

(10) Numéro de publication internationale
WO 2025/124993 A1

(71) Déposant : THALES [FR/FR] ; 4 rue de la Verrerie, 92190 MEUDON (FR).

The block diagram illustrates the system architecture. On the left, three MC (Microcontroller) units are connected to GM (Gate Matrix) blocks. Each GM block is connected to an EB (Error Block) and a CL (Control Logic) block. The EB and CL blocks are connected to a PE (Processing Element) block. The PE block is connected to the MPLC (Multi-Phase Load Controller) block. The MPLC block is connected to a PS (Power Supply) block. The PS block is connected to a PB (Power Block) and a SB (Switching Block). The PB and SB blocks are connected to an OM (Output Module) block. The OM block is connected to a PBout (Power Output) block. The diagram shows the flow of data and control signals between these components.

FIG.8

(57) Abstract: The invention relates to a laser beam phasing device (10), comprising: – a plurality of N semi-open cavities; – a multi-plane conversion device (MPLC) configured to convert a set of N input spatial modes forming an input base into a set of N output spatial modes forming an output base; – a partially reflective output mirror (OM) configured to form, with the N end mirrors of the cavity, a laser cavity common to the plurality of gain media and allowing the coherent combination of the elementary beams; – the N phase-collimated elementary beams being configured to form a input spatial mode of the multi-plane conversion device chosen so that the multi-plane conversion device generates the principal mode (PM), associated with a principal beam (PB); – the output mirror being configured to partially reflect the principal beam.

(57) **Abbrégé :** L'invention concerne un dispositif de mise en phase de faisceaux lasers (10) comprenant : – une pluralité de N cavités semi-ouvertes, – un dispositif de conversion multiplan (MPLC) configuré pour convertir un ensemble de N modes spatiaux d'entrée formant une base d'entrée en un ensemble de N modes spatiaux de sortie formant une base de sortie, – un miroir de sortie (OM) partiellement réfléchissant configuré pour former, avec les N miroirs de fond de cavité, une cavité laser commune à ladite pluralité de milieux à gain et permettant la combinaison cohérente desdits faisceaux élémentaires, – les N faisceaux élémentaires collimatés en phase étant configurés pour former un mode spatial d'entrée du dispositif de conversion multiplan choisi de sorte que le dispositif de conversion multiplan génère le mode principal (PM), associé à un faisceau principal (PB), – le miroir de sortie étant configuré pour réfléchir partiellement ledit faisceau principal.

RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.

- (84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- en noir et blanc ; la demande internationale telle que déposée était en couleur ou en échelle de gris et est disponible sur PATENTSCOPE pour téléchargement.

DESCRIPTION

TITRE : Dispositif de mise en phase laser avec un convertisseur multiplan

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne la combinaison cohérente de lasers et plus particulièrement la combinaison cohérente utilisant un multiplexeur spatial de lumière de type dispositif convertisseur multiplan ou MPLC, pour MultiPlane Light Conversion.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] La combinaison cohérente de lasers est une solution efficace pour mettre en commun la puissance de N lasers de puissances plus modestes et ainsi augmenter la puissance en sortie tout en conservant une qualité de faisceau proche de la limite de diffraction.

[0003] En effet à titre d'exemple les applications de contre mesure optronique nécessitent la génération de signaux moyens infrarouge suffisamment puissants pour éblouir, voir détruire les capteurs thermiques des missiles. Cela nécessite des puissances supérieures à 10 W. Le développement de tels lasers est un défi technologique important.

[0004] Ces puissances peuvent être obtenues par conversion paramétrique de sources proche-infrarouges mais au prix d'une grande complexité et sont limitées à des régimes impulsionnels. D'un autre côté, les lasers à cascades quantiques (QCL) sont de bons candidats pour ces applications mais sont limités à environ 2 W en régime continu. Ainsi pour obtenir la puissance nécessaire, la combinaison cohérente de quelques QCL est une option pouvant résoudre ce problème.

[0005] Outre les lasers à cascade quantique (QCLs) émettant dans le moyen-infrarouge pour les contre-mesures optroniques, de manière plus générale la combinaison cohérente de lasers peut être appliquée à différentes technologies lasers, pour différentes applications telles que les lasers à fibres pour l'arme laser, ou les télécommunications espace libre.

[0006] De très nombreuses méthodes de combinaison cohérente ont été proposées, plus ou moins complexes à mettre en œuvre, et avec des efficacités de

combinaison variables. Un des principaux challenges est de mettre en phase les différents lasers pour former un seul faisceau de diffraction minimale en sortie du système.

[0007] On distingue la mise en phase active et passive. La mise en phase active implique de mesurer la phase de chaque laser et d'utiliser un modulateur de phase associé à chaque laser asservi en phase. Cette solution est complexe et coûteuse à mettre en œuvre. En outre il n'existe pas de modulateurs de phase performants avec peu de pertes pour toutes les longueurs d'onde d'intérêt, par exemple pour la gamme du moyen IR 3-12 μm .

[0008] Pour des applications nécessitant un nombre restreint de voies à mettre en phase, la formation d'une unique cavité laser contenant toutes les voies est une solution adaptée pour réduire la complexité de mise en œuvre car elle ne nécessite pas l'ajout de modulateurs de phase à asservir (mise en phase passive).

[0009] Cela a été mis en œuvre dans différentes configurations pour former une cavité commune, parmi lesquelles on peut citer le réseau de Dammann (élément optique diffractif ou DOE). La combinaison cohérente passive de QCLs avec un composant diffractif, dénommé réseau de Dammann, est par exemple décrite dans la publication de G. Bloom et al "Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating," Opt. Lett. 36, 3810-3812 (2011) et illustrée figure 1. Le principe consiste à générer et amplifier les faisceaux laser dans des milieux à gain individuels localisés à l'intérieur d'un résonateur commun. Ce résonateur commun génère la rétroaction sur tous les lasers et sélectionne un supermode de sortie. Pratiquement un ensemble de QCLs (QCL1 à QCL5), chaque QCL étant à cavité semi-ouverte (un seul miroir présent côté fond de cavité) et collimaté par une lentille CL, sont incidents sur le réseau de Damman DG selon des angles associés aux différents ordres de diffraction du réseau. Le réseau est calculé pour que toute l'énergie soit en théorie concentrée dans l'ordre 0. Un miroir partiellement réfléchissant OC ferme la cavité laser commune à tous les QCLs.

[0010] Dans cette configuration le résonateur, commun à tous les QCL, doit « trouver » un mode longitudinal commun à toutes les voies, dans la bande de

gain des QCL. Pour cela, il faut introduire une différence de chemin optique entre les différentes voies, en espérant que statistiquement un mode longitudinal commun à toutes les voies existe.

[0011] Outre un réseau de Damman, la mise en phase passive basée sur la sélection d'un supermode peut être réalisée avec un autre filtre spatial telle une cavité de Michelson ou par effet Talbot.

[0012] Cependant ces configurations sont complexes à mettre en œuvre, en particulier en termes de tolérancement à l'alignement, de stabilité et à cause de la nécessité d'introduire une différence de chemin optique entre toutes les voies, ce qui limite la puissance maximale de sortie. Ainsi cette configuration présente une efficacité limitée. De plus la réalisation d'un réseau de Damman performant n'est pas aisée.

[0013] Un but de la présente invention est de remédier aux inconvénients précités en proposant un dispositif de mise en phase laser selon une configuration basée sur la réalisation d'une cavité commune et utilisant un composant facilement disponible et qui ne présente pas de problèmes d'alignement.

DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0014] La présente invention a pour objet un dispositif de mise en phase de faisceaux lasers comprenant :

- une pluralité de N cavités semi-ouvertes, chaque cavité semi-ouverte comprenant un milieu à gain et un miroir associé dénommé miroir de fond de cavité, et étant configurée pour générer un faisceau élémentaire collimaté,
- un dispositif de conversion multiplan configuré pour convertir un ensemble de N modes spatiaux d'entrée formant une base d'entrée en un ensemble de N modes spatiaux de sortie formant une base de sortie, la base de sortie comprenant un mode spatial de sortie souhaité, dénommé mode principal, et N-1 autres modes de sortie dénommés modes secondaires,
- un miroir de sortie partiellement réfléchissant configuré pour former, avec les N miroirs de fond de cavité, une cavité laser commune à ladite pluralité de

milieux à gain dans laquelle est disposé le dispositif de conversion multiplan et permettant la combinaison cohérente desdits faisceaux élémentaires,

- les N faisceaux élémentaires collimatés en phase étant configurés pour former un mode spatial d'entrée du dispositif de conversion multiplan choisi de sorte que le dispositif de conversion multiplan génère le mode principal, associé à un faisceau principal,
- le miroir de sortie étant configuré pour réfléchir partiellement ledit faisceau principal.

[0015] Selon un mode de réalisation le dispositif de conversion multiplan est en outre configuré pour que le mode principal soit spatialement séparé des N-1 modes secondaires.

[0016] Selon un mode de réalisation le miroir de sortie présente une surface concave et est disposé de sorte que le faisceau principal soit situé au centre dudit miroir de sortie.

[0017] Selon un mode de réalisation le miroir de sortie présente une dimension adaptée pour réfléchir uniquement le faisceau principal.

[0018] Selon un mode de réalisation chaque cavité semi-ouverte est une cavité semi-ouverte d'un laser à cascade quantique.

[0019] Selon un autre mode de réalisation chaque milieu à gain est une fibre optique active pompée optiquement et le miroir de fond de cavité associé est un miroir de Bragg fibré.

[0020] Selon encore un autre mode de réalisation chaque milieu à gain est un cristal laser, le miroir de fond de cavité étant constitué d'une face traitée pour réfléchir une longueur d'onde laser servant de miroir de fond de cavité ou d'un miroir séparé.

[0021] Selon un mode de réalisation le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que le faisceau principal soit gaussien.

[0022] Selon un mode de réalisation le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que le mode spatial d'entrée choisi corresponde à une amplitude sensiblement égale des N faisceaux élémentaires.

[0023] Selon un mode de réalisation le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que tous les modes secondaires soient localisés à la même position.

[0024] Selon une variante chaque milieu à gain est pompé via un courant d'alimentation, comprenant en outre un détecteur configuré pour détecter une fraction du faisceau principal à la sortie de la cavité et une électronique d'asservissement configurée pour rétroagir sur les courants d'alimentation de manière à maximiser une puissance du faisceau détecté.

[0025] Selon une autre variante chaque milieu à gain est pompé via un courant d'alimentation, comprenant en outre un détecteur configuré pour détecter au moins une fraction d'au moins un faisceau secondaire associé à un mode secondaire et une électronique d'asservissement configurée pour rétroagir sur les courants d'alimentation de manière à minimiser une puissance de l'au moins un faisceau secondaire détecté.

[0026] La description suivante présente plusieurs exemples de réalisation du dispositif de l'invention: ces exemples sont non limitatifs de la portée de l'invention. Ces exemples de réalisation présentent à la fois les caractéristiques essentielles de l'invention ainsi que des caractéristiques additionnelles liées aux modes de réalisation considérés.

[0027] L'invention sera mieux comprise et d'autres caractéristiques, buts et avantages de celle-ci apparaîtront au cours de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

[0028] La figure 1 déjà citée illustre la mise en phase de lasers avec un composant diffractif disposé dans une cavité commune de l'état de la technique.

[0029] La figure 2 illustre le schéma de principe d'un dispositif de type MPLC connu de l'état de la technique.

[0030] La figure 3 illustre un dispositif de type MPLC connu de l'état de l'art dans lequel s'opère une succession de réflexions sur des masques de phase séparées par des propagations en espace libre et des réflexions sur un miroir.

[0031] La figure 4 illustre un premier exemple d'entrée/sortie d'un multiplexage opéré avec un dispositif de type MPLC, dénommé « mode-selective ».

[0032] La figure 5 illustre un deuxième exemple d'entrée/sortie d'un multiplexage avec un MPLC, dénommé « non-mode selective ». La base d'entrée est formée de quatre combinaisons de quatre faisceaux simultanément allumés, dont l'amplitude est sensiblement égale et la relation de phase maîtrisée (l'amplitude constante et les relations de phase définissant la base d'entrée), et la base de sortie est identique à celle de l'exemple de la figure 4.

[0033] La figure 6 illustre un autre exemple d'entrée/sortie d'un multiplexage avec un MPLC de type « non-mode-selective ». La base d'entrée est formée de quatre combinaisons de quatre faisceaux simultanément allumés et dont l'amplitude est sensiblement égale et la relation de phase maîtrisée comme dans la figure 5, et la base de sortie est identique à la base d'entrée de l'exemple de la figure 4.

[0034] La figure 7 illustre un dispositif de type MPLC dans lequel le faisceau de sortie comprend quatre faisceaux élémentaires de sortie FLS spatialement séparés.

[0035] La figure 8 illustre un dispositif de mise en phase selon l'invention.

[0036] La figure 9 illustre un autre exemple d'entrée/sortie d'un MPLC selon l'invention convenant pour la réalisation du dispositif selon l'invention, dans lequel le MPLC est configuré pour que tous les modes secondaires soient localisés à la même position différente de la position du faisceau principal.

[0037] La figure 10 illustre le faisceau global en sortie du MPLC, avant (A) et après (B) la fermeture de la cavité par le miroir de sortie, pour une base de sortie composée de faisceaux gaussiens spatialement séparés.

[0038] La figure 11 illustre un mode de réalisation dans lequel le miroir de sortie présente une surface concave et est disposé de sorte que le faisceau principal soit situé au centre du miroir de sortie.

[0039] La figure 12 illustre un autre mode de réalisation dans lequel le miroir de sortie présente une dimension adaptée pour réfléchir uniquement le faisceau principal.

[0040] La figure 13 illustre un mode de réalisation dans lequel chaque milieu à gain est une fibre optique active pompée optiquement et le miroir de fond de cavité associé est un miroir de Bragg fibré.

[0041] La figure 14 illustre une variante du dispositif selon l'invention dans laquelle une puissance détectée est utilisée pour l'optimisation de la puissance du faisceau de sortie. Selon un premier mode de réalisation illustré en a) le détecteur est configuré pour détecter une fraction du faisceau de sortie et l'électronique SCE rétroagit sur les courants d'alimentation de manière à maximiser la puissance du faisceau détecté et donc du faisceau de sortie. Selon un deuxième mode de réalisation illustré en b) le détecteur est configuré pour détecter au moins une fraction d'au moins un faisceau secondaire associé à un mode secondaire.

[0042] La figure 15 illustre un dispositif selon l'invention avec une barrette de QCLs comme milieu à gain et une rétroaction selon le deuxième mode de réalisation de la variante.

[0043] La figure 16 illustre un dispositif selon l'invention avec des fibres optiques actives comme milieu à gain et une rétroaction selon le premier mode de réalisation de la variante.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0044] Le dispositif de mise en phase selon l'invention utilise un multiplexeur spatial de lumière dénommé dispositif de conversion multiplan ou MPLC inséré dans une cavité commune aux différents lasers à mettre en phase. Ce composant est connu de l'état de la technique et son principe de fonctionnement est rappelé ci-dessous. Sa réalisation est maîtrisée par exemple par la Société Cailabs en France.

[0045] On définit dans la présente demande un rayonnement lumineux comme un rayonnement formé d'au moins un mode du champ électromagnétique, chaque mode formant une distribution spatio-temporelle de l'amplitude, de la phase et de la polarisation du champ. La modification ou la transformation de la phase du rayonnement lumineux désigne la modification ou la transformation spatio-temporelle du chacun des modes du rayonnement.

[0046] On désigne par « forme » d'un rayonnement/faisceau lumineux la distribution transverse de l'amplitude et de la phase du mode ou la combinaison des distributions transverses d'amplitude et de phase des modes composant ce rayonnement/faisceau.

[0047] Le dispositif MPLC, illustré figure 2, met en œuvre des moyens aptes à modifier la forme d'un faisceau lumineux incident. Cette modification peut être précisément décrite sous forme modale, c'est à dire en définissant comment des modes d'entrée formant une famille de modes définie dans un plan transverse d'entrée PE, sont transformés en des modes de sortie d'une famille de modes de sortie définie dans un plan transverse de sortie PS. Les familles des modes d'entrée et de sortie forment des bases orthonormées. Ainsi un dispositif multiplan MPLC est conçu pour transformer une base de mode d'entrée prédéfinis en une base de modes de sortie également prédéfinis. Le choix de la base d'entrée et de la base de sortie détermine la conception du MPLC. La base de modes d'entrée met en œuvre N faisceaux élémentaires d'entrée FLI séparés spatialement, formant collectivement, dans un plan d'entrée transverse auxdits faisceaux PE, un faisceau lumineux incident ILB. Le composant MLPC génère dans un plan de sortie PS un faisceau lumineux de sortie OLB matérialisé sur la figure 2 par le faisceau de sortie FLS.

[0048] Au cours de la conversion modale mise en œuvre par le dispositif 1, un maximum d'énergie (théoriquement 100%) du rayonnement incident présente dans les modes d'entrée est transporté dans un mode de sortie dit cible.

[0049] Le dispositif MPLC 1, par exemple décrit dans les documents WO2019/162637 et WO 2020/161126, opère une transformation modale unitaire.

[0050] Dans le dispositif 1 le rayonnement lumineux incident subit, dans le dispositif de conversion DC disposé entre le plan d'entrée PE et le plan de sortie PS, une succession de réflexions et/ou de transmissions au travers de masques de phase, chaque réflexion et/ou transmission étant suivie par une propagation du rayonnement en espace libre. Ainsi un dispositif de conversion multiplan comprend une pluralité de masques de phases séparés par une propagation en espace libre, et fournit une succession de réflexions et/ou de transmissions au travers de ces masques de phase. Un exemple dans lequel s'opère une

succession de réflexions est illustré figure 3. Typiquement certaines au moins des pièces optiques 5 sur lesquelles s'opèrent les réflexions (et/ou les transmissions) et qui guident la propagation du rayonnement, présentent une surface microstructurée qui modifie le rayonnement lumineux incident sur ladite pièce. Une telle pièce optique forme un masque de phase introduisant un déphasage local au sein de la section transverse du rayonnement qui s'y réfléchit ou qui s'y transmet.

[0051] Ainsi un rayonnement lumineux qui se propage au sein d'un dispositif MPLC subit une succession de déphasages locaux séparés par des propagations. La succession de ces transformations élémentaires (par exemple 4, 8, 10, 12, 14 voire 20 transformations élémentaires) établit une transformation globale du profil spatial du rayonnement lumineux incident. On configure donc les surfaces microstructurées de manière à transformer le rayonnement lumineux incident, qui présente une forme spécifique, en un rayonnement de sortie dont la forme est différente.

[0052] Sur la figure 3 le dispositif de conversion DC est constitué de deux pièces optiques réfléchissantes 2a, 2b disposées en vis-à-vis l'une de l'autre. Des masques de phase 5 microstructurés sont portés par l'une de ces pièces. Une cavité multi-passage est ainsi formée dans laquelle le rayonnement lumineux incident est réfléchi et déphasé une pluralité de fois au niveau de chaque masque 5 pour former le rayonnement transformé, permettant de former le rayonnement de sortie. Dans cet exemple les masques de phase 5 sont tous portés par une lame de phase 2a présentant des zones microstructurées formant les masques 5, la seconde pièce optique 2b étant un simple miroir.

[0053] L'étage optique d'entrée EE est par exemple formé d'un faisceau de fibres optiques permettant de positionner les faisceaux lumineux d'entrée FLI en vis-à-vis du reste du dispositif optique 1. L'étage de sortie peut comprendre des éléments optiques de mise en forme du faisceau de sortie et/ou des faisceaux de sortie complémentaires. Mais le plan d'entrée et/ou de sortie peut également être formé d'un plan fictif transverse aux faisceaux d'entrée ou de sortie, qui dans ce cas se propagent librement.

[0054] Les faisceaux lumineux d'entrée FLI peuvent être répartis, dans le plan PE, selon une seule direction, en barrette. Ils peuvent également être répartis dans ce plan PE selon deux directions, en matrice ou selon une répartition hexagonale. On peut prévoir un nombre quelconque de tels faisceaux, par exemples 2 à 10, plus de 10, voire plusieurs dizaines.

[0055] Le dispositif 1 transforme ainsi une base de modes d'entrée associés aux N faisceaux incidents élémentaires FLI en une base de modes de sortie. Le changement de base opéré par le MPLC est une transformation unitaire spatiale du champ électromagnétique d'entrée. De manière connue la matrice de transfert T décrivant le changement de base opéré par le MPLC est une matrice de Hadamard ou de Fourier. Le principe de codage d'un MPLC par une matrice de Hadamard ou de Fourier est décrit par exemple dans le document de Wen et al « Scalable non-mode selective Hermite-Gaussian mode multiplexer based on multi-plane light conversion » Photonic Research Vol. 9 n°2 (2021). La matrice unitaire de Hadamard comprend uniquement des 1 et des -1, celle de Fourier des coefficients complexes d'amplitude 1. Une fois la matrice de Hadamard ou de Fourier définie, les structures des masques de phase sont calculées par différents algorithmes également connus de l'homme de l'art.

[0056] Un premier exemple de multiplexage avec un MPLC est dénommé « mode-selective » MS, et une illustration d'une correspondance entrée/sortie est illustrée figure 4, avec N=4. Dans l'utilisation MS la base d'entrée est formée de quatre modes spatiaux d'entrée (EM1, EM2, EM3, EM4) correspondant à quatre combinaisons de quatre faisceaux spatialement séparés, dont un seul est allumé à la fois. La base de sortie est constituée de quatre modes de Hermite-Gauss (OM1, OM2, OM3, OM4) localisés à la même position. Tous les modes de sortie sont superposés spatialement, et chaque mode de sortie provient d'un seul faisceau lumineux d'entrée FLI.

[0057] Un deuxième exemple de multiplexage avec un MPLC, dénommé « non-mode selective » NMS, est illustré figures 5 et 6. La base d'entrée est formée de quatre combinaisons de quatre faisceaux simultanément allumés et dont l'amplitude est sensiblement égale et la phase est maîtrisée (0 ou π). L'amplitude constante et les valeurs de phase définissent la base d'entrée. Dans l'utilisation NMS chaque

mode de sortie est issu de la superposition de tous les faisceaux lumineux d'entrée FLI.

[0058] Dans la figure 5 la base de sortie est identique à l'exemple de la figure 4 (modes HG).

[0059] Dans la figure 6 la base de sortie est identique à la base d'entrée de la figure 4, c'est à dire un ensemble de quatre faisceaux séparés spatialement. Comme illustré figure 7 le faisceau de sortie OLB comprend alors quatre faisceaux élémentaires de sortie FLS spatialement séparés. Par exemple un faisceau de sortie FLS est un mode HG_{00} . Lorsque la phase des faisceaux d'entrée FLI est maîtrisée tel qu'illustré figure 6, un seul faisceau de sortie FLS allumé est présent à la fois. Le MPLC permet théoriquement de combiner toute la puissance des N faisceaux d'entrée FLI dans le mode « parfait » HG_{00} .

[0060] On désigne un mode de sortie préféré comme mode cible ou principal OMP correspondant au faisceau FLSp de la figure 7, et les trois (N-1) autres modes de sortie comme modes secondaires OMs, correspondant aux faisceaux FLSs. La base de modes d'entrée est constituée d'un super mode EMs transformé par le MPLC dans le mode de sortie principal, et de 3 (N-1) autres modes d'entrée EMe.

[0061] Dans cet exemple le supermode EMs se transforme en un faisceau gaussien à la position désirée (A) et les autres modes d'entrée EMe sont convertis en un faisceau FLSs à une position séparée spatialement (B, C et D). On obtient ainsi un décalage discret d'un faisceau de sortie HG_{00} en fonction des phases appliquées aux faisceaux d'entrée FLI. Cette utilisation NMS « pixel like » illustre la capacité d'un MPLC de réaliser un dépointage du faisceau de sortie, c'est à dire de déplacer la position du faisceau de sortie en fonction des différences de phase appliquées au N faisceaux d'entrée. Cette application d'intérêt est par exemple décrite dans la publication de Billaud et al « Optimal coherent beam combining based on Multi-Plane Light Conversion for high throughput optical feeder links », International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) IEEE, 2019.

[0062] Il est également connu de l'état de la technique l'utilisation d'un composant MPLC pour réaliser une mise en phase active de plusieurs faisceaux lasers

(QCLs) issus d'une même source maître et amplifiés individuellement, en association avec des modulateurs de phase (configuration dite à amplificateurs) comme décrit dans le document précité WO 2020/161126. Les faisceaux issus des différents amplificateurs sont contrôlés en phase à l'aide des modulateurs avant d'entrer dans le composant MPLC qui les combine spatialement. Cette solution, bien qu'efficace et pouvant fonctionner avec un grand nombre de voies, est complexe à mettre en œuvre, en particulier avec des milieux amplificateurs de type QCL.

[0063] Le dispositif de mise en phase 10 selon l'invention est illustré figure 8. Il comprend une pluralité de N cavités semi-ouvertes, chaque cavité semi-ouverte comprenant un milieu à gain GM et un miroir associé MC dénommé miroir de fond de cavité. De plus chaque cavité semi-ouverte est configurée pour générer un faisceau élémentaire EB (du côté opposé à celui du miroir MC) qui est collimaté, typiquement avec une microlentille dédiée CL.

[0064] Le dispositif 10 comprend également un dispositif de conversion multiplan MPLC configuré pour convertir un ensemble de N modes spatiaux d'entrée formant une base d'entrée en un ensemble de N modes spatiaux de sortie formant une base de sortie, dont le principe a été décrit plus haut. La base de sortie comprend un mode spatial de sortie souhaité, dénommé mode principal PM, et N-1 autres modes de sortie dénommés modes secondaires SM.

[0065] Le dispositif comprend en outre un miroir de sortie OM partiellement réfléchissant configuré pour former, avec les N miroirs de fond de cavité, une cavité laser commune à la pluralité de milieux à gain, dans laquelle est disposé le dispositif MPLC. Avec la présence du miroir OM qui ferme la cavité, cette cavité commune à tous les milieux à gain permet la combinaison cohérente des faisceaux élémentaires EB. En effet l'utilisation d'une cavité commune à tous les « lasers » (cavités semi ouvertes + miroir OM), où la rétroaction optique est la même pour tous les lasers, sélectionne naturellement un mode laser (longitudinal et transverse) commun à tous les lasers. Cela effectue la combinaison cohérente de toutes les voies. On dénomme PBout le faisceau principal après sa sortie de la cavité (fraction de PB transmise par le miroir OM).

[0066] Les N faisceaux élémentaires collimatés en phase sont configurés pour former un mode spatial d'entrée du dispositif de conversion multiplan MPLC choisi de sorte que le dispositif de conversion multiplan génère le mode spatial de sortie souhaité ou mode principal PM, associé à un faisceau principal PB. La pluralité de faisceaux élémentaires entre ainsi dans un composant MPLC conçu pour faire la combinaison cohérente des faisceaux. Les N faisceaux élémentaires forment le supermode tel que décrit plus haut : un mode de sortie particulier, le mode dit principal, correspond à un jeu de phase donné des voies d'entrée. Le miroir réfléchissant est configuré pour partiellement réfléchir le faisceau principal FB.

[0067] Des faisceaux secondaires SB sont associés aux modes secondaires de sortie. Si tous les faisceaux de sortie, c'est-à-dire le faisceau principal (mode principal) et les faisceaux secondaires (modes secondaires), sont localisés à la même position (exemple de la figure 5), la cavité est apte à laser sur l'un ou l'autre de ces modes, voire de sauter d'un mode à l'autre, et la sélection du mode principal n'est pas aisée. Ainsi préférentiellement le dispositif de conversion multiplan MPLC est en outre configuré pour que le mode principal soit spatialement séparé des N-1 autres modes de sortie dits modes secondaires SM, et le faisceau principal est partiellement réfléchi par le miroir de sortie. La séparation spatiale du faisceau principal PB des faisceaux secondaires SB permet, via le miroir OM, de sélectionner de manière certaine le mode principal comme le mode sur lequel le résonateur formé par la cavité commune va laser.

[0068] Un exemple d'entrée/sortie d'un MPLC convenant pour la réalisation du dispositif 10 selon l'invention est illustré sur la figure 6. Dans cet exemple le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que les modes secondaires, soit les faisceaux secondaires SB, soient localisés à une position différente B, C, D, elles-mêmes différentes de la position A du faisceau principal FB.

[0069] Un autre exemple d'entrée/sortie d'un MPLC selon l'invention convenant pour la réalisation du dispositif 10 selon l'invention est illustré figure 9. Dans cet exemple le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que tous les modes secondaires, soit tous les faisceaux secondaires SB, soient localisés à la même position P2, différente de la position P1 du faisceau PB. Dans cet exemple la base de sortie est une base de Hermite-Gauss.

[0070] La base de sortie est par exemple choisie parmi : une base de Hermite-Gauss (voir figure 9), une base de Laguerre-Gauss, une base de faisceaux spatialement séparés (voir figure 6), toute autre base.

[0071] Préférentiellement pour la qualité du faisceau de sortie (diffraction minimale), le dispositif de conversion multiplan selon l'invention est configuré pour que le faisceau principal soit gaussien c'est-à-dire selon le mode HG_{00} .

[0072] Préférentiellement le mode spatial d'entrée choisi correspond à une amplitude sensiblement égale des N faisceaux élémentaires. En théorie le MPLC est préférentiellement conçu pour que les faisceaux élémentaires du supermode d'entrée présentent une intensité identique. Cependant la réalisation pratique du MPLC conduit à des pertes différentes sur chacune des voies, et selon un mode de réalisation on compense ces pertes différenciées sur la puissance d'entrée des N faisceaux élémentaires.

[0073] Ainsi l'ensemble de milieux à gain constitue l'entrée espace libre d'un MPLC permettant d'effectuer la combinaison cohérente de faisceaux, i.e. un mode de sortie correspond à une distribution de phase des modes d'entrée, pour une puissance sensiblement égale sur toutes les voies. En sortie du MPLC, un coupleur de sortie laser (miroir partiellement réfléchissant) ferme le résonateur commun à toutes les voies. Pour un MPLC conçu de sorte que le mode principal soit un faisceau gaussien, le faisceau en sortie du dispositif 10 selon l'invention est alors un faisceau laser de diffraction minimale (mode gaussien).

[0074] La figure 10 illustre le faisceau global en sortie du MPLC, OLB, avant (A) et après (B) la fermeture de la cavité par le miroir OM, pour une base de sortie composée de faisceaux gaussiens spatialement séparés. En A les faisceaux élémentaires en entrée présentent entre eux une phase quelconque, le faisceau OLB est une superposition aléatoire de tous les modes de sortie et l'énergie incidente est répartie dans tous les faisceaux de sortie. En B la cavité est fermée et lase sur le mode principal, les faisceaux élémentaires d'entrée présentent une relation de phase correspondant au supermode d'entrée associé au mode principal. En théorie toute l'énergie se concentre dans le faisceau principal FP du fait de la fermeture de la cavité dont la résonance sélectionne naturellement le faisceau principal FP. En pratique une faible fraction de l'énergie se retrouve

dans les faisceaux secondaires du fait des imperfections de fabrication du composant MPLC.

[0075] L'utilisation d'un MPLC comme résonateur commun pour la mise en phase passive permet de lever les contraintes des techniques connues de l'état de l'art, avec une mise en œuvre pratique plus simple. En effet, la production de MPLCs est maîtrisée par un fournisseur (société Cailabs) qui en contrôle finement l'alignement, contrairement aux solutions à base de composants diffractifs (DOE, par exemple réseau de Dammann). L'alignement du composant MPLC est certes critique, similaire à celle d'un DOE, mais est maîtrisé par le fournisseur qui le produit en série. Ainsi, la solution proposée à base de MPLC selon l'invention bénéficie d'une chaîne de valeur déjà existante, facilitant sa mise en œuvre.

[0076] Le composant MPLC permet en théorie une concentration de 100% de l'énergie des faisceaux élémentaires d'entrée dans le faisceau principal de sortie. Un MPLC a l'avantage d'avoir de faibles pertes et donc de limiter les pertes du résonateur et d'optimiser la puissance laser. De plus, ce composant est robuste, l'alignement de celui-ci est bien maîtrisé et l'encombrement du composant est limité. La solution selon l'invention obtenue est alors compacte et adaptée aux environnements militaires.

[0077] Le dispositif selon l'invention est particulièrement bien adapté à la mise en commun de quelques voies optiques, permettant d'atteindre la dizaine de watts de puissance optique en sortie nécessaire aux applications de contremesures optroniques. Le système obtenu est compact, robuste et facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite pas l'ajout de modulateurs de phase.

[0078] Selon un mode de réalisation le miroir de sortie OM présente une surface concave et est disposé de sorte que le faisceau principal soit situé au centre du miroir de sortie, tel qu'illustré figure 11. Le rayon de courbure du coupleur de sortie sélectionne naturellement un seul spot.

[0079] Selon un mode de réalisation illustré figure 12 le miroir de sortie présente une dimension adaptée pour réfléchir uniquement le faisceau principal. Ce miroir est par exemple plan ou concave avec le faisceau principal disposé au centre du miroir. L'alignement du résonateur est dans ce dernier cas grandement simplifié.

[0080] Selon un premier mode de réalisation chaque cavité semi-ouverte est une cavité semi-ouverte d'un laser à cascade quantique ou QCL. Typiquement les lasers QCL émettent dans IR moyen à lointain (incluant la bande 3-12 μm). Préférentiellement le miroir de fond de cavité MC est un dépôt réfléchissant déposé sur une face du milieu à gain. Préférentiellement les QCLs sont agencés sur une barrette, ou sont placés côte à côte sur une même puce, de sorte qu'ils soient suffisamment proches les uns des autres pour constituer l'entrée du composant MPLC. Le couplage des faisceaux à la sortie du milieu à gain du côté opposé aux miroirs MC avec une matrice de micro-lentilles, ou des lentilles placées individuellement, réalise la collimation des faisceaux.

[0081] Selon un deuxième mode de réalisation chaque milieu à gain est une fibre optique active AF pompée optiquement, typiquement par une diode laser DL, et le miroir de fond de cavité associé est un miroir de Bragg BM fibré, tel qu'illustré figure 13. Le miroir de Bragg est soit extérieur et connecté à la fibre soit directement inscrit dans la fibre active. La fibre optique active est typiquement dopée Yb, Er, Tm, Ho, Nd... Ce mode de réalisation est adapté pour l'émission de longueurs d'onde autour de 1 μm , 1.5 μm et 2 μm .

[0082] Selon un troisième mode de réalisation chaque milieu à gain est un cristal laser, le miroir de fond de cavité étant constitué soit d'une face traitée pour réfléchir une longueur d'onde laser servant de miroir de fond de cavité, soit d'un miroir séparé. Les longueurs d'onde associées sont diverses, fonction du cristal employé, par exemple 1064 nm pour Nd, 1030 nm pour Yb, et autour de 1550 nm pour Er.

[0083] Selon une variante on effectue une rétroaction de la puissance de sortie du dispositif 10 sur le courant de pompe des différentes voies laser, de manière à optimiser la puissance de sortie totale en équilibrant correctement les voies. Pour mettre en œuvre cette variante il convient que chaque milieu à gain soit pompé via un courant d'alimentation AC. Ce pompage est soit direct, comme par exemple pour les QCLs qui sont pompés électriquement, soit indirect comme par exemple pour les fibres optiques actives qui sont pompées optiquement par des diodes lasers, elles-mêmes pompées électriquement via un courant d'alimentation. Avec la rétroaction la puissance de chaque cavité semi-ouverte

est optimisée pour minimiser les pertes pour une cavité donnée et donc optimiser la puissance de sortie. La rétroaction permet également de trouver un mode laser longitudinal commun.

[0084] Selon cette variante le dispositif selon l'invention comprend en outre un détecteur Det configuré pour détecter la puissance sur laquelle s'opère la rétroaction et une électronique d'asservissement SCE configurée pour rétroagir sur les différents courants d'alimentation AC.

[0085] Selon un premier mode de réalisation illustré figure 14 a) le détecteur Det est configuré pour détecter une fraction du faisceau de sortie PBout et l'électronique SCE rétroagit sur les courants d'alimentation de manière à maximiser la puissance de la fraction de PBout détectée, et donc la puissance du faisceau de sortie Pout. Pour cela on positionne une lame de prélèvement BS sur le trajet de PBout, ce qui présente l'inconvénient de prélever une fraction de PBout qui n'est donc pas disponible pour l'application.

[0086] Selon un deuxième mode de réalisation illustré figure 14 b) le détecteur Det est configuré pour détecter au moins une fraction d'au moins un faisceau secondaire SB associé à un mode secondaire, et pour rétroagir sur les courants d'alimentation de manière à minimiser la puissance de l'au moins au faisceau secondaire détecté. Préférentiellement le détecteur est configuré pour détecter tous les faisceaux secondaires, soit à l'aide d'une optique de focalisation soit parce que le MPLC a été conçu de manière à localiser tous les modes secondaires à la même position (voir par exemple la figure 9). Cette configuration présente l'avantage de ne pas impacter la puissance du faisceau de sortie PBout.

[0087] Un dispositif 10 selon l'invention avec une barrette de QCLs comme milieu à gain et une rétroaction selon le deuxième mode de réalisation de la variante est illustré figure 15.

[0088] Un dispositif 10 selon l'invention avec des fibres optiques actives comme milieu à gain et une rétroaction selon le premier mode de réalisation de la variante est illustré figure 16.

REVENDECATIONS

1. Dispositif (10) de mise en phase de faisceaux lasers comprenant :
 - une pluralité de N cavités semi-ouvertes, chaque cavité semi-ouverte comprenant un milieu à gain (GM) et un miroir associé (MC) dénommé miroir de fond de cavité, et étant configurée pour générer un faisceau élémentaire (EB) collimaté,
 - un dispositif de conversion multiplan (MPLC) configuré pour convertir un ensemble de N modes spatiaux d'entrée formant une base d'entrée en un ensemble de N modes spatiaux de sortie formant une base de sortie, la base de sortie comprenant un mode spatial de sortie souhaité, dénommé mode principal (PM), et N-1 autres modes de sortie dénommés modes secondaires (SM),
 - un miroir de sortie (OM) partiellement réfléchissant configuré pour former, avec les N miroirs de fond de cavité, une cavité laser commune à ladite pluralité de milieux à gain dans laquelle est disposé le dispositif de conversion multiplan et permettant la combinaison cohérente desdits faisceaux élémentaires,
 - les N faisceaux élémentaires collimatés en phase étant configurés pour former un mode spatial d'entrée du dispositif de conversion multiplan choisi de sorte que le dispositif de conversion multiplan génère le mode principal (PM), associé à un faisceau principal (PB),
 - le miroir de sortie étant configuré pour réfléchir partiellement ledit faisceau principal.
2. Dispositif de mise en phase selon la revendication précédente dans lequel le dispositif de conversion multiplan est en outre configuré pour que le mode principal soit spatialement séparé des N-1 modes secondaires (SM).

3. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel le miroir de sortie présente une surface concave et est disposé de sorte que le faisceau principal soit situé au centre dudit miroir de sortie.
4. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications 2 ou 3 dans lequel le miroir de sortie présente une dimension adaptée pour réfléchir uniquement le faisceau principal.
5. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel chaque cavité semi-ouverte est une cavité semi-ouverte d'un laser à cascade quantique.
6. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications 1 à 4 dans lequel chaque milieu à gain est une fibre optique active pompée optiquement et le miroir de fond de cavité associé est un miroir de Bragg fibré.
7. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications 1 à 4 dans lequel chaque milieu à gain est un cristal laser, le miroir de fond de cavité étant constitué d'une face traitée pour réfléchir une longueur d'onde laser servant de miroir de fond de cavité ou d'un miroir séparé.
8. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que le faisceau principal soit gaussien.
9. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que le mode spatial d'entrée choisi corresponde à une amplitude sensiblement égale des N faisceaux élémentaires.

10. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel le dispositif de conversion multiplan est configuré pour que tous les modes secondaires soient localisés à la même position.
11. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications précédentes dans lequel chaque milieu à gain est pompé via un courant d'alimentation (AC), comprenant en outre un détecteur (Det) configuré pour détecter une fraction du faisceau principal à la sortie de la cavité (PBout) et une électronique d'asservissement (SCE) configurée pour rétroagir sur les courants d'alimentation de manière à maximiser une puissance du faisceau détecté.
12. Dispositif de mise en phase selon l'une des revendications 1 à 10 dans lequel chaque milieu à gain est pompé via un courant d'alimentation, comprenant en outre un détecteur (Det) configuré pour détecter au moins une fraction d'au moins un faisceau secondaire associé à un mode secondaire et une électronique d'asservissement (SCE) configurée pour rétroagir sur les courants d'alimentation de manière à minimiser une puissance de l'au moins un faisceau secondaire détecté.

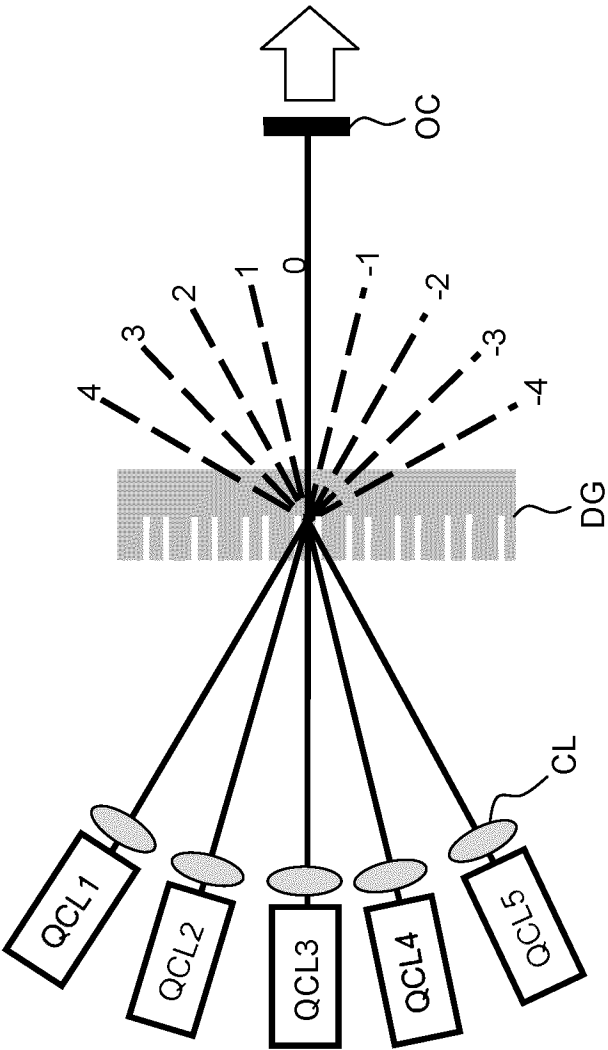


FIG.1

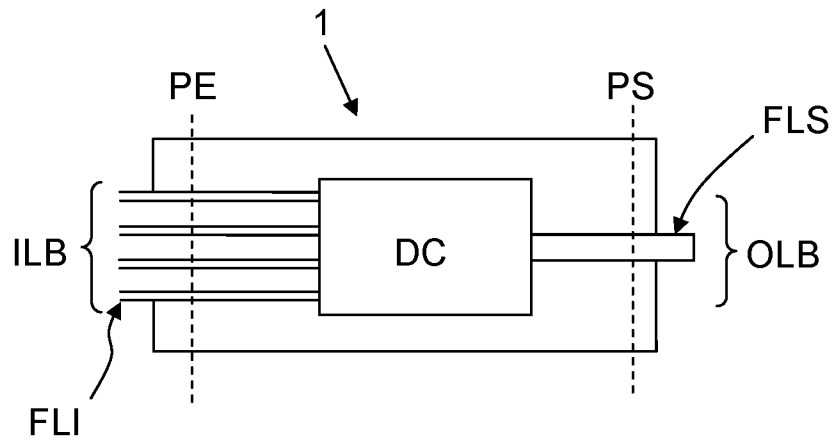


FIG. 2

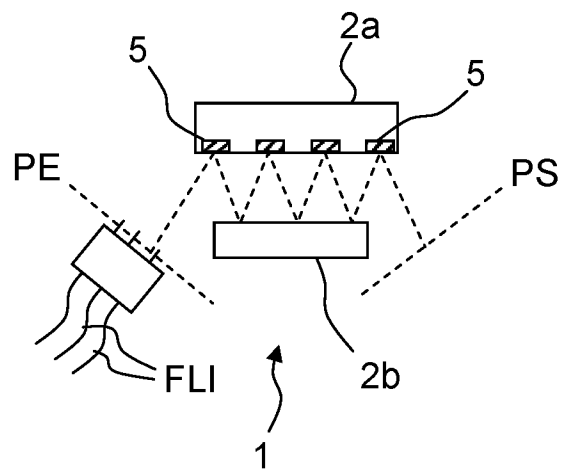


FIG. 3

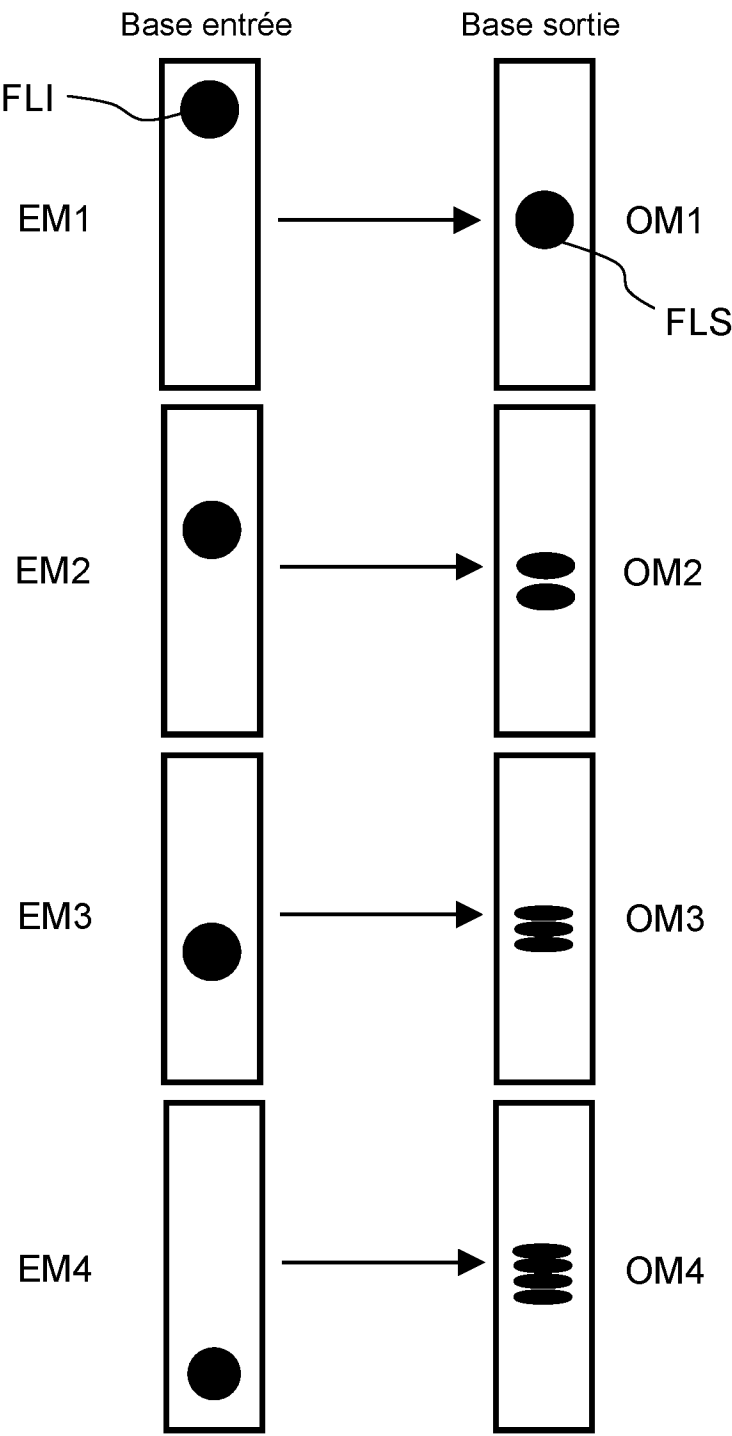


FIG.4

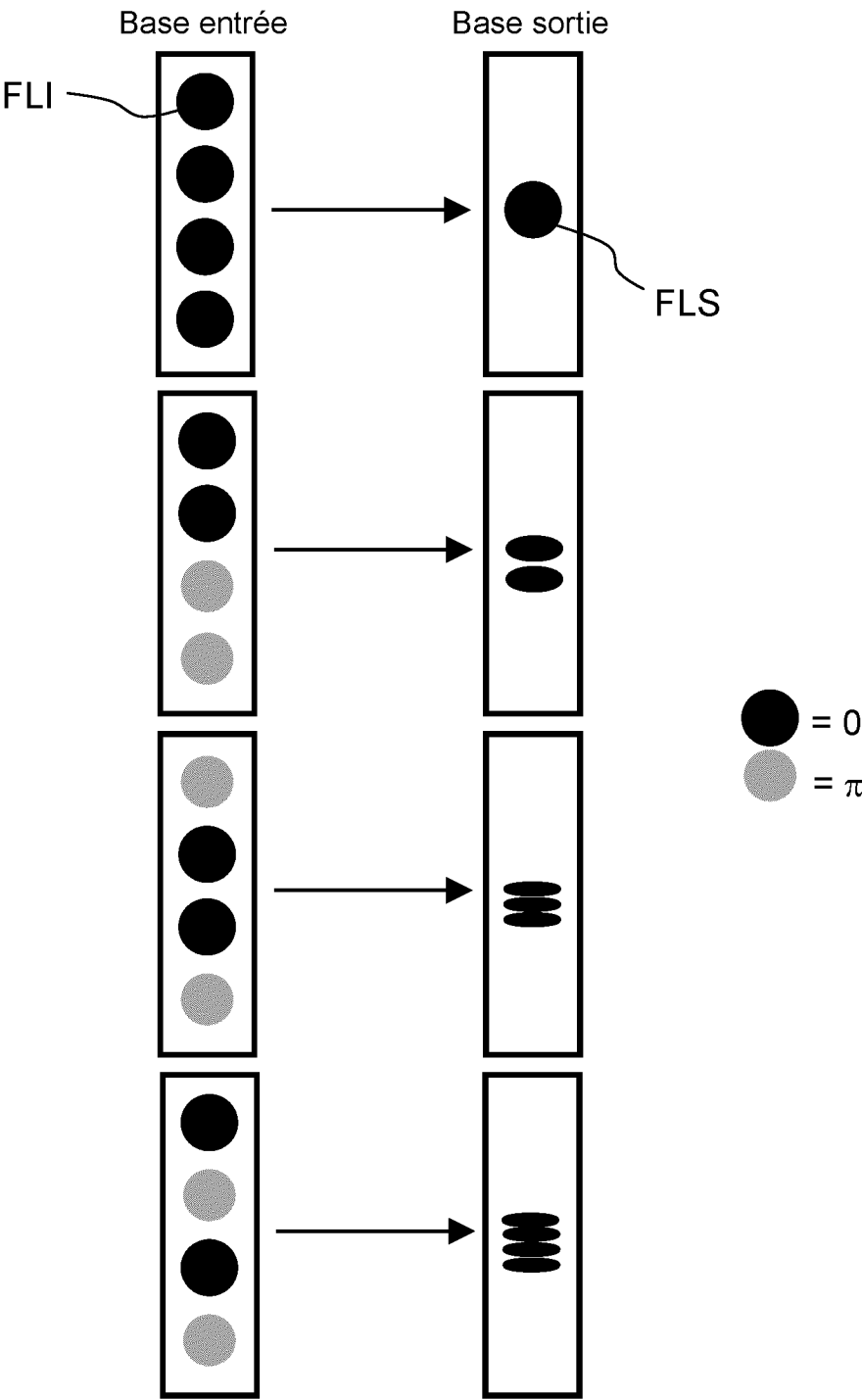


FIG.5

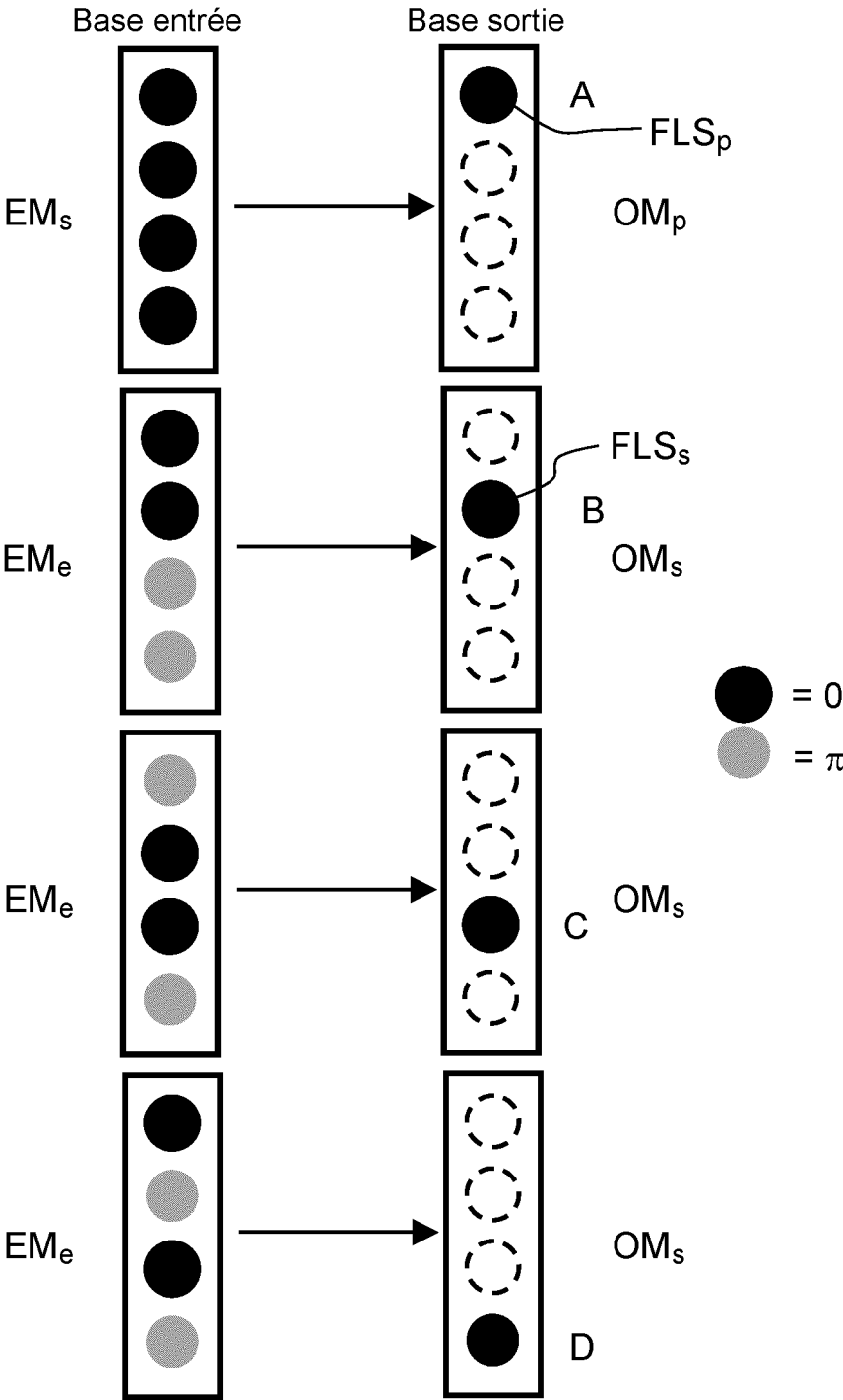


FIG.6

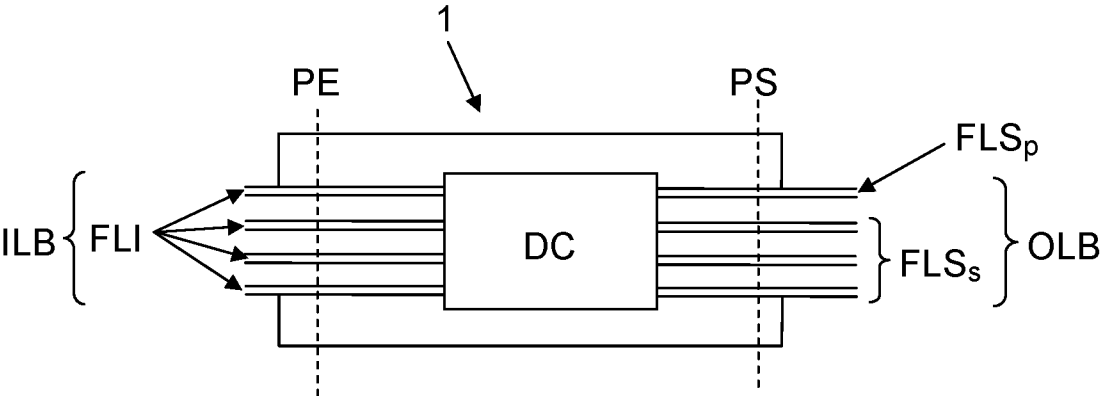


FIG.7

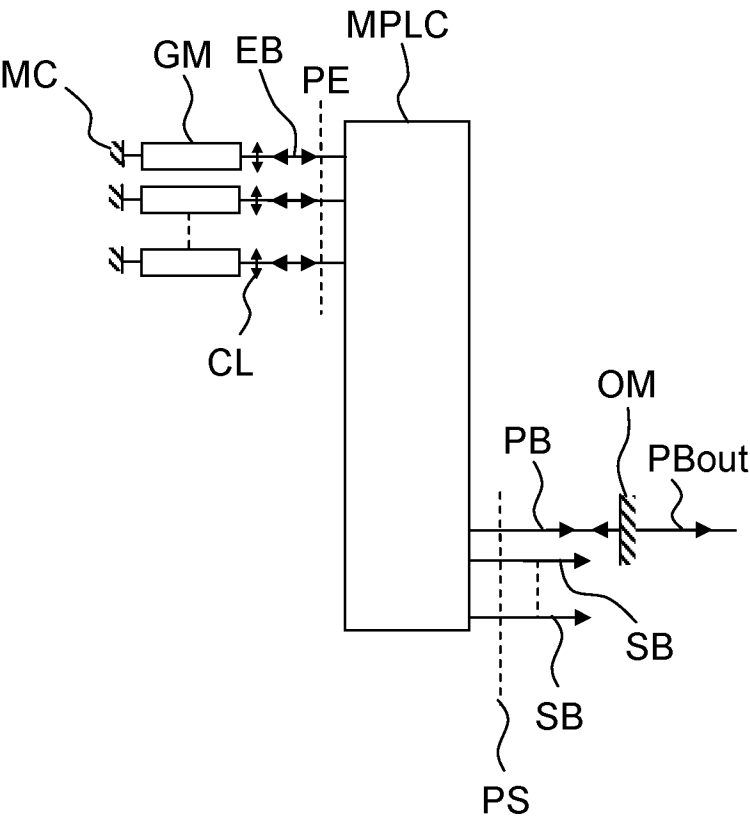


FIG.8

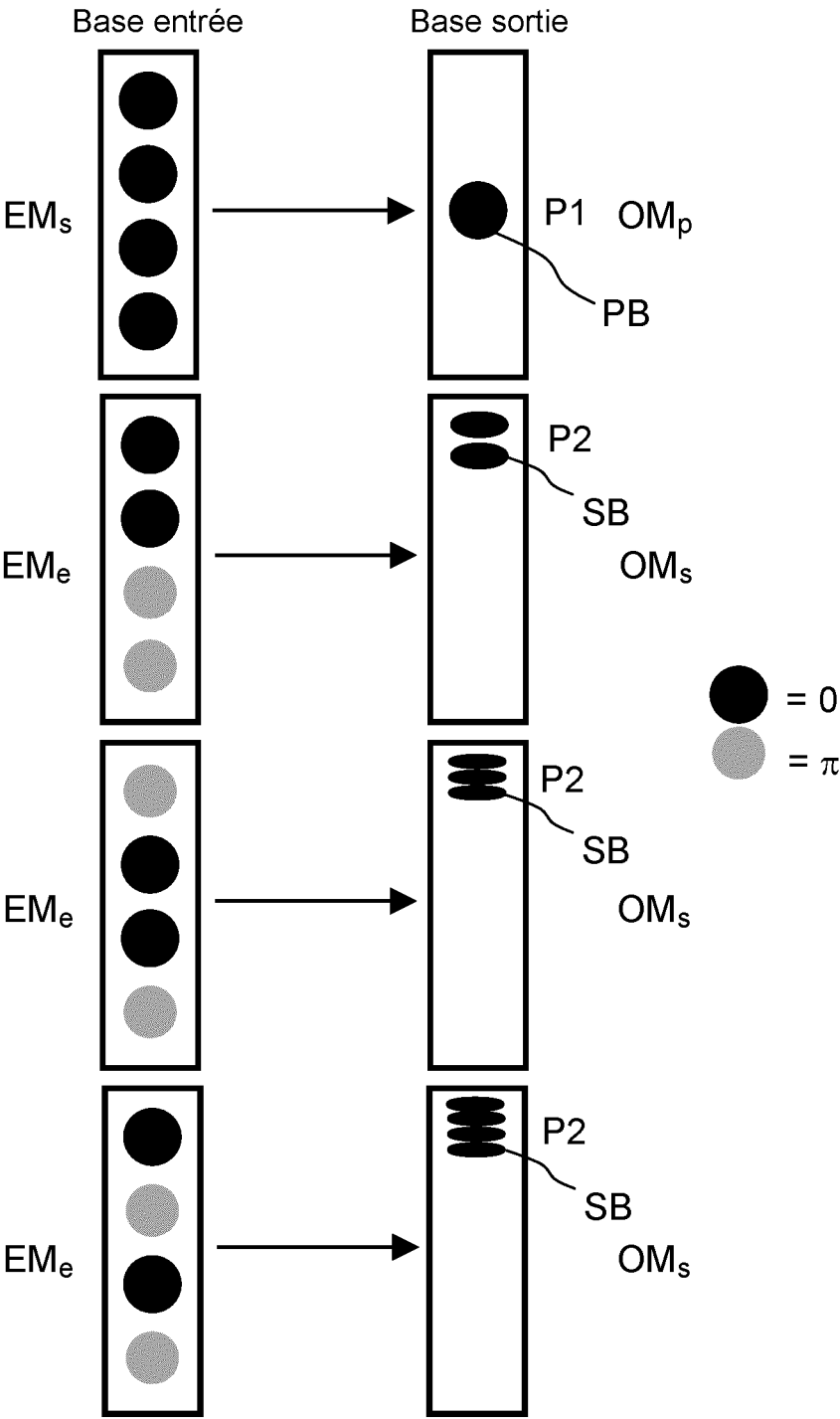


FIG.9

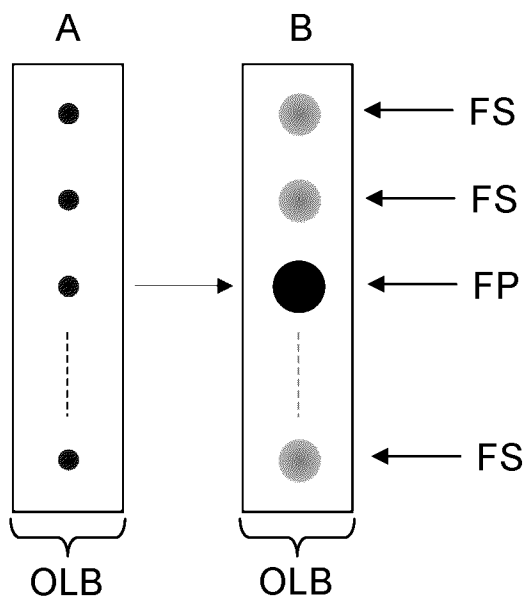


FIG.10

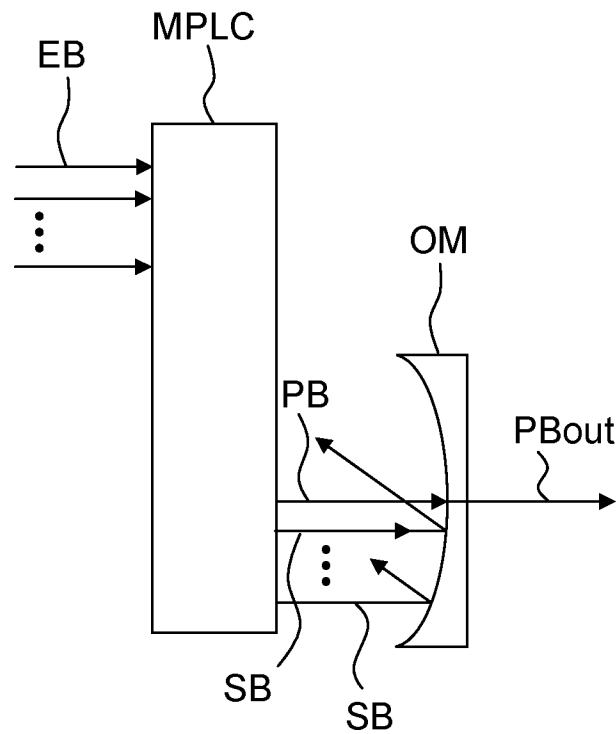


FIG.11

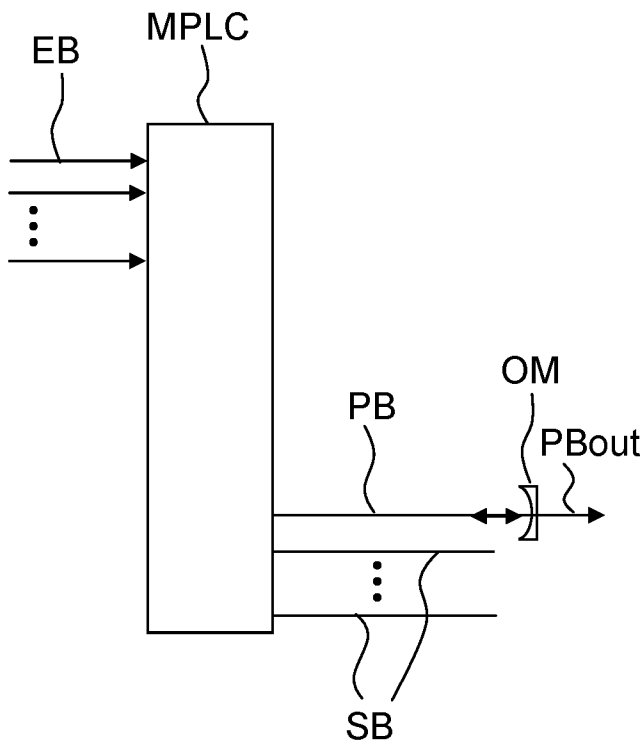


FIG.12

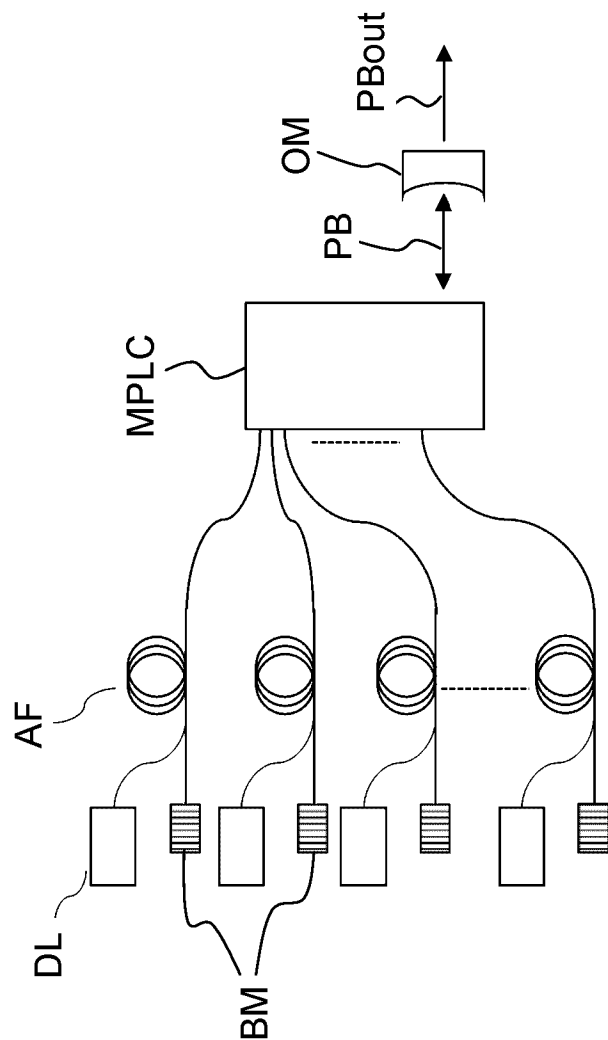


FIG.13

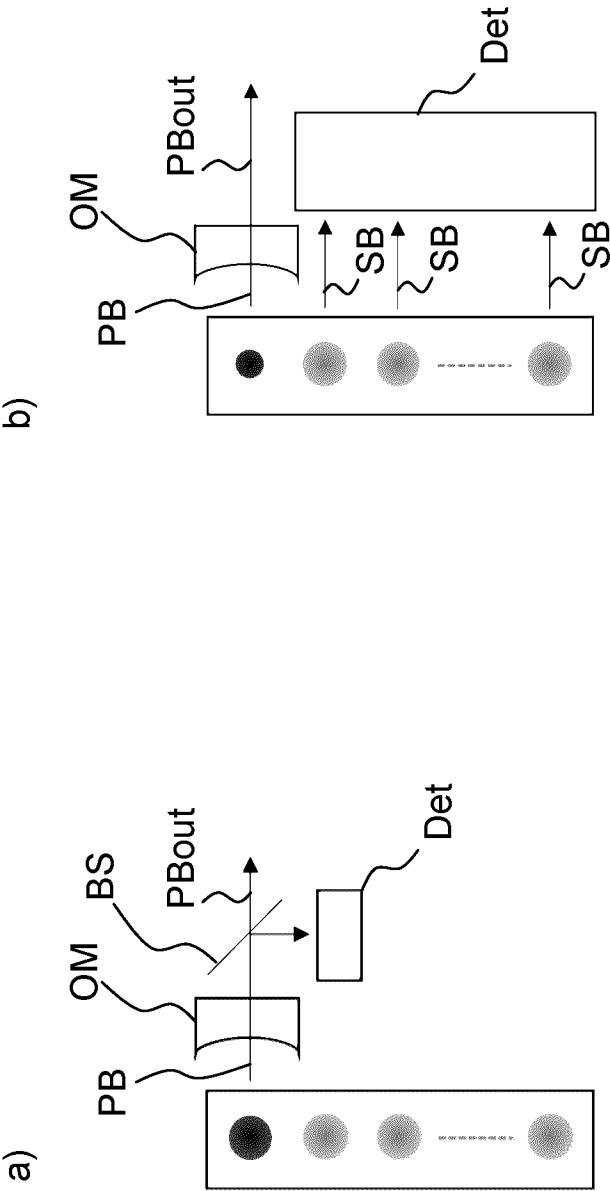


FIG.14

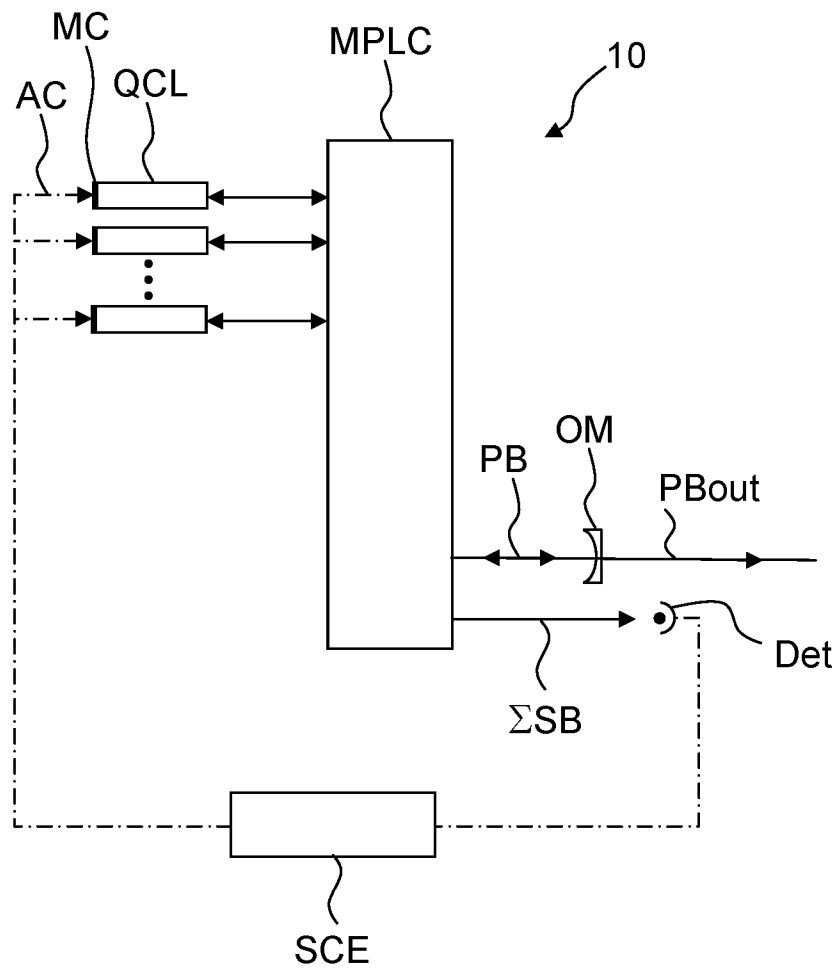


FIG.15

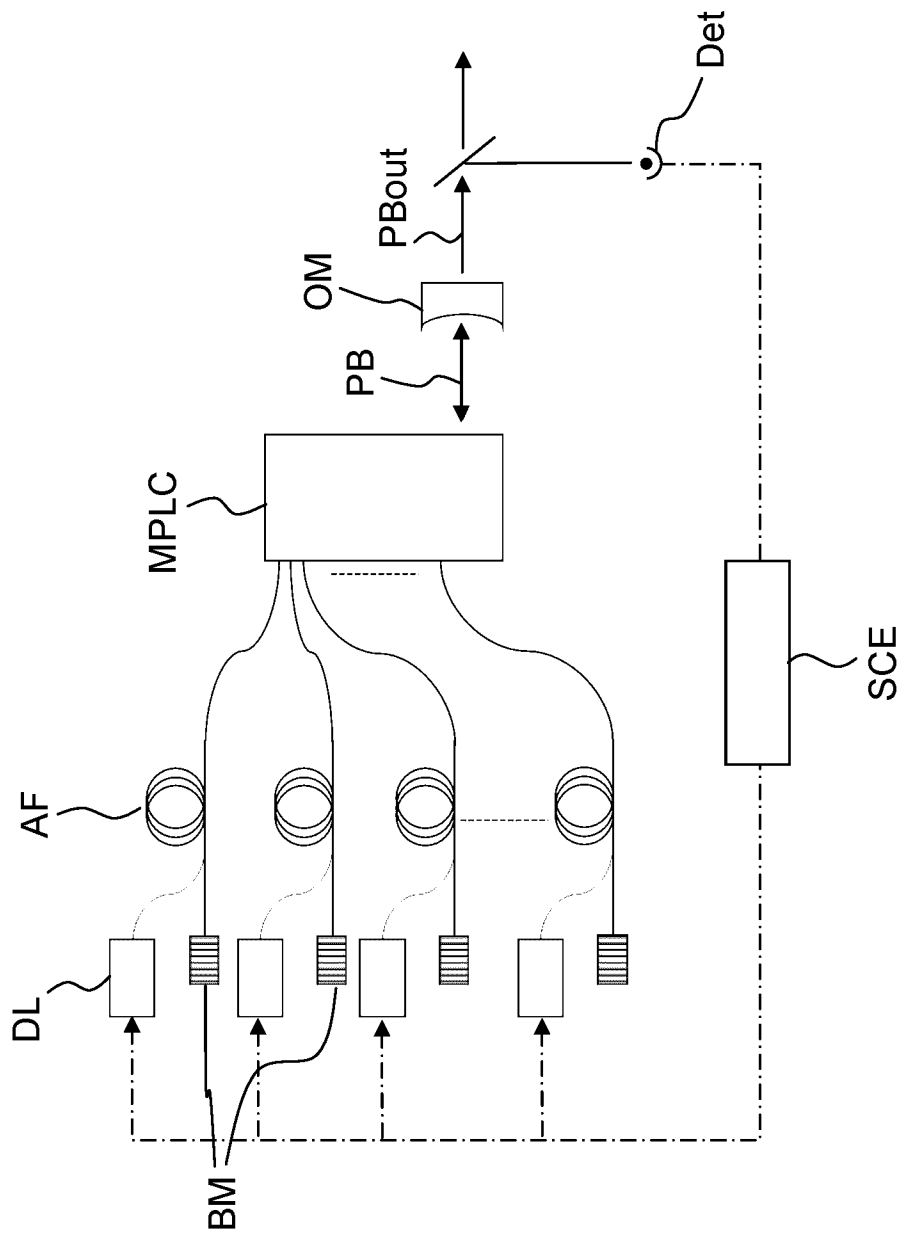


FIG.16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/084474

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H01S 3/23**(2006.01)i; **H01S 5/40**(2006.01)i; **H01S 3/067**(2006.01)n; **H01S 5/34**(2006.01)n

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 practicable, search terms used)

EPO-Internal, 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.
A	US 6717719 B1 (MOORE GERALD T [US]) 06 April 2004 (2004-04-06) figures 8, 3-7	1-12
A	US 7933301 B2 (YEDA RES & DEV [IL]) 26 April 2011 (2011-04-26) figure 3	1-12
A	CN 103430404 A (CILAS) 04 December 2013 (2013-12-04) figure 1	1-12
A	US 10516246 B2 (NASA [US]) 24 December 2019 (2019-12-24) figure 3	1-12
A	US 2014268314 A1 (DUECK ROBERT H [US]) 18 September 2014 (2014-09-18) figure 9	1-12
A	CN 105765801 B (TRUMPF LASER GMBH) 10 May 2019 (2019-05-10) figures 1, 2	1-12



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 application or patent 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

21 January 2025

Date of mailing of the international search report

07 February 2025

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Lendroit, Stéphane

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/084474

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	BLOOM G ET AL. "Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating" <i>OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US</i> , Vol. 36, No. 19, 01 October 2011 (2011-10-01), pages 3810-3812, [retrieved on 2011-09-23] DOI: 10.1364/OL.36.003810 ISSN: 0146-9592, XP001569691 cited in the application the whole document Dammann grating	1-12
A	WO 2019162637 A1 (CAILABS [FR]) 29 August 2019 (2019-08-29) cited in the application the whole document MPLC	1-12
A	WO 2020161126 A1 (CAILABS [FR]) 13 August 2020 (2020-08-13) cited in the application the whole document MPLC	1-12
A	BILLAUD ANTONIN ET AL. "Optimal Coherent Beam Combining Based on Multi-Plane Light Conversion for High Throughput Optical Feeder Links" <i>2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPTICAL SYSTEMS AND APPLICATIONS (ICSOS), IEEE</i> , 14 October 2019 (2019-10-14), pages 1-5 DOI: 10.1109/ICSOS45490.2019.8978969 XP033702253 the whole document MPLC	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/084474

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	6717719	B1	06 April 2004	NONE			
US	7933301	B2	26 April 2011	AT	E522012	T1	15 September 2011
				EP	1706922	A2	04 October 2006
				EP	2259392	A2	08 December 2010
				US	2007147445	A1	28 June 2007
				US	2009245295	A1	01 October 2009
				WO	2005060052	A2	30 June 2005
CN	103430404	A	04 December 2013	CN	103430404	A	04 December 2013
				EP	2649688	A1	16 October 2013
				FR	2968468	A1	08 June 2012
				US	2013342896	A1	26 December 2013
				WO	2012076785	A1	14 June 2012
US	10516246	B2	24 December 2019	NONE			
US	2014268314	A1	18 September 2014	US	2014268314	A1	18 September 2014
				WO	2014204538	A2	24 December 2014
CN	105765801	B	10 May 2019	CN	105765801	A	13 July 2016
				EP	3072190	A1	28 September 2016
				JP	6400099	B2	03 October 2018
				JP	2016539505	A	15 December 2016
				PL	3072190	T3	28 February 2019
				US	2015146282	A1	28 May 2015
				US	2016204570	A1	14 July 2016
				WO	2015075102	A1	28 May 2015
WO	2019162637	A1	29 August 2019	CN	111771147	A	13 October 2020
				EP	3759533	A1	06 January 2021
				FR	3078412	A1	30 August 2019
				US	2020409141	A1	31 December 2020
				US	2024103266	A1	28 March 2024
				WO	2019162637	A1	29 August 2019
WO	2020161126	A1	13 August 2020	CN	113383264	A	10 September 2021
				EP	3921695	A1	15 December 2021
				FR	3092404	A1	07 August 2020
				US	2022099984	A1	31 March 2022
				WO	2020161126	A1	13 August 2020

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H01S3/23 H01S5/40 ADD. H01S3/067 H01S5/34		
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, 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
A	US 6 717 719 B1 (MOORE GERALD T [US]) 6 avril 2004 (2004-04-06) figures 8, 3-7 -----	1 - 12
A	US 7 933 301 B2 (YEDA RES & DEV [IL]) 26 avril 2011 (2011-04-26) figure 3 -----	1 - 12
A	CN 103 430 404 A (CILAS) 4 décembre 2013 (2013-12-04) figure 1 -----	1 - 12
A	US 10 516 246 B2 (NASA [US]) 24 décembre 2019 (2019-12-24) figure 3 ----- - / - -	1 - 12
☒ 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 21 janvier 2025		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 07/02/2025
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 Lendroit, Stéphane

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	US 2014/268314 A1 (DUECK ROBERT H [US]) 18 septembre 2014 (2014-09-18) figure 9 -----	1-12
A	CN 105 765 801 B (TRUMPF LASER GMBH) 10 mai 2019 (2019-05-10) figures 1, 2 -----	1-12
A	BLOOM G ET AL: "Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Dammann grating", OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, US, vol. 36, no. 19, 1 octobre 2011 (2011-10-01), pages 3810-3812, XP001569691, ISSN: 0146-9592, DOI: 10.1364/OL.36.003810 [extrait le 2011-09-23] cité dans la demande le document en entier Dammann grating -----	1-12
A	WO 2019/162637 A1 (CAILABS [FR]) 29 août 2019 (2019-08-29) cité dans la demande le document en entier MPLC -----	1-12
A	WO 2020/161126 A1 (CAILABS [FR]) 13 août 2020 (2020-08-13) cité dans la demande le document en entier MPLC -----	1-12
A	BILLAUD ANTONIN ET AL: "Optimal Coherent Beam Combining Based on Multi-Plane Light Conversion for High Throughput Optical Feeder Links", 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPACE OPTICAL SYSTEMS AND APPLICATIONS (ICSOS), IEEE, 14 octobre 2019 (2019-10-14), pages 1-5, XP033702253, DOI: 10.1109/ICSOS45490.2019.8978969 le document en entier MPLC -----	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2024/084474

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 6717719	B1	06-04-2004	AUCUN	
US 7933301	B2	26-04-2011	AT E522012 T1	15-09-2011
			EP 1706922 A2	04-10-2006
			EP 2259392 A2	08-12-2010
			US 2007147445 A1	28-06-2007
			US 2009245295 A1	01-10-2009
			WO 2005060052 A2	30-06-2005
CN 103430404	A	04-12-2013	CN 103430404 A	04-12-2013
			EP 2649688 A1	16-10-2013
			FR 2968468 A1	08-06-2012
			US 2013342896 A1	26-12-2013
			WO 2012076785 A1	14-06-2012
US 10516246	B2	24-12-2019	AUCUN	
US 2014268314	A1	18-09-2014	US 2014268314 A1	18-09-2014
			WO 2014204538 A2	24-12-2014
CN 105765801	B	10-05-2019	CN 105765801 A	13-07-2016
			EP 3072190 A1	28-09-2016
			JP 6400099 B2	03-10-2018
			JP 2016539505 A	15-12-2016
			PL 3072190 T3	28-02-2019
			US 2015146282 A1	28-05-2015
			US 2016204570 A1	14-07-2016
			WO 2015075102 A1	28-05-2015
WO 2019162637	A1	29-08-2019	CN 111771147 A	13-10-2020
			EP 3759533 A1	06-01-2021
			FR 3078412 A1	30-08-2019
			US 2020409141 A1	31-12-2020
			US 2024103266 A1	28-03-2024
			WO 2019162637 A1	29-08-2019
WO 2020161126	A1	13-08-2020	CN 113383264 A	10-09-2021
			EP 3921695 A1	15-12-2021
			FR 3092404 A1	07-08-2020
			US 2022099984 A1	31-03-2022
			WO 2020161126 A1	13-08-2020