

(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
1 avril 2010 (01.04.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/034811 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H01S 3/06 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2009/062448

(22) Date de dépôt international :
25 septembre 2009 (25.09.2009)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0805262 25 septembre 2008 (25.09.2008) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
ECOLE POLYTECHNIQUE [FR/FR]; Etablissement
Public Administratif, F-91128 Palaiseau Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **ALBACH, Daniel** [FR/FR]; Casert de l'Ecole Polytechnique, F-91128 Palaiseau (FR). **BOURDET, Gilbert** [FR/FR]; 13, avenue de l'Yvette, F-91440 Bures sur Yvette (FR). **CHANTELOUP, Jean-Christophe** [FR/FR]; 29, avenue du Mont-Valérien, F-92500 Rueil-Malmaison (FR). **HOLLANDER, Philippe** [FR/FR]; 18 bis, rue Diderot, F-78460 Chevreuse (FR). **VINCENT, Bernard** [FR/FR];

1, Ruelle de la Corne de l'Echaudé, F-91190 Gif sur Yvette (FR).

(74) Mandataires : **ESSELIN, Sophie** et al.; MARKS & CLERK France, Conseils en Propriété Industrielle, Immeuble VISIUM, 22, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

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

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : HIGH ENERGY LASER DEVICE WITH A DOPING GRADIENT GAIN MEDIUM

(54) Titre : DISPOSITIF LASER DE FORTE ENERGIE A MILIEU A GAIN A GRADIENT DE DOPAGE

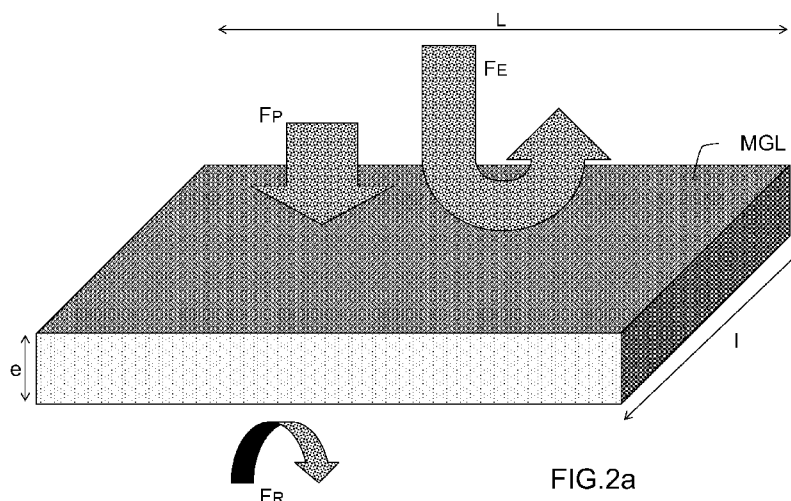


FIG.2a

(57) Abstract : The invention relates to a high energy laser device that includes: a gain medium comprising a solid material containing doping ions and having a first transverse dimension (L) along a first axis (X), a second transverse dimension (I) along a second axis (Y), and a third axial dimension (e) along a third axis (Z), the three axes being mutually orthogonal; a pumping means supplying an energy flow (FP) through a plane defined by the first and second axes; a cooling means supplying a heat flow (FR) through the plane defined by the first and second axes; an energy extraction means supplying a light flow (FE) through a plane defined by the first and second axes; characterised in that the gain medium has a doping rate that varies along the third axis in order to reduce the amplification of the spontaneous emission.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2010/034811 A1



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

*avant l'expiration du délai prévu pour la modification des
revendications, sera republiée si des modifications sont
reçues (règle 48.2.h))*

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

L'invention concerne un dispositif laser de forte énergie comprenant : - un milieu à gain à base de matériau solide incorporant des ions dopants présentant une première dimension transverse (L) selon un premier axe (X), une seconde dimension transverse (I) selon un second axe (Y) et une troisième dimension axiale (e) selon un troisième axe (Z), les trois axes étant orthogonaux entre eux; - des moyens de pompage délivrant un flux d'énergie (Fp) au travers d'un plan défini par les premier et deuxième axes; - des moyens de refroidissement délivrant un flux de chaleur (FR) au travers d'un plan défini par les premier et deuxième axes; - des moyens d'extraction d'énergie délivrant un flux lumineux (FE) au travers du plan défini par les premier et deuxième axes, caractérisé en ce que le milieu à gain présente un taux de dopage variable selon ledit troisième axe de manière à réduire l'amplification de l'émission spontanée.

Dispositif laser de forte énergie à milieu à gain à gradient de dopage

Le domaine de l'invention est celui des dispositifs laser de forte
5 énergie typiquement supérieure au Joule.

Il peut s'agir aussi bien d'amplificateurs que d'oscillateurs laser. Ce
type de dispositif laser rencontre un vif intérêt pour adresser des champs
d'applications tels que le médical et notamment la protonthérapie
(traitement de tumeur cancéreuses par faisceaux de protons), la sécurité et
10 notamment la détection d'agents chimiques, le déclenchement contrôlé de
la foudre via la création d'un canal d'air ionisé créé par laser,
l'environnement pour notamment la détection de polluants, l'énergie pour
des centrales à fusion par confinement inertiel, ou encore l'usinage pour
notamment, la soudure, la structuration de surface ou le perçage de pièces
15 métalliques ou autres matériaux solides.

Ainsi il existe actuellement des programmes de recherche pour
développer des dispositifs laser de très fortes puissances utilisés comme
faisceaux d'énergie intense pour déclencher des réactions de fusion au
sein des réacteurs nucléaires des futures centrales électriques à fusion,
20 comme décrit dans l'article de M.Dunne : « A high-power laser fusion
facility for Europe », Nature physics, 2 (January 2006).

De manière générale, l'énergie exprimée en Joules, produite par un
laser peut être délivrée selon différents modes :

- soit en monocoup : une seule impulsion d'une durée pouvant aller
25 de quelques femtosecondes [10^{-15}] à plusieurs millisecondes [10^{-3}] ;

- soit cadencé : un train d'impulsions est caractérisé par une cadence
exprimée en Hertz ;

- soit en continu : l'émission laser est constante sur des durées
pouvant atteindre plusieurs heures.

30 Les deux premiers modes entrent dans la catégorie des lasers
impulsionnels.

Le Milieu à Gain Laser ici dénommé par l'acronyme MGL au sein duquel est extraite l'énergie en question peut-être solide, liquide ou gazeux. Dans le cas des solides, il peut s'agir de verre, de cristal ou de céramique, les céramiques pouvant être dopées à des taux pouvant atteindre quelques
5 dizaines de pourcents.

Certains atomes de cette matrice sont remplacés par des ions dits « laser » ; le taux de remplacement définit le niveau de dopage du MGL. Via un processus d'excitation qualifié de pompage, ces ions sont capables de stocker de l'énergie puis de la restituer sous l'effet d'une impulsion laser
10 traversant le MGL : celle-ci est alors amplifiée. C'est ce gain énergétique qui justifie l'appellation MGL. On utilise la notion de gain linéique g exprimé en cm^{-1} pour définir la capacité d'amplification par unité de longueur. La valeur du gain linéique g dépend notamment du dopage en ions lasers et du niveau d'éclairement généralement exprimé en W/cm^2 du MGL dans le cas d'un
15 « pompage » du MGL par une source lumineuse. Cet éclairement peut notamment être réalisé par des lampes flashes, ou encore un autre laser comme des diodes par exemple. La tenue au flux laser par unité de surface limitée des matériaux constituant les MGL solides impose des dimensions transverses relativement importantes lorsqu'il s'agit d'extraire sans danger de
20 destruction du matériau lui-même (ou de ses faces) de fortes quantités d'énergie : dès quelques Joules.

Une grande dimension transverse permet donc de diminuer la densité surfacique d'énergie exprimée en J/cm^2 , ou la densité de puissance exprimée en W/cm^2 . Pour une utilisation en continu ou à des cadences
25 élevées, la forte puissance moyenne résultante requière, par ailleurs, une épaisseur relativement faible afin d'extraire aisément la chaleur stockée.

Typiquement les milieux à gain destinés à des lasers de forte puissance sont avantageusement de larges plaques fines comme illustré en figures 1a et 1b.

30 La figure 1a est relative au cas d'un milieu à gain laser MGL ayant la forme d'un disque fin refroidi au niveau de l'une de ses faces selon un plan défini comme transverse selon les axes X et Y orthogonaux à la direction Z qualifiée d'axiale, le refroidissement pouvant par exemple être assuré par un liquide. Le milieu à gain est par ailleurs pompé au niveau de la face

transverse opposée, l'énergie étant extraite avec réflexion sur la face refroidie. Ainsi, le pompage, le refroidissement et l'extraction sont réalisés selon l'axe Z et sont repérés par les flèches F_P , F_R et F_E .

La figure 1b est relative au cas d'une plaque amplificatrice pouvant
5 notamment être utilisée dans des lasers de très forte puissance type Laser MégaJoule encore couramment dénommés par l'acronyme LMJ. Ce type de plaque peut être refroidi des deux côtés par convection d'un gaz et également pompé des deux côtés pour une extraction en transmission. Les plaques amplificatrices de ces lasers de très forte énergie peuvent être par
10 ailleurs équipées, en leurs extrémités (suivant la plus grande dimension), de milieux appelés « Cladding », M_{CLA} milieux absorbants.

Le refroidissement s'effectue par contact d'un fluide sur l'une ou les deux grandes faces et fournit un flux de refroidissement illustré par les flèches F_R . Il en va de même pour le pompage et l'extraction d'énergie,
15 illustrés respectivement par des flèches F_P et F_E .

Le recours à des MGL de grandes dimensions transverses comportant des surfaces typiquement comprises entre environ 1 cm² et 1000 cm², implique des pertes par amplification de l'émission spontanée dénommée ci-après par l'acronyme ASE, pouvant devenir très vite
20 rédhibitoires si le produit (largeur X gain linéique), est trop élevé. Les flèches F_{ASE} , à l'horizontale permettent de visualiser la direction préférentielle de l'ASE qui se développe suivant les grandes dimensions du milieu à gain laser.

25 C'est pourquoi, il est proposé dans la présente invention un nouveau type de dispositif laser de forte énergie comportant un MGL dont les dimensions transverses sont supérieures d'un facteur environ 10 par rapport à son épaisseur, présentant des moyens de pompage, des moyens d'extraction et des moyens de refroidissement, tous agissant sous le forme
30 de flux énergétiques à travers un plan ou des plans transverses au milieu, ledit milieu à gain présentant en outre une modulation spatiale du gain selon la direction perpendiculaire à ces plans via un contrôle sur son niveau de dopage, afin d'optimiser la capacité à stocker, à extraire de l'énergie et à refroidir le MGL tout en minimisant les effets néfastes de l'ASE.

Plus précisément la présente invention a pour objet un dispositif laser de forte énergie comprenant :

- un milieu à gain à base de matériau solide incorporant des ions dopants présentant une première dimension transverse (L) selon un premier
5 axe (X), une seconde dimension transverse (l) selon un second axe (Y) et une troisième dimension axiale (e) selon un troisième axe (Z), les trois axes étant orthogonaux entre eux, les dimensions transverses étant supérieures d'un facteur environ 1 par rapport à la troisième dimension axiale ;
- des moyens de pompage délivrant un flux d'énergie au travers d'un
10 plan défini par les premier et deuxième axes ;
- des moyens de refroidissement délivrant un flux de chaleur au travers d'un plan défini par les premier et deuxième axes ;
- des moyens d'extraction d'énergie délivrant un flux lumineux au travers du plan défini par les premier et deuxième axes,
15 caractérisé en ce que le milieu à gain à base de matériau solide présente un gradient de taux de dopage variable tel que les variations de gain linéique et de densité volumique d'énergie stockée sont nulles ou très faibles le long de la troisième direction axiale Z, l'amplification de l'émission spontanée étant également réduite.

20 Selon une variante de l'invention, les dimensions transverses sont supérieures d'un facteur environ 10 par rapport à la troisième dimension.

Typiquement les flux de pompage et/ou de refroidissement et/ou d'extraction peuvent être selon le troisième axe.

25 Selon une variante de l'invention, le dispositif laser de forte énergie comprend des moyens de pompage situés au niveau d'une première face dite transverse située dans un plan défini par les deux axes transverses, le taux de dopage variant de manière croissante depuis cette face jusqu'à une face transverse opposée à ladite première face transverse.

30 Selon une variante de l'invention, les moyens d'extraction comprennent des moyens réfléchissants localisés sur la seconde face transverse permettant au faisceau ou à un train d'impulsions extrayant l'énergie d'émerger amplifié depuis ladite première face transverse.

Selon une variante de l'invention, le dispositif laser de forte énergie
35 comporte des moyens de pompage situés au niveau des deux faces dites

transverses du milieu à gain laser, ledit milieu à gain laser comportant une variation de dopage assimilable à une courbe présentant un maximum situé à une épaisseur médiane de l'épaisseur du milieu à gain laser, définie selon la dimension axiale.

- 5 Selon une variante de l'invention, le milieu à gain est un cristal de YAG dopé avec des ions de terres rares telles que le Néodyme ou l'Ytterbium.

 Selon une variante de l'invention, le milieu à gain laser comportant une matrice avec des ions dopants, le taux de dopage varie progressivement
10 selon ledit troisième axe entre des valeurs de l'ordre de 1,3 at% à 2,3 at% correspondant à un pourcentage d'ions dopants par rapport au nombre d'atomes constitutifs de la matrice du milieu à gain laser, la troisième dimension étant comprise entre environ 0,7 cm et 0,8 cm.

 Selon une variante de l'invention, le milieu à gain est un disque fin.

- 15 Selon une variante de l'invention, le milieu à gain est une plaque.

 Selon une variante de l'invention, le rapport entre la première et/ou la deuxième dimension, et la troisième dimension est supérieur ou égal à 10.

 Selon une variante de l'invention, les dimensions transverses sont au moins supérieures au centimètre, la dimension axiale étant inférieure au
20 centimètre.

 Selon une variante de l'invention, les dimensions transverses du milieu à gain laser définissent une surface comprise entre environ 10 cm² et 1000 cm².

 Selon une variante de l'invention, les moyens de refroidissement
25 comprennent un liquide et des moyens pour faire circuler ledit liquide au niveau d'au moins l'une des faces dites transverses.

 Selon une variante de l'invention, les moyens de refroidissement comprennent un gaz et des moyens pour faire circuler ledit gaz par convection.

30 Selon une variante de l'invention, le milieu à gain laser comporte en outre des milieux absorbants situés en périphérie et disposés selon la direction axiale.

 Selon une variante de l'invention, le dispositif laser de forte énergie comporte :

- 35 - des moyens de pompage agissant :

- sur une face transverse supérieure ;
- selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe est perpendiculaire à la face transverse en question et le demi angle vaut 60° ;

- 5 - des moyens de refroidissement agissant en contact avec la face transverse inférieure ;
- des moyens d'extraction agissant :
 - sur les deux faces transverses ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe est
- 10 perpendiculaire aux faces transverses et le demi angle vaut 10° .

Selon une variante de l'invention, le dispositif laser de forte énergie comporte :

- des moyens de pompage agissant :
- 15 - sur une face transverse supérieure ;
- selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est perpendiculaire à ladite face transverse et le demi angle vaut 10° ;
- des moyens de refroidissement agissant en contact avec la
- 20 face transverse inférieure ;
- des moyens d'extraction agissant :
 - sur les deux faces transverses ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est orienté à 65° des faces transverses et le demi
- 25 angle vaut 1° .

Selon une variante de l'invention, le dispositif laser de forte énergie comporte :

- des moyens de pompage agissant :
 - sur les deux faces transverses ;
- 30 - selon des axes distribués à l'intérieur de deux cônes dont les axes de révolution sont à environ 50° des faces transverses et le demi angle vaut 70° ;
- des moyens de refroidissement agissant en contact avec les faces transverses ;
- 35 - des moyens d'extraction agissant :

- sur les deux faces transverses supérieures
- selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est orienté à l'angle de Brewster supérieur à environ 50° par rapport à la face transverse et le demi angle vaut 2° .

5

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- 10 - les figures 1a et 1b illustrent respectivement deux exemples de configurations de pompage laser d'un milieu à gain laser selon l'art connu mettant en évidence les surfaces d'interaction et les directions de pompage, d'extraction et de refroidissement d'un milieu à gain laser de faible épaisseur et de grandes dimensions transverses ;
- 15 - les figures 2a et 2b illustrent un dispositif laser de forte énergie selon l'invention comportant des moyens de pompage au niveau d'une face transverse ;
- les figures 3a et 3b illustrent un dispositif laser de forte énergie selon l'invention comportant des moyens de pompage au niveau des
20 deux faces transverses ;
- les figures 4a, 4b et 4c illustrent respectivement les profils de taux de dopage en ions au sein de la matrice YAG, de gain linéique en fonction de l'épaisseur et de densité volumique d'énergie stockée en fonction de l'épaisseur au sein du milieu à gain laser et ce pour un
25 milieu à gain de dopage constant et pour un milieu à gain de taux de dopage croissant ;
- l'ensemble des figures 5a et 5b illustre la distribution du coefficient M_{ASE} dans un plan parallèle aux axes transverses d'un milieu à gain laser dans le cas d'un dopage constant selon l'art connu et d'un
30 dopage croissant selon l'invention ;
- les figures 6a et 6b illustrent respectivement selon l'axe horizontal du graphe, l'évolution de la distribution axiale de la température et selon l'axe vertical du graphe, l'évolution temporelle de la température mesurée avec le nombre d'impulsions de pompage émise à la cadence de 10 Hz.

35

De manière générale, le dispositif laser de forte énergie selon l'invention comprend comme représenté en figures 2a et 2b, un milieu à gain laser, des moyens de pompage, des moyens de refroidissement et des moyens d'extraction.

5 Les moyens de pompage, les moyens de refroidissement et les moyens d'extraction sont tous des flux d'énergie traversant un plan transverse et peuvent par exemple agir le long d'un axe Z, axe selon lequel le milieu à gain laser présente une faible dimension e , typiquement comprise entre le millimètre et quelques centimètres. Les deux autres dimensions L et l
10 du milieu à gain laser selon des axes X et Y sont de dimensions beaucoup plus importantes que la dimension selon l'axe Z . Typiquement ses dimensions L et l peuvent être de l'ordre du centimètre à quelques dizaines de centimètres. Selon l'invention, le milieu à gain laser comporte un gradient de dopage selon l'axe Z , le dopage variant de manière croissante depuis la
15 première face transverse en contact avec les moyens de pompage, et est mis en évidence par la courbe C_{2d} au sein dudit milieu à gain laser. La figure 2b met en évidence le gradient de dopage au sein du milieu à gain laser le long de l'axe Z .

Selon une alternative de l'invention, dans le cas d'un dispositif laser
20 de très forte énergie typiquement, des moyens de pompage peuvent avantageusement être disposés au niveau des deux faces transverses comme représenté en figures 3a et 3b. Dans ce cas les moyens d'extraction de l'énergie fonctionnent en transmission. Le faisceau ou le train d'impulsions laser à amplifier traverse alors de part en part le MGL en
25 extrayant ainsi l'énergie préalablement stockée lors du pompage. Dans ce cas le gradient de dopage est assimilable à une courbe présentant un maximum situé à une épaisseur médiane du milieu à gain laser et est mis en évidence par la courbe C_{3d} au sein dudit milieu à gain laser.

La demanderesse explique ci-après pourquoi la configuration de
30 dispositif laser selon l'invention permet de gérer des problématiques intrinsèques aux fortes énergies et ce notamment dans le cas de milieux à gain de type YAG dopés aux ions de type néodyme ou ytterbium.

Un premier milieu à gain laser est évalué, il présente un taux de dopage constant le long de sa direction axiale, ce taux étant de 1,9 at% et
35 une épaisseur de 0,75 cm.

Un second milieu à gain laser est évalué, il présente un taux de dopage variant de 1,3 at % à 2,3 at% et une épaisseur de 0,75cm.

Il est présenté en figures 4a à 4c, respectivement les profils de taux de dopage en ions (courbes 4a_A et 4a_B), de gain linéique (courbes 4b_A et 4b_B) et de densité volumique d'énergie stockée (courbes 4c_A et 4c_B), tous trois en fonction de l'épaisseur au sein du MGL (ici matrice YAG) et ce pour le milieu à gain référencé A, présentant un taux de dopage constant dans son volume de 1,9 at% et le milieu à gain laser référencé B ayant le profil de taux de dopage illustré en figure 4a.

Pour ces deux dispositifs lasers, les moyens de pompage sont configurés pour être situés au niveau d'une seule des faces dites transverses comme illustré en figures 2a et 2b et ce avec un éclairage de pompage de 14 kW/cm².

L'autre face transverse, située sur l'axe Z à une position $z = 0,75$, est réfléchissante pour la lumière de pompe. Il ressort des figures 4b et 4c et plus précisément des courbes 4b_B et 4c_B relatives au cristal B, que ce cristal B permet d'obtenir des variations nulles ou très faibles en terme de gain linéique et de densité volumique d'énergie stockée.

Au-delà de ces performances avantageusement constantes, la distribution variable de dopage permet de réduire fortement l'ASE, problème majeur dans les lasers de très fortes énergies.

En effet, on peut considérer qu'en deçà d'un seuil donné de gain linéique, typiquement égal à 1 cm^{-1} pour un MGL de $4 \times 4\text{ cm}^2$, l'amplification de l'émission spontanée est négligeable alors qu'elle devient rapidement problématique au-delà.

Les pertes par ASE sont, par contre, importantes dans toute la première moitié du cristal A : en effet, entre $z=0$ et $0,3\text{ cm}$ le gain linéique est supérieur à 1 cm^{-1} et la densité volumique d'énergie stockée atteint une valeur de $14,5\text{ J/cm}^3$.

Pour le cristal B, le gain linéique local ne dépasse jamais 1 cm^{-1} et la densité volumique d'énergie stockée 11 J/cm^3 .

Pour illustrer le rôle favorable d'une distribution variable du dopage sur l'ASE, il est intéressant d'utiliser le coefficient « Multiplicateur ASE » M_{ASE} , comme décrit dans l'article de D.Lowenthal, « ASE effects in small

aspect ratio laser oscillators and amplifiers with nonsaturable absorption », IEE J.Q.Elec.,22 ,No 8 (1986).

Ce dernier peut-être présenté comme le nombre de fois qu'un photon émis spontanément par fluorescence stimule l'émission d'autres photons avant de sortir du milieu à gain. Par exemple, un coefficient M_{ASE} de 1,8 signifie qu'un photon émis spontanément peut causer en moyenne l'émission de 0,8 photon par émission stimulée avant de quitter le milieu à gain. La durée de vie du gain dans le milieu est alors réduite de sa valeur initiale τ_0 (pour un gain g_0) pour atteindre un coefficient de τ_0/M_{ASE} .

La demanderesse a mis en évidence qu'un gain linéique de 1, génère un coefficient M_{ASE} au maximum de 2,5, alors qu'un gain linéique de 1,5 génère un coefficient M_{ASE} pouvant atteindre une valeur de 17. Ces résultats ressortent des figures 5a et 5b qui fournissent respectivement les valeurs des coefficients M_{ASE} définis selon les deux axes transverses exprimés en centimètres.

Il existe donc un facteur multiplicateur de 7 entre les deux et donc une durée de vie effective de stockage d'énergie 7 fois plus faible en raison de la relation de proportionnalité suivante :

$$\tau_{eff} \propto \tau / M_{ASE}$$

avec τ : le durée de vie des ions lasers dans l'état excité, soit encore la durée de vie du gain.

Le milieu à gain laser proposé dans la présente invention permet de diminuer notablement les pertes par émission laser spontanée (ASE) en limitant la valeur du gain linéique g à une valeur seuil (dans cet exemple 1 cm⁻¹) quelle que soit la distance à l'intérieur du MGL selon la direction longitudinale Z.

Par ailleurs il permet également d'optimiser l'énergie extractible pour un volume donné et par voie de conséquence de diminuer fortement le volume classique de MGL requis pour les lasers de fortes énergies connus à ce jour, ce qui représente un atout majeur dans le contexte notamment des lasers de très fortes puissances, type laser MégaJoule.

La demanderesse a pour cela déterminé les énergies extractibles des milieux à gain laser à base de cristaux YAG dopés Yb suivants :

- Cristal A : épaisseur $e = 0,75$ cm, taux de dopage 1,9 at% : énergie extractible : $6,07 \text{ J/cm}^2$

- Cristal B : épaisseur $e = 0,75$ cm, taux de dopage variant de 1,3 at% à 2,3 at% : énergie extractible $6,1 \text{ J/cm}^2$;

5 - Cristal C : épaisseur $e = 1,15$ cm, taux de dopage 1,3 at%, énergie extractible $6,08 \text{ J/cm}^2$.

Il ressort de ces analyses que seuls les cristaux B et C permettent de maintenir l'ASE à un niveau satisfaisant en raison d'un gain linéique inférieur ou égal à 1, tout en conduisant à une énergie extractible du même ordre,
10 environ $6,1 \text{ J/cm}^2$.

Néanmoins le cristal C présente une épaisseur nettement plus importante que celle du cristal B, et par la même un volume de matériau nettement plus important surtout lorsqu'il s'agit d'envisager des lasers de très fortes énergies présentant des dimensions transversales selon les axes X et
15 Y de l'ordre de dizaines voire de centaines de centimètres conduisant à la nécessité d'un dopage variable rendu évident en terme de volume de milieu à gain laser requis.

En effet, il ressort qu'un cristal de 0,75 cm d'épaisseur à gradient de dopage est suffisant pour atteindre la même capacité d'extraction qu'un
20 cristal de 1,15 cm à dopage constant. Un tel gain de 35% sur le volume requis de MGL peut s'avérer fondamental dans le dimensionnement d'un système laser. A titre d'exemple les 4320 plaques amplificatrices du laser MégaJoule tel qu'il est conçu actuellement pèsent 125 tonnes, ces plaques étant uniformément dopées.

25 La configuration de dispositif laser proposée dans la présente invention permet de plus de mieux gérer la thermique de ce type de dispositif laser de forte puissance moyenne, au sein duquel il est important de parvenir à bien évacuer la chaleur générée.

Pour cela les dispositifs lasers qui sont étudiés fonctionnent avec
30 des moyens de refroidissement efficaces. Plus précisément, un refroidissement efficace doit être assuré pour un régime cadencé à 10 Hz. Ce refroidissement comprend :

- une convection d'air localisée au niveau d'une première face transverse situé du côté des moyens de pompage et caractérisée par un coefficient d'échange thermique de $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$ et une température de $295,15 \text{ K}$;
- 5 - une circulation d'eau au niveau d'une face transverse opposée à la première face transverse et caractérisée par un coefficient d'échange thermique de $30\,000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ et une température de $288,15 \text{ K}$.

Les figures 6a et 6b illustrent à ce titre l'évolution de la distribution axiale (longitudinale, axe z) de température respectivement pour le cristal C
10 et pour le cristal B avec le nombre d'impulsions de pompage à 10 Hz représenté selon les axes verticaux. Les axes horizontaux représentent la dimension longitudinale des milieux à gain laser : une épaisseur de $1,15 \text{ cm}$ pour le cristal YAG dopé uniformément avec un taux de dopage constant de $1,3 \text{ at\%}$ et de $0,75 \text{ cm}$ pour le cristal à dopage variable compris entre $1,3$ et
15 $2,3 \text{ at\%}$. Les différentes courbes sont des courbes d'isotherme exprimée en Kelvin.

L'axe vertical donne le nombre d'impulsions de pompe. A la cadence de 10 Hz , le maximum de 500 signifie donc 50 secondes. On
20 observe que :

- dans le cas du cristal C uniformément dopé et illustré en figure 6a, même après 50 secondes l'équilibre thermique n'est pas atteint et la température maximale est de 361 K .
- dans le cas du cristal B à dopage variable et illustré en
25 figure 6b, environ 30 secondes sont requises pour atteindre un équilibre thermique avec une valeur maximale de température de 340 K .

De manière générale pour réaliser le milieu à gain laser utilisé dans un dispositif laser de forte énergie selon l'invention il est possible
30 d'utiliser l'une des technologies suivantes permettant de réaliser le profil de variation de taux de dopage recherché.

Plus précisément ces techniques peuvent être les suivantes :

- la croissance d'un milieu à gain laser par épitaxie, c'est-à-dire couche atomique après couche atomique, avec une variation contrôlée du dopage de couche à couche ;
- la constitution d'un milieu à gain laser segmenté en cofrittant un
5 nombre donné de céramiques très fines possédant des dopages variables ;
- la constitution d'un milieu à gain laser segmenté en ayant recours à une technique d'adhérence moléculaire de cristaux très fins possédant des dopages variables ;
- la croissance par cristallisation horizontale directe d'un cristal
10 possédant alors un gradient de dopage ;
- la constitution d'un milieu à gain laser par frittage laser de couches successives de poudres céramiques possédant des dopages variables ;
- la constitution d'un milieu à gain laser par modification du dopage d'un MGL initialement dopé de manière uniforme (par annihilation d'ions) ;
- 15 - la constitution d'un milieu à gain laser par bombardement d'une matrice hôte (YAG par exemple) à l'aide d'un faisceau d'ions (ytterbium par exemple) absorbés progressivement depuis la surface, engendrant ainsi le gradient de dopage dans le MGL.

REVENDICATIONS

1. Dispositif laser de forte énergie comprenant :
- un milieu à gain à base de matériau solide incorporant des ions dopants présentant une première dimension transverse (L) selon un premier axe (X), une seconde dimension transverse (l) selon un second axe (Y) et une troisième dimension axiale (e) selon un troisième axe (Z), les trois axes étant orthogonaux entre eux, les dimensions transverses étant supérieures d'un facteur environ 1 par rapport à la troisième dimension axiale;
 - des moyens de pompage délivrant un flux d'énergie (F_p) au travers d'un plan défini par les premier et deuxième axes ;
 - des moyens de refroidissement délivrant un flux de chaleur (F_R) au travers d'un plan défini par les premier et deuxième axes ;
 - des moyens d'extraction d'énergie délivrant un flux lumineux (F_E) au travers du plan défini par les premier et deuxième axes,
- caractérisé en ce que le milieu à gain à base de matériau solide présente un gradient de taux de dopage variable tel que les variations de gain linéique et de densité volumique d'énergie stockée sont nulles ou très faibles le long de la troisième direction axiale Z, l'amplification de l'émission spontanée étant également réduite.

2. Dispositif laser de forte énergie selon la revendication 1, caractérisé en ce que les dimensions transverses sont supérieures d'un facteur environ 10 par rapport à la troisième dimension.

25

3. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de pompage situés au niveau d'une première face dite transverse située dans un plan défini par les deux axes transverses, le taux de dopage variant de manière croissante depuis cette face jusqu'à une face transverse opposée à ladite première face transverse.

30

4. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que les moyens d'extraction comprennent des

moyens réfléchissants permettant d'extraire l'énergie depuis ladite première face transverse.

5 5. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de pompage situés au niveau des deux faces dites transverses du milieu à gain laser, ledit milieu à gain laser comportant une variation de dopage assimilable à une courbe présentant un maximum situé à une épaisseur médiane de l'épaisseur du milieu à gain laser, définie selon la dimension axiale.

10

6. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le milieu à gain est un cristal ou une céramique de YAG dopé avec des ions néodyme ou ytterbium.

15

7. Dispositif laser de forte énergie selon la revendication 6, caractérisé en ce que le milieu à gain laser comportant une matrice et des ions dopants, le taux de dopage varie progressivement selon ledit troisième axe entre des valeurs de l'ordre de 1,3 at% à 2,3 at% correspondant à un pourcentage de d'ions dopants par rapport au nombre d'atomes constitutifs de la matrice du milieu à gain laser, la troisième dimension étant comprise entre environ 0,7 cm et 0,8 cm.

20

8. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le milieu à gain est un disque fin.

25

9. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le milieu à gain est une plaque.

10. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que les dimensions transverses sont au moins supérieures au centimètre, la dimension axiale étant inférieure au centimètre.

30

11. Dispositif laser de forte puissance selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que les dimensions transverses du

milieu à gain laser définissent une surface comprise entre environ 1 cm² et 1000 cm².

12. Dispositif laser de forte énergie selon la revendication 1 à 11,
5 caractérisé en ce que les moyens de refroidissement comprennent un liquide et des moyens pour faire circuler ledit liquide au niveau d'au moins l'une des faces dites transverses.

13. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications
10 1 à 11, caractérisé en ce que les moyens de refroidissement comprennent un gaz et des moyens pour faire circuler ledit gaz par convection.

14. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1
à 13, caractérisé en ce que le milieu à gain laser comporte en outre des
15 milieux absorbants situés en périphérie et disposés selon la direction axiale.

15. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1
à 14, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens de pompage agissant :
20 - sur une face transverse supérieure ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe est perpendiculaire à ladite face transverse et le demi angle vaut 60° ;
 - des moyens de refroidissement agissant en contact avec la face transverse inférieure ;
25 - des moyens d'extraction agissant :
 - sur les deux faces transverses ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe est perpendiculaire aux faces transverses et le demi angle vaut 10°.

30

16. Dispositif laser de forte énergie selon l'une des revendications 1
à 14, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens de pompage agissant :
 - sur une face transverse supérieure ;

17

- selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est perpendiculaire à ladite face transverse et le demi angle vaut 10° ;
- des moyens de refroidissement agissant en contact avec la
- 5 face transverse inférieure ;
- des moyens d'extraction agissant :
 - sur les deux faces transverses ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est orienté à 65° des faces transverses et le demi
 - 10 angle vaut 1° .

17. Dispositif laser selon l'une des revendications 1 à 14, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens de pompage agissant :
 - 15 - sur les deux faces transverses ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur de deux cônes dont les axes de révolution sont à environ 50° des faces transverses et le demi angle vaut 70° ;
 - des moyens de refroidissement agissant en contact avec les
 - 20 faces transverses ;
 - des moyens d'extraction agissant :
 - sur les deux faces transverses supérieures ;
 - selon des axes distribués à l'intérieur d'un cône dont l'axe de révolution est orienté à l'angle de Brewster supérieur à
 - 25 environ 50° par rapport à ladite face transverse et le demi angle vaut 2° .

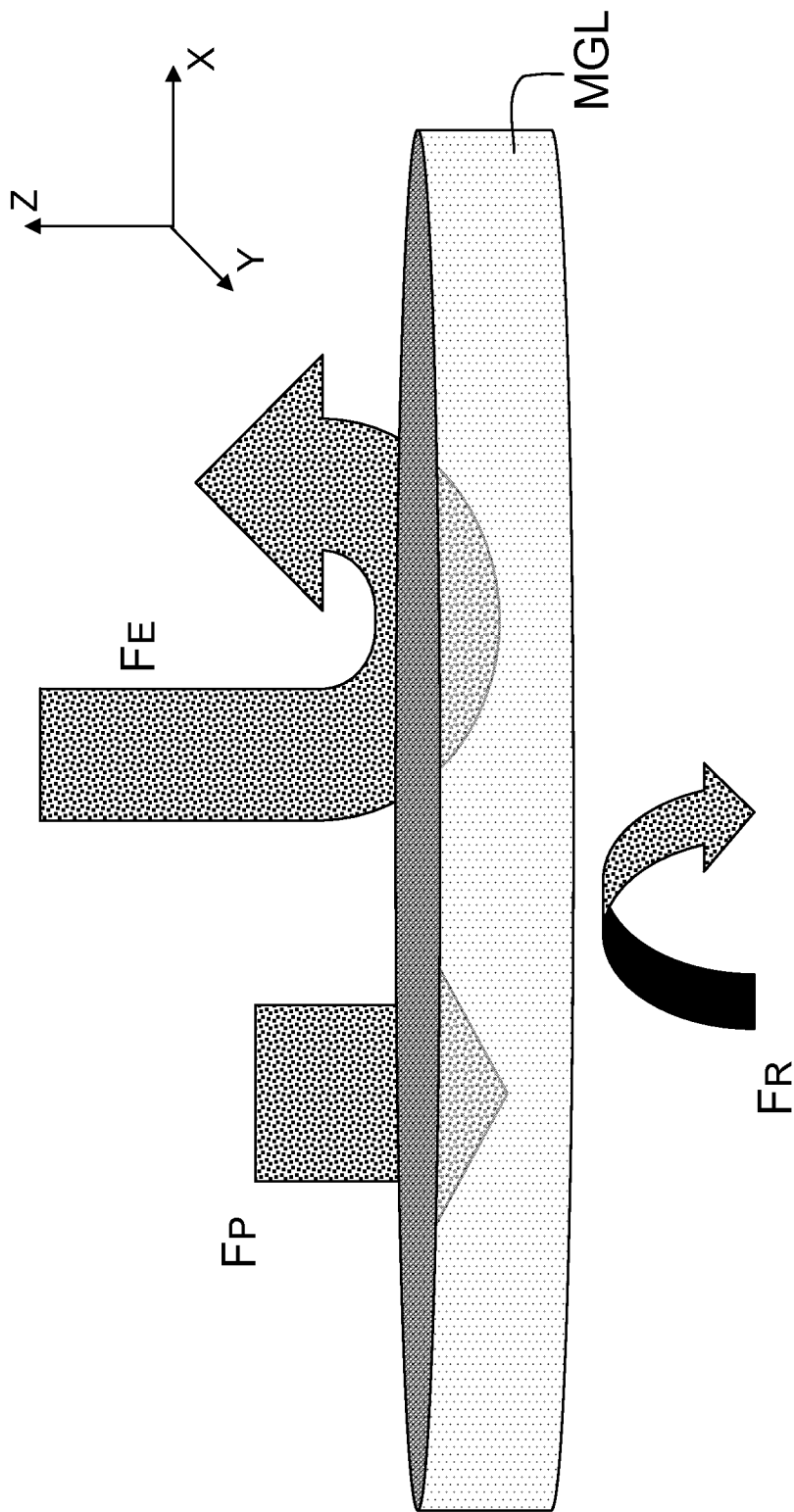
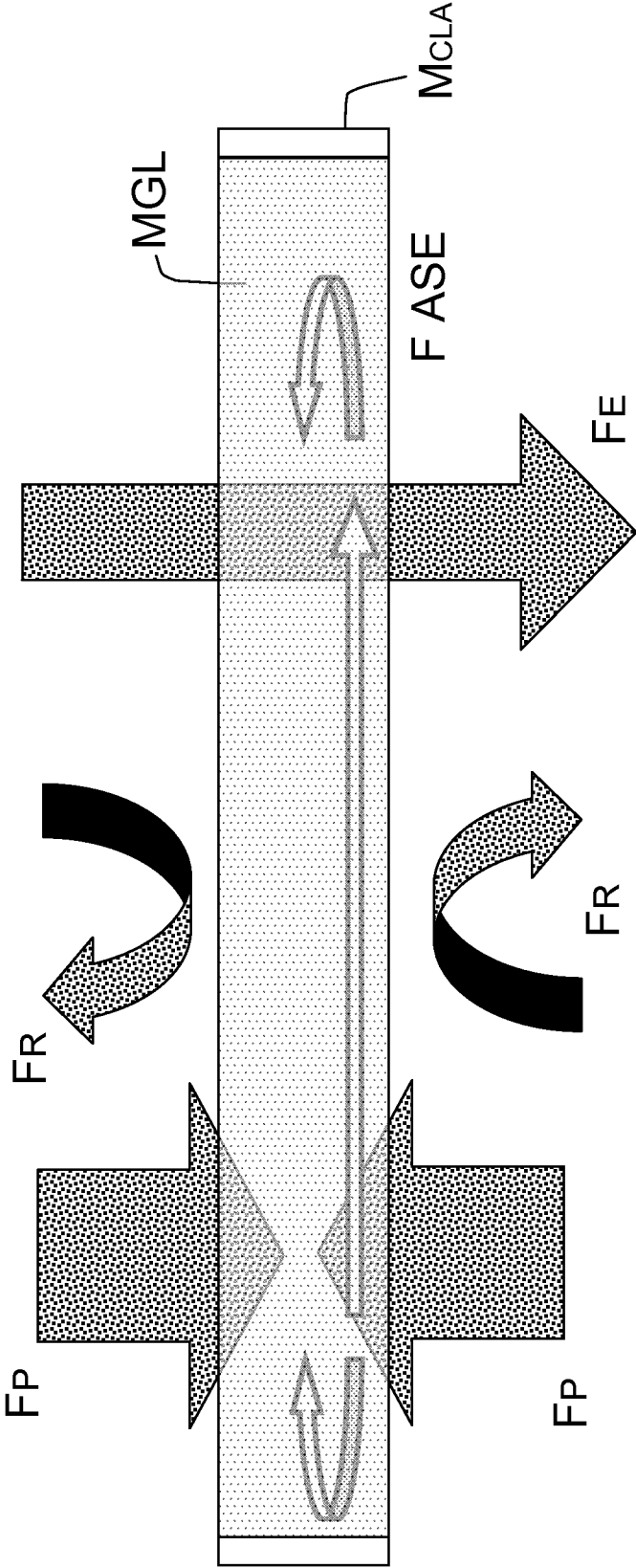
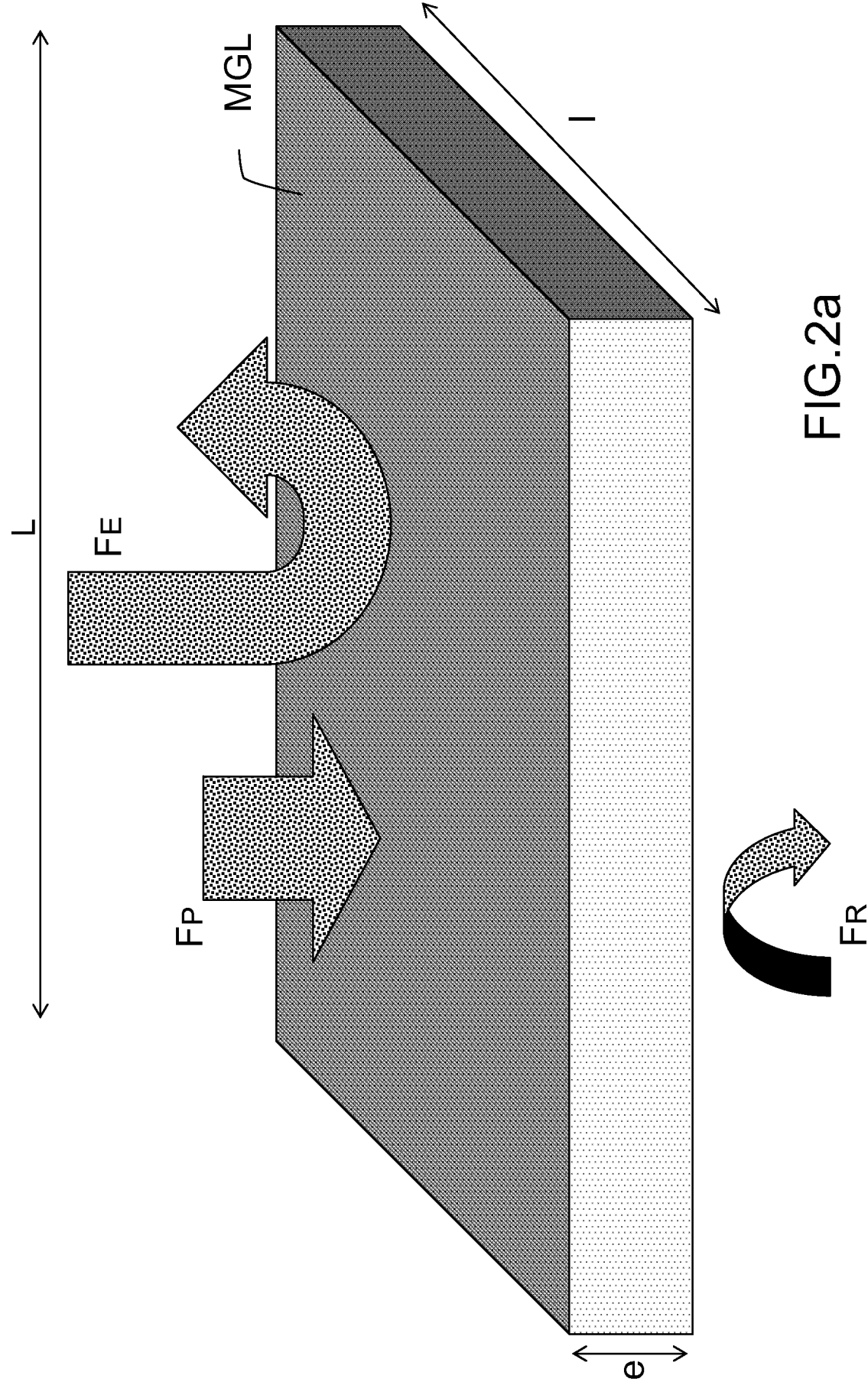


FIG.1a





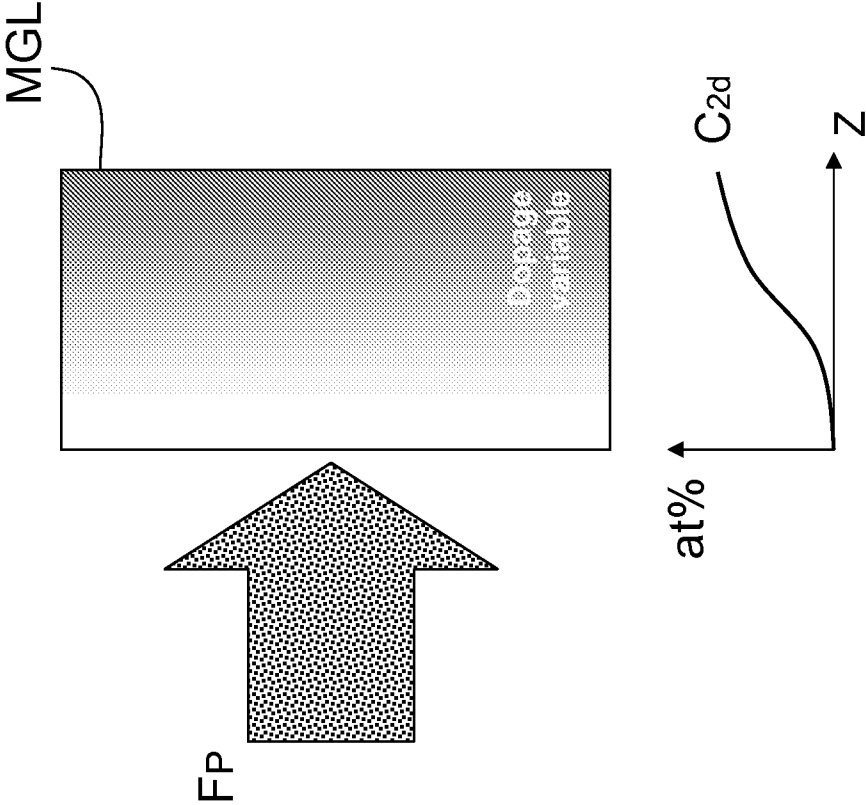


FIG.2b

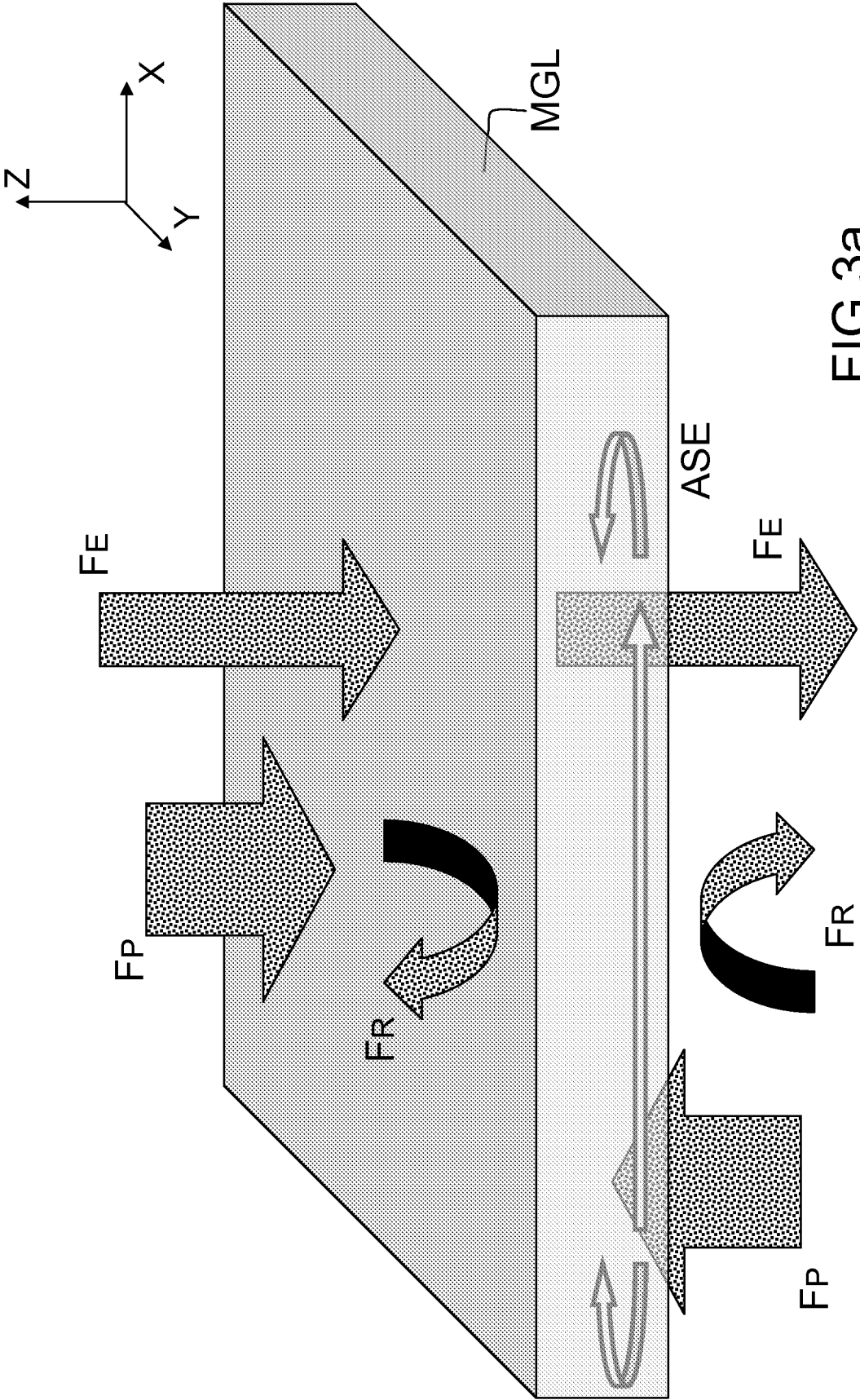


FIG.3a

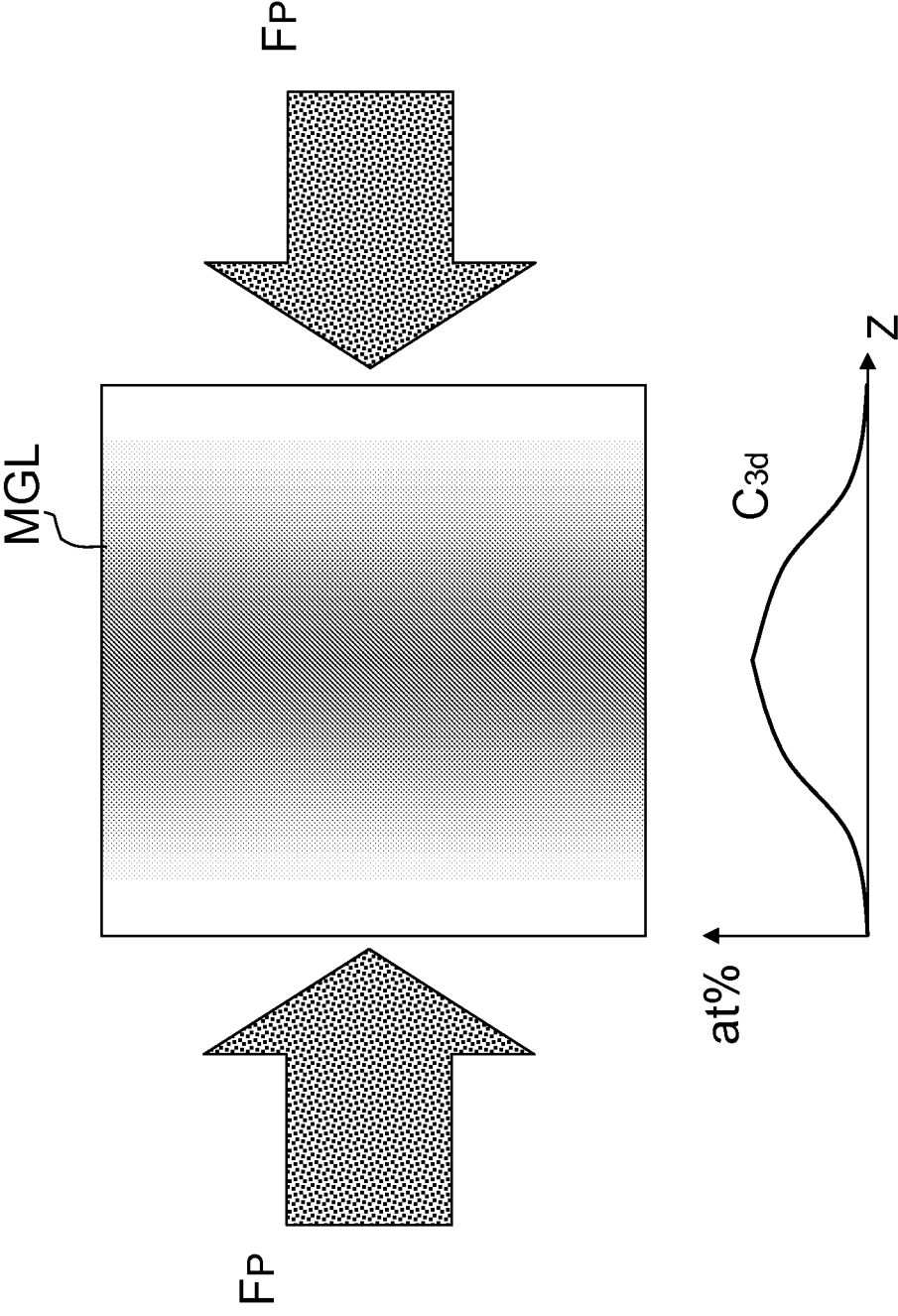
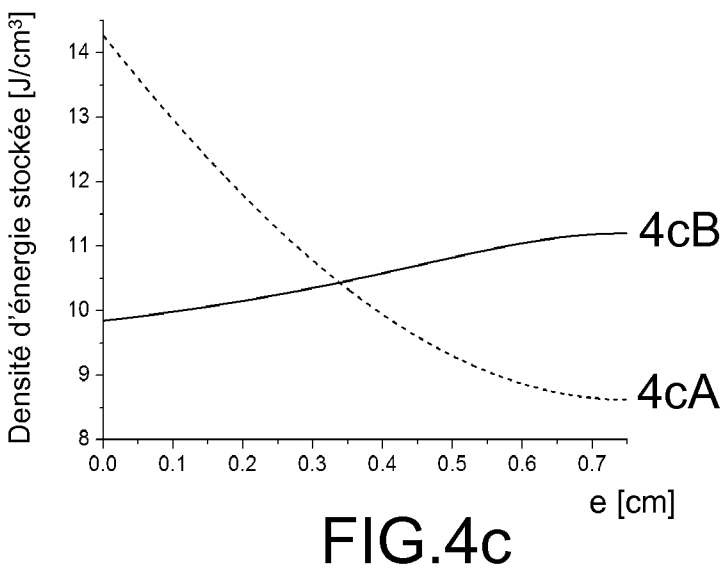
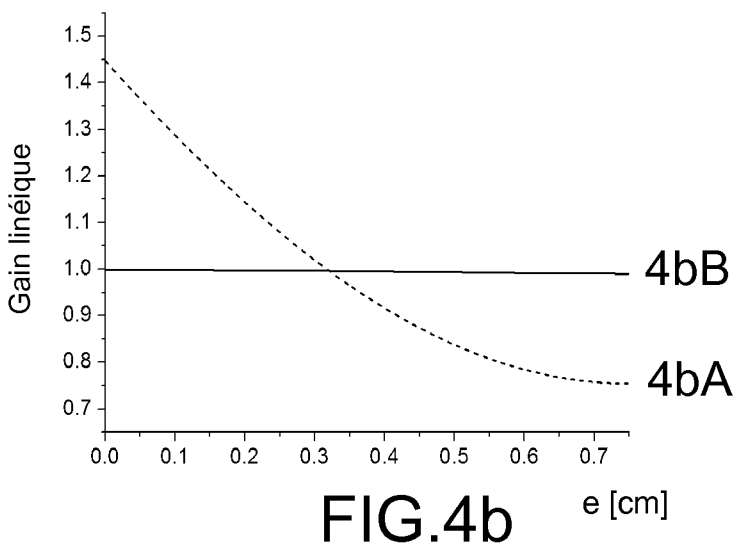
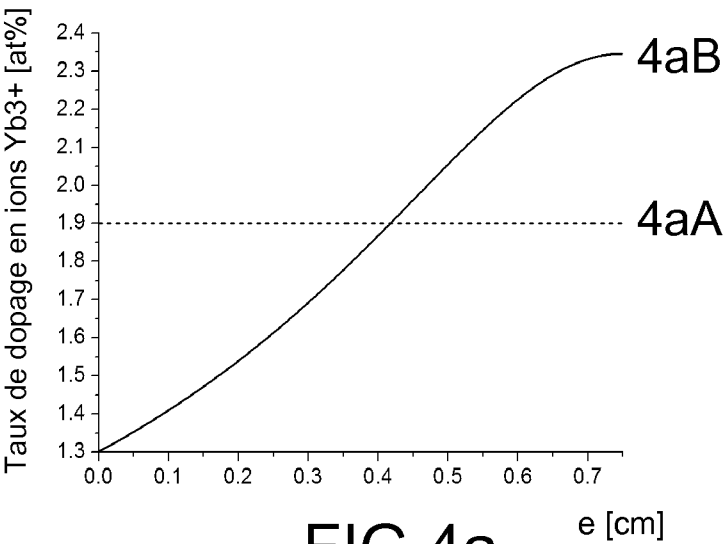


FIG.3b



8/9

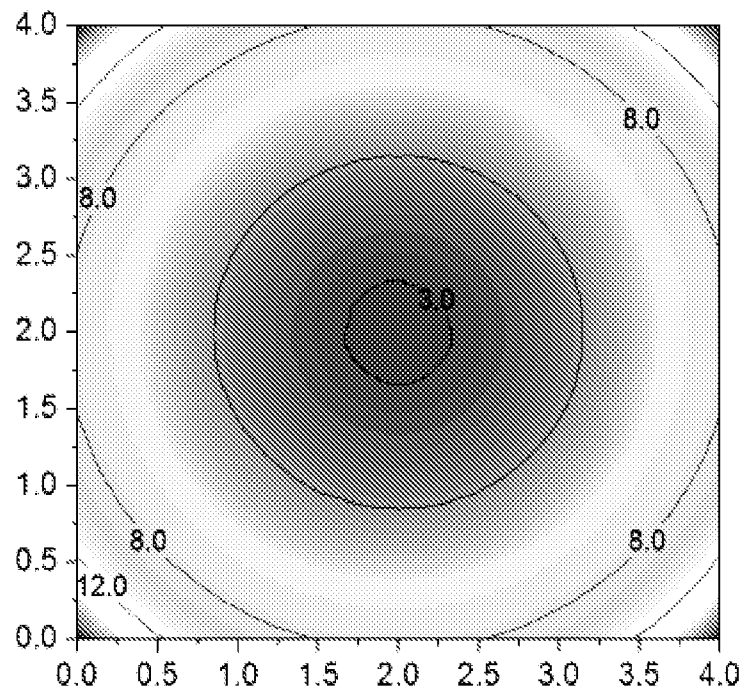


FIG.5a

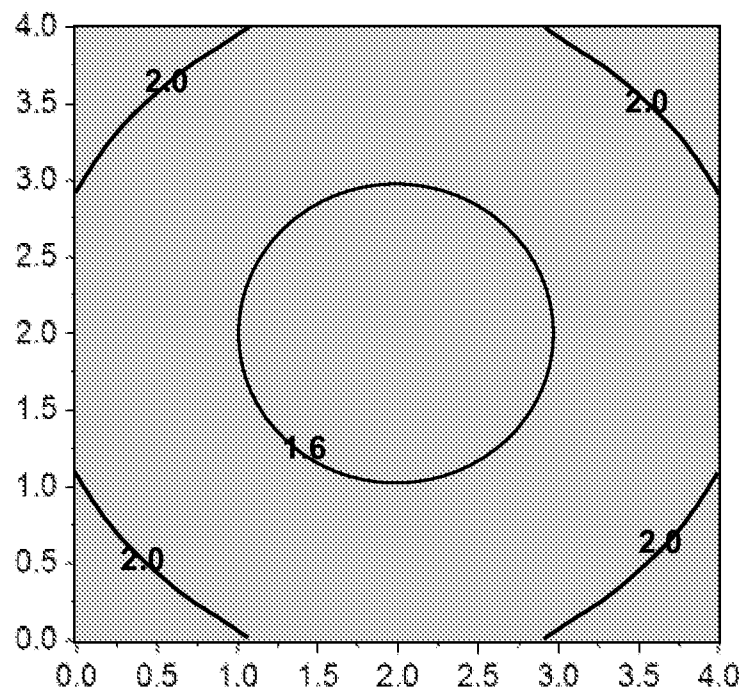


FIG.5b

9/9

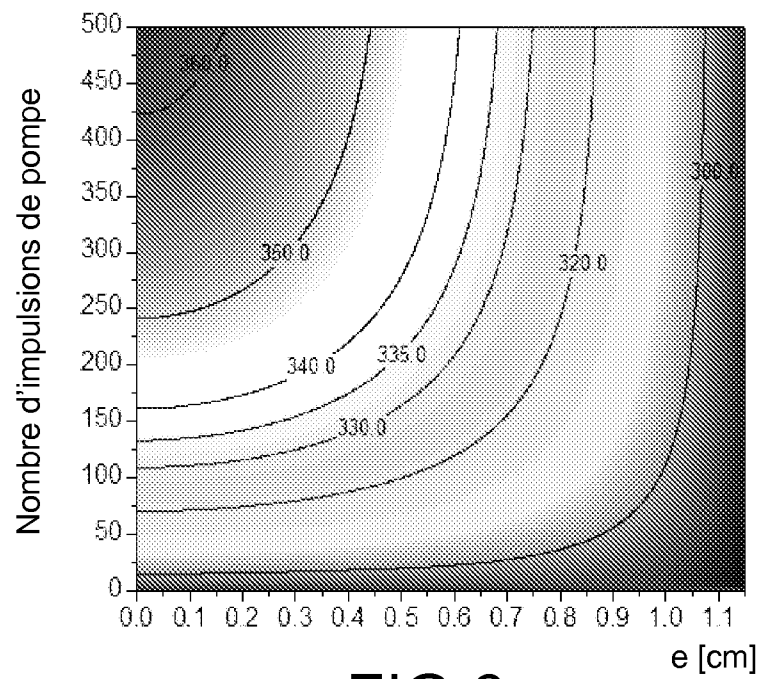


FIG.6a

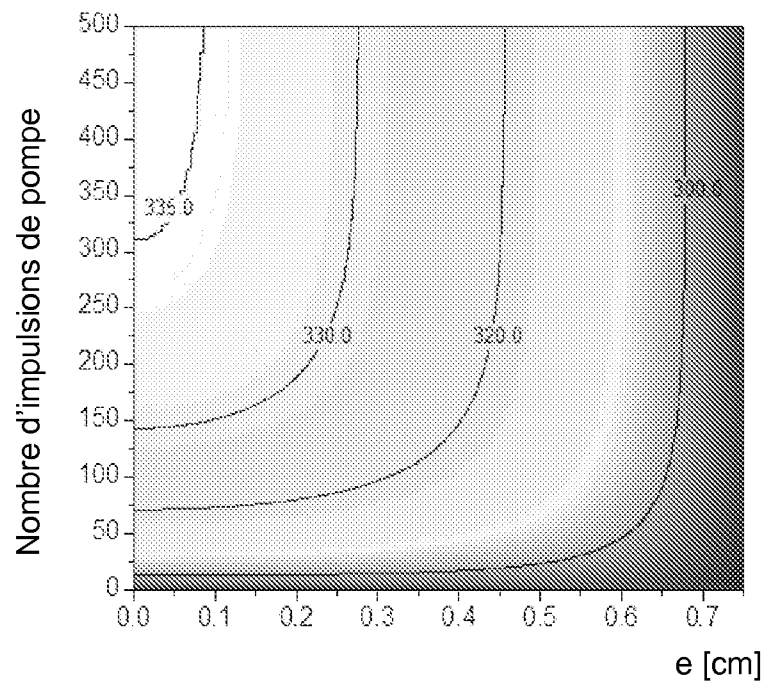


FIG.6b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2009/062448

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. H01S3/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 6 347 109 B1 (BEACH RAYMOND J [US] ET AL) 12 February 2002 (2002-02-12) column 3, line 32 - column 4, line 67; figures 2-4	1-17
Y	FR 2 885 267 A1 (CIE IND DES LASERS CILAS SA [FR]) 3 November 2006 (2006-11-03) page 3 - page 5	1-17
A	US 2008/175288 A1 (VETROVEC JAN [US]) 24 July 2008 (2008-07-24) paragraph [0016] - paragraph [0018]; figure 2	1
A	US 2005/013333 A1 (KWON JAE WOOK [KR]) 20 January 2005 (2005-01-20) paragraph [0054] - paragraph [0059]; figures 3,4	1-3
	----- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

5 February 2010

Date of mailing of the international search report

01/03/2010

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hervé, Denis

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2009/062448

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DMITRII KOUZNETSOV AND JEAN-FRANÇOIS BISSON: "Role of undoped cap in the scaling of thin-disk lasers" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 25, no. 3, 1 March 2008 (2008-03-01), pages 338-345, XP007908083 ISSN: 0740-3224 the whole document -----	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2009/062448

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6347109	B1	12-02-2002	NONE	
FR 2885267	A1	03-11-2006	NONE	
US 2008175288	A1	24-07-2008	US 2010009475 A1	14-01-2010
US 2005013333	A1	20-01-2005	JP 2005045241 A	17-02-2005
			KR 20050010204 A	27-01-2005

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2009/062448

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. H01S3/06

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
H01S

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 6 347 109 B1 (BEACH RAYMOND J [US] ET AL) 12 février 2002 (2002-02-12) colonne 3, ligne 32 - colonne 4, ligne 67; figures 2-4	1-17
Y	FR 2 885 267 A1 (CIE IND DES LASERS CILAS SA [FR]) 3 novembre 2006 (2006-11-03) page 3 - page 5	1-17
A	US 2008/175288 A1 (VETROVEC JAN [US]) 24 juillet 2008 (2008-07-24) alinéa [0016] - alinéa [0018]; figure 2	1
A	US 2005/013333 A1 (KWON JAE WOOK [KR]) 20 janvier 2005 (2005-01-20) alinéa [0054] - alinéa [0059]; figures 3,4	1-3
	-/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- "&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

5 février 2010

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

01/03/2010

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Hervé, Denis

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	DMITRII KOUZNETSOV AND JEAN-FRANÇOIS BISSON: "Role of undoped cap in the scaling of thin-disk lasers" JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 25, no. 3, 1 mars 2008 (2008-03-01), pages 338-345, XP007908083 ISSN: 0740-3224 le document en entier -----	1-17

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2009/062448

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 6347109	B1	12-02-2002	AUCUN	
FR 2885267	A1	03-11-2006	AUCUN	
US 2008175288	A1	24-07-2008	US 2010009475 A1	14-01-2010
US 2005013333	A1	20-01-2005	JP 2005045241 A	17-02-2005
			KR 20050010204 A	27-01-2005