.Li dans APPLIED OPTICS/Vol.5, N°10/oct 1966, p.1550-1567

Le dispositif permet principalement d'avoir une très
20 bonne qualité de faisceau (proche de la limite de diffraction pour chaque voie d'amplification), pour une très forte densité de puissance (1mJ à 10mJ par voie) associée à une cadence de répétition élevée (10KHz à 100KHz). Le dispositif de l'invention permet également d'avoir une très grande stabilité
25 énergétique moyenne dans le volume de focalisation grâce à une cadence de tir (impulsion) d'au moins 10KHZ et grâce à la multiplicité des sources élémentaires qui vont en général de 10 à 100 suivant les configurations. De plus, la complexité du dispositif n'est pas proportionnelle à la montée en
30 puissance obtenue dans le volume de focalisation grâce à l'architecture parallèle. Enfin, du fait du grand nombre de sources utilisées, le dispositif peut avoir un taux d'utilisation particulièrement important, le non fonctionnement d'une, voire de quelques sources, ne réduisant la puissance
35 moyenne que très faiblement.

Le dispositif permet aussi d'avoir une très grande souplesse dans les caractéristiques optiques dans le volume de focalisation puisqu'en modifiant la distance (longueur ou type -fibre optique de guidage ou de transport selon les cas-
5 de chemin optique) séparant l'oscillateur (laser impulsional maître) et certains amplificateurs optiques on peut produire des profils temporels d'énergie complexe (création d'une pré-impulsion par exemple).

La présente invention va maintenant être exemplifiée
10 sans pour autant en être limitée avec la description qui suit en relation avec les figures suivantes:

la Figure 1 qui représente un premier exemple d'amplificateur optique à fibre MPF mis en œuvre dans le dispositif de l'invention pour amplifier chaque faisceau laser
15 élémentaire,

la Figure 2 qui représente le laser impulsional et le multiplexage spatial du faisceau laser maître en des faisceaux laser élémentaires destinés à être amplifiés par des amplificateurs optiques,

20 la Figure 3 qui représente un exemple de réalisation du dispositif,

la Figure 4 représente un second exemple d'amplificateur à fibre MPF, du type à double passage et à séparation de polarisation.

25 Les fibres MPF permettent de réaliser des sources laser de plus de 100W de puissance moyenne chacune tout en gardant une qualité de faisceau proche de la diffraction, le seul mode amplifié étant le mode fondamental TM₀₀ (monomode transverse). Cette bonne qualité de faisceau
30 permet une focalisation relativement fine, déposition du maximum d'énergie sur environ 10µm de diamètre au point de focalisation et permet d'exciter une cible (particule) de quelques microns (environ de 5µm à 20µm) de diamètre. La forme globale du point de focalisation est très

approximativement sphéroïdale et dépend des orientations relatives des faisceaux laser entre-eux.

D'une façon générale, une fibre MPF est une structure allongée en verre ou silice avec une géométrie axiale
5 comprenant au centre un milieu amplificateur dopé dans lequel le rayonnement amplifié sera guidé et, autour de ce milieu amplificateur, une gaine de guidage de type photonique (c'est-à-dire présentant une structure « trouée » abaissant artificiellement l'indice du matériau de la gaine de guidage). Autour de la gaine de guidage se trouve une gaine de pompe permettant de confiner l'onde de pompe dans la gaine de guidage et le cœur. De préférence, autour de cette structure, on dispose une gaine supplémentaire pouvant servir de protection (rigidificateur mécanique et/ou radiateur
10 thermique). Ce type de fibre MPF se caractérise en particulier par le fait que l'on peut avoir des diamètres de cœur de 30µm à 100 µm tout en ayant un guidage monomode et une ouverture numérique supérieure à 0,6 pour la gaine de pompe, ce qui facilite l'injection longitudinale de/des ondes de pompe. La zone de guidage de pompe est légèrement supérieure à environ 100µm de diamètre et peut être élargie en fonction de l'optimisation du laser. Ces valeurs de diamètres sont adaptées en fonction des besoins mais ils ont une influence sur la longueur de la fibre nécessaire à
20 l'amplification. La longueur typique d'un amplificateur basé une telle fibre MPF est inférieure à 1m.

Afin d'obtenir du gain dans la fibre MPF, le cœur est dopé par des ions Ytterbium. Ces ions sont excités en les pompant à l'aide de diode laser de puissance. L'Ytterbium a
30 l'intérêt de pouvoir être pompé à 980 nm, longueur d'onde correspondant aux amplificateurs classiquement utilisés en télécommunication, ce qui garanti la fourniture et l'amélioration des technologies des diodes de pompage. Ces diodes ont une brillance trop faible pour que l'onde de pompe
35 soit injectée directement dans le cœur de la fibre et on utilise

donc la capacité de guidage de pompe de la fibre pour propager la puissance de l'onde de pompe vers le cœur. La mise en œuvre de ces fibres MPF est relativement simple car il est possible d'obtenir des puissances importantes sans
5 nécessairement avoir à utiliser des moyens de refroidissement, ce type de fibre était capable de tenir à des puissances de pompe supérieures à 300W.

Les amplificateurs mis en œuvre dans le dispositif utilisent de telles fibres MPF et peuvent être chacun pompées
10 par l'une ou leurs deux extrémités par des moyens de pompage, ce qui permet de doubler la puissance de pompe injectée longitudinalement dans la fibre. Dans une variante mettant en œuvre une polarisation de l'onde de pompe on peut quadrupler la puissance de pompe injectée dans la fibre
15 en utilisant à chaque extrémité deux ondes de pompe à polarisations croisées.

De préférence et comme représenté sur la Figure 1, les moyens de pompage 3 de l'amplificateur optique 12 produisent à chaque extrémité de la fibre MPF 2 des ondes
20 de pompe 4 dont l'axe optique est parallèle à la fibre MPF 2. Les ondes de pompe 4 sont envoyées longitudinalement dans la fibre au travers de miroirs dichroïques 5 capables de réfléchir le faisceau laser élémentaire 16 correspondant qui est amplifié dans l'amplificateur optique 12. Le faisceau laser
25 élémentaire amplifié 15 est également réfléchi par un miroir dichroïque 5 et est ensuite envoyée à travers un moyen de focalisation 7, de préférence opto-mécanique, vers une cible 14. De préférence la fibre MPF 2 (ou un élément optique supplémentaire) renvoie préférentiellement le faisceau laser
30 élémentaire amplifié 15 vers le miroir dichroïque en relation avec le moyen de focalisation 7 et non pas vers le multiplexeur 11 qui sera vu en relation avec la Figure 2.

Ainsi l'amplificateur représenté sur la Figure 1 comporte une fibre MPF 2 qui est pompée à ses deux extrémités par
35 deux moyens de pompage 3 du type à diodes laser, elles-

même fibrées (l'onde de pompe est envoyée vers la fibre amplificatrice MPF par l'intermédiaire d'un guide optique du type fibre optique), produisant deux ondes de pompe 4 sensiblement parallèles à la fibre 2 et renvoyées
5 longitudinalement dans la fibre 2 au travers de miroirs dichroïques 5 transmettant l'onde de pompe mais réfléchissant le faisceau laser élémentaire 16 qui est amplifié dans la fibre MPF 2 et ressort amplifié 15 pour être dirigé et focalisé sur la cible 14 par un moyen opto-mécanique 7.

10 Dans une autre configuration représentée sur la Figure 4, l'amplificateur optique à fibre MPF est utilisé en double passage. Une onde incidente de faisceau laser élémentaire 16 provenant du laser maître est injectée dans l'amplificateur à travers un moyen de séparation de polarisation 21. L'onde
15 incidente du laser maître est polarisée linéairement. L'onde traverse alors une lame quart d'onde 22 qui transforme la polarisation linéaire en une polarisation circulaire. Cette onde est alors injectée dans la fibre MPF 2 à l'aide de moyen optique 23. Un moyen optique dichroïque 24 transmettant
20 l'onde provenant du laser maître et capable de réfléchir l'onde de pompe peut éventuellement être introduit sur le trajet. La fibre MPF 2 possède une gaine extérieure de grand diamètre (>1mm) qui lui assure une grande rigidité. Cette rigidité permet d'obtenir un maintien de la polarisation de
25 l'onde incidente. Un moyen optique dichroïque 25 réfléchit l'onde provenant du laser maître et est capable de transmettre l'onde de pompe produite par le module 3 et qui est introduite au moyen d'un élément de couplage optique 26 contre ou sur la face de sortie de la fibre. L'onde est donc
30 renvoyé sur elle-même au-travers de la fibre. Un second passage à travers la lame quart d'onde transforme l'onde polarisée circulairement en une onde polarisée linéairement mais dont la direction de polarisation est perpendiculaire à celle de l'onde incidente provenant du laser maître. Cette
35 onde est séparée de l'onde incidente par le séparateur de

polarisation 21 et peut être refocalisé par un moyen optique 27 dans un guide de transport 18 qui peut être une fibre photonique souple. Une telle mise en œuvre permet d'augmenter notablement le gain de l'amplificateur et donc de
5 diminuer la puissance de l'onde incidente provenant du laser maître.

D'une manière générale, le laser impulsif oscillateur peut être :

- une diode laser émettant en continu et dont le
10 rayonnement est modulé en impulsions par un modulateur haute-fréquence externe, les impulsions pouvant en outre être amplifiées dans un amplificateur à fibre MPF disposé en aval du modulateur avant le multiplexeur,

- une diode laser dont le courant d'alimentation est
15 modulé et qui peut être suivie d'un amplificateur optique à fibre MPF avant le multiplexeur,

- un laser déclenché (lui-même pouvant être un laser à fibre MPF) par des moyens actifs ou passifs et dont on peut préférentiellement synchroniser le moment d'émission sur une
20 horloge externe.

C'est ce dernier type d'oscillateur laser 1 qui est représenté Figure 2 et qui intègre des moyens de pompage 3 produisant l'onde de pompe 4 dont l'axe optique est parallèle à la fibre MPF 2, l'onde de pompe 4 étant envoyée
25 longitudinalement dans la fibre 2 au travers d'un miroir dichroïque 5 capable de réfléchir l'onde laser se propageant dans le résonateur laser. Des miroirs 9 et 10 forment une cavité optique accordée et un moyen de déclenchement 8 (un cristal électro-optique, ou tout autre moyen permettant une
30 modulation rapide) est disposé dans la cavité. La cavité laser est ainsi constituée par un élément totalement réfléchissant 9 et partiellement réfléchissant 10 pour laisser sortir le faisceau laser maître 6. De manière particulière, l'élément 10 partiellement réfléchissant est constitué par la face de la
35 fibre. Le faisceau laser maître 6 est multiplexé par un

5 multiplexeur spatial 11 (et éventuellement temporel) pour produire les faisceaux laser élémentaires 16. Un amplificateur optique à fibre MPF peut, dans une variante, être mis en œuvre en amont du multiplexeur 11, en sortie de l'oscillateur laser 1 pour amplifier le faisceau laser maître 6 avant son multiplexage.

10 Le dispositif de la Figure 3 met en œuvre un ensemble d'amplificateurs optiques 12 à fibres MPF 2 du type de celui de la Figure 1 ou de la Figure 4 mais limité ici, pour des raisons de simplification de la Figure, à 8 amplificateurs optiques. Ces amplificateurs optiques 12 sont disposés sur un support en forme de couronne plane ou légèrement conique et leurs faisceaux laser convergent vers un même volume de focalisation placé sensiblement au centre de la couronne. Cette géométrie de faisceaux laser présente un
15 axe de symétrie cylindrique et un jet de particules est envoyé sensiblement perpendiculairement à cette couronne vers le volume de focalisation.

20 Un moyen de génération 13 d'un jet de particules ou gouttelettes 14 d'étain ou de xénon d'environ 10µm de diamètre chacune est disposé de manière à ce que le jet passe par le volume de focalisation des faisceaux laser amplifiés 15. De préférence, dans le jet, les particules ou gouttelettes sont isolées les unes des autres. Un laser maître
25 1 à moyen de déclenchement produisant des impulsions lumineuses est utilisé. Les impulsions lumineuses des faisceaux laser élémentaires 16 sont envoyées par des guides optiques, fibres optiques de guidage souples ou tout autre moyen optique de transport de faisceau, à chacun des
30 amplificateurs optiques 12, la longueur des fibres optiques de guidage étant telles qu'avec la disposition de la source 1 et des amplificateurs 12 choisie, les impulsions laser des faisceaux laser amplifiés 15 arrivent toutes sensiblement au même moment dans le volume de focalisation ou, plus
35 généralement, selon un schéma temporel prédéterminé.

Ainsi, le faisceau laser maître est multiplexée spatialement puis relié aux différents amplificateurs optiques par des fibres optiques de guidage dont les longueurs sont déterminées pour que les impulsions des faisceaux laser élémentaires amplifiés produites par l'ensemble des amplificateurs optiques arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé. En particulier, on peut voir sur la figure 3 que certains amplificateurs peuvent être physiquement situés plus loin de l'oscillateur que d'autres. On compense alors cette variation d'éloignement en introduisant des chemins optiques différents pour chaque amplificateur. Le chemin peut par exemple être d'autant plus long que l'amplificateur est situé près de l'oscillateur afin d'assurer une arrivée synchrone des impulsions émises par les différents amplificateurs sur la cible située au centre du volume de focalisation commun. Dans un autre cas particulier, un ou plusieurs chemins optiques sont délibérément choisis différents des autres afin que les impulsions suivant ces chemins arrivent sur la cible avec une avance sur l'ensemble des autres. Ces "pré-impulsions" créent un pré-plasma qui peut être utilisé pour changer les conditions d'interaction du groupe d'impulsions principales avec la cible. Par exemple on peut changer la densité électronique de la cible pour changer son absorption. Le décalage temporel entre les deux groupes d'impulsions est choisi en fonction de principes physiques de l'interaction qui sont classiquement connus. Des schémas temporels plus compliqués peuvent être obtenus en modulant chaque chemin optique indépendamment, soit statiquement (la longueur des fibres de guidage et/ou de transport est constante), soit dynamiquement (moyen de retard réglable).

On a également indiqué que dans une variante, le faisceau laser élémentaire amplifié de chaque amplificateur optique est relié au volume de focalisation par une fibre photonique non-amplificatrice de transport dont la longueur et

la configuration sont déterminées pour que les impulsions des faisceaux laser élémentaires amplifiés produites par l'ensemble des amplificateurs optiques arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé. Les fibres photoniques non-amplificatrices en aval des amplificateurs optiques sont donc également un moyen pour faire varier le moment d'arrivée des impulsions optiques amplifiées dans le volume de focalisation. Dans le cas d'utilisation de telles fibres photoniques non-amplificatrices, le moyen de focalisation utilisé pour diminuer (focaliser) le diamètre de chaque faisceau jusqu'à sa limite de diffraction est placé après la fibre photonique non-amplificatrice correspondante (alors appelée fibre de transport).

Un moyen de synchronisation 17 fait en sorte que les impulsions laser arrivent au point de focalisation lorsque s'y trouve une particule 14 d'étain ou de xénon. Cette dernière synchronisation est obtenue soit par détection des particules soit par génération en synchronisme des impulsions laser et des particules par le moyen de génération 13 de particules.

L'énergie des impulsions laser délivrée aux particules d'étain ou de xénon fait qu'un plasma est créé d'où l'on peut extraire un rayonnement électromagnétique ultraviolet extrême à environ 13,5nm de longueur d'onde. Ce rayonnement peut alors être utilisé pour la photolithographie.

En pratique, avec 25 sources de 200W synchronisées pour que les impulsions laser arrivent au même endroit, dans le volume de focalisation, en même temps, on peut obtenir une puissance moyenne de 5kW.

On comprend que d'autres configurations d'amplificateurs optiques laser à fibres MPF sont possibles et par exemple par répartition dans l'espace des amplificateurs laser sur plusieurs couronnes de diamètres identiques ou non mais à même centre correspondant au volume de focalisation.

REVENDICATIONS

1. Dispositif de génération d'impulsions laser amplifiées comportant au moins un laser impulsionnel (1) piloté par au moins un moyen de déclenchement émettant un faisceau laser maître multiplexé spatialement en des faisceaux laser élémentaires (16) qui sont amplifiés en parallèle par au moins deux amplificateurs optiques (12), chacun des faisceaux laser élémentaires amplifiés (15) étant dirigé vers un volume de focalisation unique,
- caractérisé en ce que chaque amplificateur (12) optique comporte une fibre à couches photoniques (2), dite MPF, au moins un moyen de pompage (3) optique à diodes laser produisant au moins une onde de pompe (4) pour pompage longitudinal de ladite fibre (2) et un moyen de focaliser (7) dans le volume de focalisation le faisceau amplifié (15) produit par la fibre, la fibre allongée en silice ou verre comportant un cœur dopé, une première couche périphérique à structure photonique de guidage d'onde laser entourée d'une couche de confinement d'onde de pompe, la couche de confinement étant entourée d'une gaine, le guidage et le confinement étant obtenus par mise en œuvre de capillaires aériques au sein de la fibre, le pompage de chaque amplificateur optique étant en continu et la génération des impulsions optiques amplifiées étant obtenue directement par le laser impulsionnel fonctionnant en cadence (1), ledit dispositif ayant une configuration du multiplexage (11), de l'amplification (12) parallèle et de la focalisation (7) de chaque faisceau permettant de garantir la synchronisation des impulsions optiques produites par l'ensemble des amplificateurs optiques à fibre afin qu'elles arrivent selon un séquençement temporel prédéterminé pendant une durée comprise entre 1 à 100ns dans le volume de focalisation.

2. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que chaque amplificateur optique à une fibre à couches photoniques (2) d'une longueur inférieure à 1m.

5 3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2 caractérisé en ce que les faisceaux laser élémentaires amplifiés (15) sont chacun très proches de la limite de diffraction et présentent chacun un paramètre M^2 inférieur à 2.

10 4. Dispositif selon la revendication 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que la fréquence de répétition des impulsions laser est d'au moins 10kHz, la durée des impulsions laser produites par chacun des amplificateurs optiques est comprise entre 1ns et 30ns et la puissance moyenne dans le volume de focalisation est au moins de 3kW.

15 5. Dispositif selon la revendication 1,2,3, ou 4, caractérisé en ce que le volume de focalisation correspond à la zone d'intersection des faisceaux laser élémentaires amplifiés (15) et présente un volume inférieur à 1000 μ m cube.

20 6. Dispositif selon la revendication 4, ou 5 caractérisé en ce qu'il comporte en outre des moyens (13, 14) pour générer un plasma émettant un rayonnement électromagnétique dans la gamme des ultraviolets extrêmes de longueur d'onde approximativement de 13,5nm.

25 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moyen de pompage (3, 5) comporte au moins une source à diode(s) laser émettant une onde de pompe (4), l'onde de pompe étant injectée longitudinalement dans la fibre (2) à travers un miroir dichroïque (5), le faisceau laser élémentaire (16)
30 correspondant pouvant être injecté dans ladite fibre (2) grâce audit miroir dichroïque.

8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que le moyen de pompage (3, 5) permet d'envoyer dans la

fibre amplificatrice deux ondes de pompe (4), soit une onde de pompe à chacune des deux extrémités de ladite fibre.

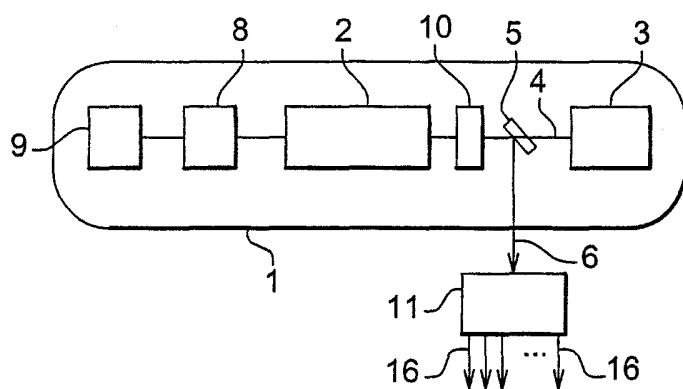
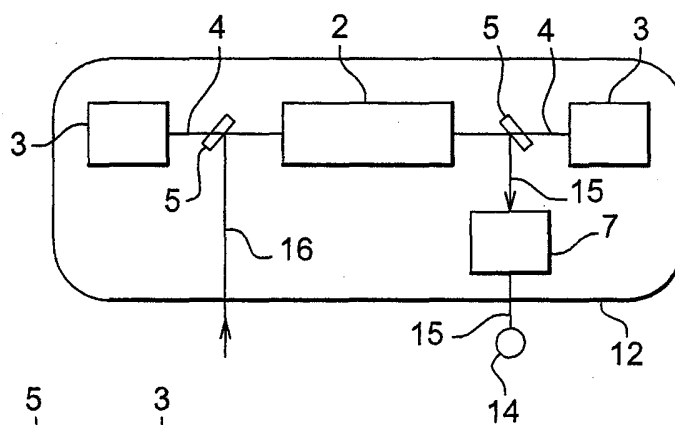
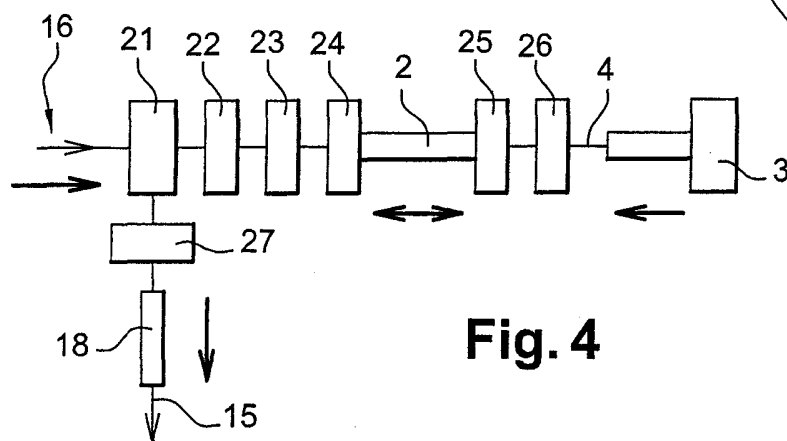
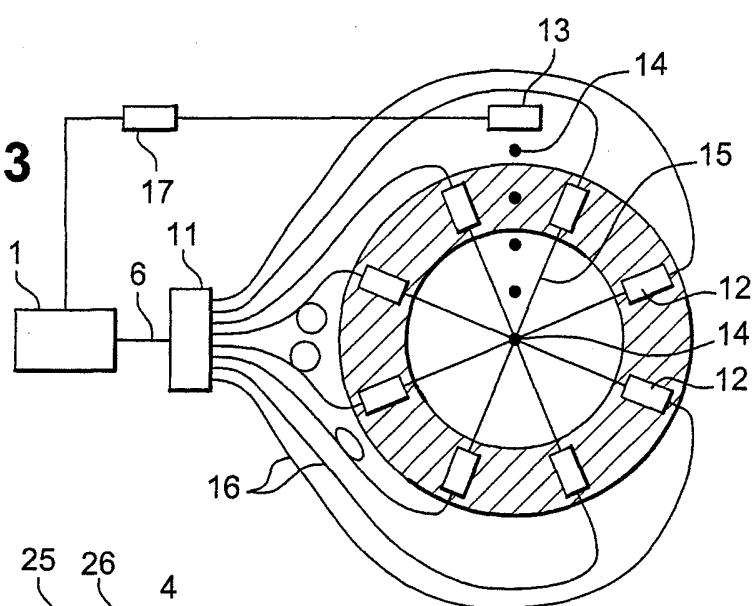
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la fibre (2) de l'amplificateur optique est utilisée en double passage pour le faisceau laser amplifié, la séparation entre l'onde incidente et l'onde émergente de l'amplificateur étant opérée par un moyen de séparation de la polarisation (21).

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le laser impulsionnel (1) émettant un faisceau laser maître qui est ensuite multiplexé spatialement puis amplifié par des amplificateurs optiques est un laser impulsionnel à fibre amplificatrice à couches photoniques (MPF).

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le faisceau laser maître est multiplexé (11) spatialement puis relié aux différents amplificateurs optiques par des fibres optiques de guidage dont les longueurs sont déterminées pour que les impulsions des faisceaux laser élémentaires amplifiés (15) produites par l'ensemble des amplificateurs optiques (12) arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé.

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que le faisceau laser élémentaire amplifié (15) de chaque amplificateur optique (12) est relié au volume de focalisation par une fibre photonique (18) non-amplificatrice de transport dont la longueur et la configuration sont déterminées pour que les impulsions des faisceaux laser élémentaires amplifiés produites par l'ensemble des amplificateurs optiques arrivent dans le volume de focalisation selon un schéma temporel prédéterminé.

1/1

Fig. 1**Fig. 2****Fig. 3****Fig. 4**