(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 143 892***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **22 13383**

(51) Int Cl[8] : ***H 01 S 3/00*** *(2023.01)*

(12) **BREVET D'INVENTION** **B1**

(54) Dispositif optique dispersif et système laser à impulsions brèves comprenant un tel dispositif optique dispersif.

(22) **Date de dépôt :** 14.12.22.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 21.06.24 Bulletin 24/25.

(45) **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 29.11.24 Bulletin 24/48.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *ILASIS LASER SAS* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** DELOISON Florent, DESLANDES Pierre et SALIN François.

(73) **Titulaire(s) :** ILASIS LASER Société par actions simplifiée.

(74) **Mandataire(s) :** JACOBACCI CORALIS HARLE.

FR 3 143 892 - B1

Description

Titre de l'invention : Dispositif optique dispersif et système laser à impulsions brèves comprenant un tel dispositif optique dispersif

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine technique des lasers de puissance à impulsions.

[0002] Plus précisément, la présente invention concerne un dispositif optique dispersif apte à modifier la dérive de fréquence d'un faisceau d'impulsions laser pour étirer ou comprimer ces impulsions laser.

Technique antérieure

[0003] L'avènement des impulsions laser ultra-brèves a permis de très nombreuses applications dans des domaines scientifiques, industriels ou médicaux. Néanmoins l'amplification directe d'impulsions brèves est limitée par l'apparition d'effets optiques non-linéaires durant la propagation dans les amplificateurs optiques. Plusieurs solutions ont été trouvées pour pallier cette difficulté dont l'amplification à dérive de fréquence. Dans tous les cas, la production d'impulsions laser très intenses et très brèves passe par l'amplification d'impulsions de durée longue, par exemple de plusieurs dizaines de picosecondes, et la compression des impulsions amplifiées vers une durée notablement plus brève, par exemple de 10 femtoseconde à 1 picoseconde. Un compresseur apte à fournir une compression d'impulsions comporte classiquement une ligne à retard dispersive. La ligne à retard dispersive comporte en général un ou plusieurs prisme, réseau de diffraction, miroir à dérive de fréquence, matériau dispersif, réseau de Bragg et/ou tout autre élément optique dispersif. Pour obtenir une dispersion suffisante pour modifier la durée des impulsions de plusieurs dizaine de picosecondes, seuls les compresseurs utilisant des réseaux de diffraction et/ou des réseaux de Bragg conviennent. Par exemple, le compresseur à réseaux de diffraction de Treacy utilise classiquement deux réseaux de diffraction en réflexion et un jeu de miroirs ou de prismes. Toutefois, un tel compresseur pose des difficultés d'encombrement (typiquement plus de 10cmx 10cm x 10 cm voire jusqu'à 100cm x 50cm x 20 cm). De plus, un tel compresseur est extrêmement sensible aux vibrations et mouvements mécaniques qui induisent des désalignements. Un tel compresseur n'est donc pas adapté pour être embarqué sur des pièces en mouvement et encore moins tenu à la main. Ces systèmes optiques dispersifs fonctionnent tous en réflexion, c'est à dire que le faisceau d'impulsions laser comprimées sort du compresseur parallèlement au faisceau incident d'impulsions laser amplifiées, mais en direction opposée. Cette configuration impose l'utilisation d'un autre système optique, souvent composé par un ou

plusieurs miroirs, afin d'envoyer le faisceau d'impulsions laser comprimées vers la cible, rendant l'ensemble encore plus sensible aux désalignements.

[0004] Un progrès très important dans la production d'impulsions ultra-brèves par amplification à dérive de fréquence a été fait en utilisant des réseaux de Bragg volumiques à pas variable (RBVPV). Un réseau de Bragg volumiques à pas variable est un composant optique monobloc, indéréglable et très compact. Un réseau de Bragg à pas variable peut aussi être inscrit dans une fibre optique pour former un réseau de Bragg Bragg fibré à pas variable (ou FBG chirpé). Néanmoins, un réseau de Bragg fibré à pas variable présente une surface limitée de l'ordre de quelques dizaines de microns carrés, qui est en général trop faible pour des applications à des impulsions laser intenses. Un réseau de Bragg fibré à pas variable peut être utilisé pour étirer des impulsions lumineuses avant amplification. Par ailleurs la dispersion introduite par un réseau de Bragg volumique ou fibré à pas variable est fixe et ne peut pas être ajustée. Enfin, un réseau de Bragg à pas variable fonctionne aussi dans une configuration en réflexion, renvoyant le faisceau dans la direction opposée à celle du faisceau incident sur le réseau. De manière analogue avec un compresseur à réseaux de diffraction de Treacy, le faisceau laser issu d'un compresseur utilisant un réseau de Bragg à pas variable peut être renvoyé vers la cible, c'est-à-dire dans une direction différente de celle du faisceau incident mais toujours en utilisant un jeu de miroirs ou de prismes en espace libre dont l'orientation est réglée pour cet usage. Cet ensemble de miroirs et de prismes introduit une sensibilité accrue aux vibrations.

[0005] Le document de brevet US 2014/0168755 A1 (Clowes et al.) divulgue un système de compression d'impulsion basé sur un réseau de Bragg volumique ou fibré à pas variable, comprenant un séparateur de polarisation et une lame de phase quart d'onde sur le trajet du faisceau afin de renvoyer à angle droit le faisceau émergeant du compresseur ou à deux réseau de Bragg volumique ou fibré à pas variable qui permet d'augmenter la dispersion introduite. Toutefois, un tel système nécessite un alignement optique précis de chaque composant optique et ne permet pas d'ajuster la dispersion de vitesse de groupe introduite par le ou les réseaux de Bragg.

[0006] Par ailleurs l'amplification à dérive de fréquence impose une compensation parfaite de la dérive de fréquence introduite par l'étireur et la chaine d'amplification par celle du compresseur. Différentes méthodes existent pour obtenir cet accord parfait. La plus simple consiste à faire varier la distance entre les composants optiques d'un compresseur de Treacy. Cette méthode traditionnelle impose de placer au moins un composant sur une table de translation et rend le système encore plus sensible au désalignement. Elle impose de déplacer les composants parfaitement parallèlement à l'axe du faisceau incident sur ledit composant.

[0007] Une autre solution consiste à utiliser un réseau de Bragg fibré à pas variable comme

étireur d'impulsion et d'en faire varier la dérive de fréquence en ajustant sa température. Cette méthode a été décrite par Frankinas et al dans "Efficient ultrafast fiber laser using chirped fiber Bragg grating and chirped volume Bragg grating stretcher/ compressor configuration," Proc. SPIE 9730, Components and Packaging for Laser Systems II, 973017 (22 April 2016). Bien que très précise, cette méthode impose d'utiliser un étireur d'impulsion à fibre et ne permet que des excursions de dispersion très réduites de l'ordre de 3fs/K. Il faudrait donc augmenter la température de 300°C pour un ajustement de l'ordre de 1 ps.

[0008] Un des buts de l'invention est de proposer un dispositif de compression d'impulsion qui soit robuste, compact, léger et ajustable en dispersion de vitesse de groupe sans changer la direction du faisceau d'impulsions laser comprimées.

Exposé de l'invention

[0009] A cet effet, la présente divulgation concerne un dispositif optique dispersif adapté pour modifier une dispersion de vitesse de groupe d'un faisceau d'impulsions lumineuses, le dispositif optique dispersif comprenant un cube séparateur de polarisation, un premier réseau de Bragg volumique à pas variable et une première lame quart d'onde, le cube séparateur de polarisation ayant une face d'entrée, une face de sortie parallèle à la face d'entrée, deux faces latérales perpendiculaires à la face d'entrée et une interface inclinée de 45 degrés par rapport à la face d'entrée et aux deux faces latérales, la face d'entrée étant apte à recevoir le faisceau, la première lame quart d'onde étant à faces planes et parallèles, une face de la première lame quart d'onde étant fixée à une face d'entrée-sortie du premier réseau de Bragg, le premier réseau de Bragg volumique à pas variable étant photoinscrit dans un matériau suivant des plans parallèles à la face d'entrée-sortie du premier réseau de Bragg, une autre face de la première lame quart d'onde étant rendue solidaire d'une des deux faces latérales du cube séparateur de polarisation de façon à ce que la normale au plan des franges du premier réseau de Bragg volumique à pas variable fasse un angle de 45 degrés avec la normale à l'interface.

[0010] Avantageusement, le dispositif optique dispersif est monobloc.

[0011] Selon certains modes de réalisation, l'autre face de la première lame quart d'onde est fixée à l'une des deux faces latérales du cube séparateur de polarisation.

[0012] Selon un autre mode de réalisation, le dispositif optique dispersif comprend un prisme à angle droit ayant une première face formant un angle de 90 degrés avec une deuxième face du prisme à angle droit, la première face prisme à angle droit étant fixée à l'une des deux faces latérales du cube séparateur de polarisation et la deuxième face du prisme à angle droit étant fixée à la première lame quart d'onde.

[0013] Selon un aspect particulier et avantageux, le dispositif optique dispersif comprend

une deuxième lame quart d'onde et un composant optique réflecteur, la deuxième lame quart d'onde étant à faces planes et parallèles, la deuxième lame quart d'onde étant disposée entre le composant optique réflecteur et l'autre des deux faces latérales du cube séparateur de polarisation, une face de la deuxième lame quart d'onde étant fixée au composant optique réflecteur et une autre face de la deuxième lame quart d'onde étant fixée à l'autre des deux faces latérales au cube séparateur de polarisation.

[0014] Avantageusement, le composant optique réflecteur comprend un miroir ou un traitement réfléchissant appliqué directement sur ladite autre face de la deuxième lame quart d'onde.

[0015] De façon alternative, le composant optique réflecteur comprend un deuxième réseau de Bragg volumique à pas variable, la deuxième lame quart d'onde étant fixée à une face d'entrée-sortie du deuxième réseau de Bragg, le deuxième réseau de Bragg volumique à pas variable étant photoinscrit dans un matériau suivant des plans parallèles à la face d'entrée-sortie du deuxième réseau de Bragg.

[0016] Selon un autre aspect particulier et avantageux, le dispositif optique dispersif comprend un isolateur optique fixé à la face de sortie du cube séparateur de polarisation.

[0017] De façon optionnelle, le dispositif optique dispersif comprend des moyens d'inclinaison du dispositif optique dispersif par rotation autour d'un axe parallèle à l'intersection entre la face d'entrée et l'interface du cube séparateur de polarisation.

[0018] La présente divulgation concerne aussi un système laser à impulsions de durée comprise entre 10 femtosecondes et 1 nanoseconde et de puissance comprise entre 1 W et 1 kW, le système laser comprenant une source apte à générer des impulsions source polarisées linéairement, un système amplificateur optique, un étireur et/ou un compresseur comprenant au moins un dispositif optique dispersif selon l'un des modes de réalisation décrits.

[0019] La présente divulgation concerne aussi un système laser à impulsions de durée ajustable entre 10 femtoseconde et 10 picoseconde comprend un étireur et/ou un compresseur comprenant au moins un dispositif optique dispersif selon l'un des modes de réalisation décrits.

[0020] Le dispositif optique dispersif de la présente divulgation permet d'introduire une dérive de fréquence temporelle sur une impulsion laser sans modifier la direction du faisceau laser ou en la déviant de 90 degrés, selon le mode de réalisation.

[0021] Le dispositif optique dispersif permet de comprimer ou d'étirer une impulsion laser, de préférence sans modifier la direction du faisceau incident.

[0022] De façon particulièrement avantageuse, la dérive de fréquence temporelle introduite est ajustable au moyen d'une rotation du dispositif optique dispersif autour d'un seul axe de rotation, tout en conservant une direction du faisceau laser parallèle à la

direction incidente ou, respectivement, à 90 degrés de la direction incidente.

[0023] Bien entendu, les différentes caractéristiques, variantes et formes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres.

Brève description des dessins

[0024] De plus, diverses autres caractéristiques de l'invention ressortent de la description annexée effectuée en référence aux dessins qui illustrent des formes, non limitatives, de réalisation de l'invention et où :

[0025] [Fig.1] est un schéma de principe d'un dispositif optique dispersif pour étirer temporellement une impulsion,

[0026] [Fig.2] est un schéma de principe d'un dispositif optique dispersif pour comprimer temporellement une impulsion,

[0027] [Fig.3] est un exemple de dispositif optique dispersif selon un premier mode de réalisation,

[0028] [Fig.4] est un exemple de dispositif optique dispersif selon une variante du premier mode de réalisation,

[0029] [Fig.5] est un exemple de dispositif optique dispersif selon une autre variante du premier mode de réalisation,

[0030] [Fig.6] est un exemple de dispositif optique dispersif selon un deuxième mode de réalisation,

[0031] [Fig.7] est un exemple de dispositif optique dispersif selon un troisième mode de réalisation,

[0032] [Fig.8] illustre une méthode d'ajustement en dispersion de vitesse de groupe d'un dispositif optique dispersif selon le premier, deuxième ou troisième mode de réalisation,

[0033] [Fig.9] est un exemple de dispositif optique dispersif selon un quatrième mode de réalisation,

[0034] [Fig.10] illustre une méthode d'ajustement en dispersion de vitesse de groupe d'un dispositif optique dispersif selon le quatrième mode de réalisation,

[0035] [Fig.11] est un schéma d'une chaine d'amplification d'impulsion à dérive de fréquence utilisant deux dispositifs optiques dispersifs selon la présente divulgation, dans lequel l'étireur est accordable ;

[0036] [Fig.12] est un schéma d'une chaine d'amplification d'impulsion à dérive de fréquence utilisant deux dispositifs optiques dispersifs selon la présente divulgation, dans lequel le compresseur est accordable ,

[0037] [Fig.13] est une trace d'autocorrélation d'impulsion laser amplifiée et comprimée obtenue expérimentalement ;

[0038] [Fig.14] est un schéma d'une chaine d'amplification d'impulsion à dérive de fréquence utilisant deux dispositifs optiques dispersifs selon la présente divulgation, dans lequel l'étireur et le compresseur sont accordables.

[0039] Il est à noter que sur ces figures les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différentes variantes peuvent présenter les mêmes références.

Description détaillée

[0040] Dans le présent document on entend par dérive de fréquence, la modification d'une vitesse de groupe d'une impulsion laser, qui se traduit par une dispersion spectrale de l'impulsion.

[0041] Le dispositif optique dispersif est basé sur l'utilisation d'un ou plusieurs réseaux de Bragg volumiques à pas variable ayant pour particularité que la face physique du réseau est parfaitement parallèle au plan des franges du réseau inscrit dans le matériau. Ce réseau de Bragg volumique à pas variable est fixé par soudage ou collage ou adhésion optique à un ensemble de composants optiques pour former le dispositif optique dispersif. Un tel dispositif optique dispersif permet d'introduire une dispersion spectrale sur le signal incident, de préférence sans modifier sa direction. Le dispositif optique dispersif de la présente divulgation trouve des applications particulièrement intéressantes pour des systèmes laser de production d'impulsions ultra-brèves dans les domaines industriel, scientifiques et/ou médical.

[0042] La [Fig.1] représente schématiquement un dispositif optique dispersif 50 utilisé pour étirer temporellement une impulsion laser, par exemple avant amplification. La source 1 produit des impulsions laser 2 de durée comprise entre 10 fs et 10 ns et présentant une dérive de fréquence négative, nulle ou positive. Cette impulsion laser 2 se propage suivant une direction de propagation. Une impulsion laser 2 est incidente sur le dispositif optique dispersif 50 qui modifie sa dérive de fréquence sans altérer la direction de propagation de l'impulsion. Dans le cas où l'impulsion laser 2 initiale présente une dérive de fréquence nulle ou très petite devant celle introduite par le dispositif optique dispersif 50, ou si la dérive de fréquence de l'impulsion laser 2 est de même signe que celle introduite par le dispositif optique dispersif 50, en sortie du le dispositif optique dispersif 50, l'impulsion 3 est étirée et sa durée généralement allongée comparée à l'impulsion laser 2 initiale.

[0043] La [Fig.2] représente schématiquement un dispositif optique dispersif 51 utilisé pour comprimer temporellement une impulsion laser. La source 1, éventuellement suivie d'un étireur, par exemple un premier dispositif optique dispersif 50 tel que décrit en lien avec la [Fig.1], produit des impulsions laser 2, ou 3, de durée comprise entre 30 ps et 10 ns et présentant une dérive de fréquence non nulle, négative ou positive. Le dispositif optique dispersif 51 introduit une dérive de fréquence de signe opposé à celle

de l'impulsion laser 2, ou 3. Par conséquent, l'impulsion 4 est comprimée en sortie du dispositif optique dispersif 51. La durée finale de l'impulsion 4 est une fonction du signe de chacune des dérives de fréquence, de leurs valeurs absolues et de la durée initiale de l'impulsion 2, 3.

[0044] Nous allons maintenant décrire la structure et le fonctionnement du dispositif optique dispersif 50, 51 selon différents modes de réalisation, ainsi que les caractéristiques des impulsions se propageant dans un tel dispositif optique dispersif.

[0045] Le dispositif optique dispersif 50, 51 de la présente divulgation est basé sur la fabrication d'un dispositif optique dispersif massif ou monobloc par collage, soudage ou adhésion optique de plusieurs composants optiques ayant des caractéristiques très précises. Afin de pouvoir comprimer des impulsions laser présentant une dérive de fréquence, le dispositif utilise un ou plusieurs réseaux de Bragg volumique à pas variable, noté RBVPV.

[0046] La [Fig.3] représente schématiquement un dispositif optique dispersif 50, 51 selon un premier mode de réalisation. On a représenté un repère orthonormé XYZ, le plan XZ étant dans le plan de la [Fig.3]. Le dispositif optique dispersif 50, 51 comprend un cube séparateur de polarisation 11, une première lame quart-d'onde 12, un premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable, une deuxième lame quart d'onde 14 et un composant optique réflecteur 15. Le composant optique réflecteur 15 est par exemple un miroir plan à faces planes et parallèles. En variante, le composant optique réflecteur 15 est constitué d'un traitement réfléchissant appliqué directement sur la face externe de la deuxième lame quart-d'onde 14, les deux faces de la deuxième lame quart-d'onde 14 étant polies parallèlement avec un angle entre les deux faces inférieur ou égal à 0.05 degré.

[0047] Le cube séparateur de polarisation 11 comporte une face d'entrée 17, une face de sortie 21 parallèle à la face d'entrée 17, deux faces latérales 19, 20 perpendiculaires à la face d'entrée 17 et une interface 18 inclinée de 45 degrés par rapport à la face d'entrée 17 et aux deux faces latérales 19, 20. Les faces latérales 19, 20 sont parallèles entre elles et perpendiculaires à la face d'entrée 17. Avantageusement, le cube séparateur de polarisation 11 forme ainsi un parallélépipède rectangle, coupé selon sa diagonale par l'interface 18.

[0048] La première lame quart d'onde 12 et la deuxième lame quart d'onde 14 sont des lames à faces planes et parallèles. La première lame quart-d'onde 12 est disposée entre la face latérale 19 du cube séparateur de polarisation 11 et la face d'entrée-sortie 23 du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable. Plus précisément, la première lame quart-d'onde 12 est fixée par collage, soudage ou adhésion optique, d'une part, à la face latérale 19 du cube séparateur de polarisation 11 et, d'autre part, à la face d'entrée-sortie 23 du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable. La

deuxième lame quart d'onde 14 est disposée entre l'autre face latérale 20 du cube séparateur de polarisation 11 et le composant optique réflecteur 15. La deuxième lame quart d'onde 14 est fixée par collage, soudage ou adhésion optique, d'une part, à la face latérale 20 du cube séparateur de polarisation 11 et, d'autre part, au composant optique réflecteur 15.

[0049] Dans le présent document, on entend par « fixé », le fait que deux éléments optiques soient en contact, direct ou par l'intermédiaire d'une colle optique, et dans une position invariable l'un par rapport à l'autre, sans possibilité de déplacement relatif ou de rotation entre le deux éléments optiques fixés l'un à l'autre.

[0050] Le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable a une face d'entrée-sortie 23. Le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable est fabriqué et choisi pour être un réseau de Bragg volumique photoinscrit dans un matériau (par exemple un bloc de verre) suivant des plans parallèles à cette face d'entrée-sortie 23. De cette manière, la normale au plan des franges du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable forme un angle de 45 degrés ± 0,1° avec la normale à l'interface 18 du cube séparateur de polarisation 11.

[0051] Les réseaux de Bragg volumiques à pas variable sont produits par différentes sociétés dont par exemple Optigrate Corporation, 3267 Progress Drive, Orlando, Florida 32286, USA. Une variation périodique de l'indice de réfraction d'un verre photosensible est enregistrée dans un bloc de verre à l'aide d'un laser UV. Ce réseau se comporte comme un réseau de Bragg en réfléchissant les longueurs d'ondes correspondant à la période du réseau. Une variation de la période du réseau le long de l'axe du bloc de verre permet de réfléchir différentes longueurs d'ondes à des différentes positions dans le bloc de verre. On introduit ainsi un retard entre les longueurs d'onde, ce qui se traduit par une dérive de la fréquence optique de l'impulsion réfléchie par le réseau de Bragg volumiques à pas variable. La direction de l'onde réfléchie est déterminée par l'angle d'incidence sur les plans des franges du réseau de diffraction et non pas par la face d'entrée-sortie 23 physique du réseau de Bragg 13.

[0052] Le dispositif optique dispersif 50, 51 est constitué de composants optiques dont les surfaces réfléchissantes sont parfaitement parallèles, à 0.1 degré près, aux surfaces physiques sauf pour la surface polarisante 18 qui est exactement à 45° ± 0,1° des surfaces physiques 19 et 20. En particulier, les plans du réseau de franges inscrit dans le RBVPV sont parallèles à la face d'entrée-sortie 23 du bloc de verre dans lequel le réseau est inscrit. Cette précision permet de garantir qu'un faisceau incident perpendiculairement à la face d'entrée-sortie 23 du bloc de verre comprenant le réseau 13 est réfléchi exactement sur lui-même par le réseau 13.

[0053] Les éléments du dispositif optique dispersif 50, 51 sont mis en contact par leurs faces optiques, c'est-à-dire les faces traversées par le faisceau laser. L'assemblage de ces

éléments est effectué par collage, en utilisant une colle optique transparente au faisceau laser, par contact optique, ou par soudage. Les éléments 12, 13, 14, 15 sont assemblés de façon à ce que leurs faces optiques respectives soient parallèles aux faces latérales 19, 20 du cube séparateur de polarisation 11. Le dispositif optique dispersif 50, 51 forme ainsi un composant optique monobloc, compact, parfaitement aligné par construction et indéréglable. A titre d'exemple non limitatif, le cube polariseur à pour dimensions 8 mmx8 mmx8 mm et les faces optiques de tous les éléments ont la même dimensions de 8 mmx8 mm. Ces dimensions sont variables et l'ensembles des éléments n'ont pas nécessité à avoir des faces de dimensions uniformes.

[0054] Le dispositif optique dispersif 50, 51 est disposée pour recevoir un faisceau 10 d'impulsions lumineuses incident sur la face d'entrée 17 du cube séparateur de polarisation 11. Le faisceau 10 d'impulsions lumineuses est de polarisation linéaire perpendiculaire au plan de la [Fig.3]. Autrement dit, le faisceau 10 est polarisé S, parallèlement à une droite d'intersection entre la face d'entrée 17 et l'interface 18, cette droite d'intersection étant parallèle à l'axe Y.

[0055] L'interface 18 permet de diriger par réflexion le faisceau lumineux 10 polarisé S vers la première lame quart d'onde 12 et le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable. Les axes de la première lame quart d'onde 12 sont alignés à 45 degrés de la polarisation incidente de façon à ce que le faisceau 10 de polarisation linéaire S soit transformé en un faisceau 120 de polarisation circulaire à la traversée de la première lame quart d'onde 12. Le faisceau 120 d'impulsions lumineuses de polarisation circulaire est incident sur le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable. Les différentes composantes spectrales de l'impulsion sont réfléchies sur le premier réseau de Bragg 13 à différentes positions le long de la direction de propagation du faisceau. Cette différence de chemin optique pour les différentes composantes spectrales se traduit par une dérive de fréquence qui s'ajoute à celle de l'impulsion incidente. Par conséquent, le faisceau réfléchi 130 par le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable présente une dispersion modifiée ou une dérive de fréquence modifiée par rapport au faisceau laser 10. L'orientation des plans des franges de diffraction inscrites dans le réseau 13 détermine la direction du faisceau réfléchi 130 par le premier réseau de Bragg 13. Dans l'exemple de la [Fig.3], la direction de propagation du faisceau 120 issu de la première lame quart d'onde 12 est perpendiculaire au plan de franges, par conséquent le faisceau réfléchi 130 se propage en direction opposée au faisceau 120 issu de la première lame quart d'onde 12. Le faisceau réfléchi 130 traverse à nouveau la première lame quart-d'onde 12 et forme un faisceau 135 incident sur la face 19 du cube séparateur de polarisation 11. Le faisceau réfléchi 130 de polarisation circulaire est ainsi transformé en un faisceau 135 de polarisation linéaire, exactement perpendiculaire à la polarisation du faisceau incident 10, donc dans un état P, autrement dit

suivant l'axe Z.

[0056] L'interface 18 transmet le faisceau 135 de polarisation P en direction de la deuxième lame quart-d'onde 14 dont les axes sont alignés à 45 degrés de la polarisation P. La deuxième lame quart-d'onde 14 transforme la polarisation linéaire P du faisceau 135 en une polarisation circulaire. Le miroir 15 réfléchit le faisceau de polarisation circulaire et forme un faisceau 140 qui traverse la deuxième lame-quart d'onde 14. La faisceau 140 de polarisation circulaire est transformé par la deuxième lame-quart d'onde 14 en un faisceau 150 de polarisation linéaire S. L'interface 18 réfléchit le faisceau 150 de polarisation linéaire S vers la face de sortie 21 du cube séparateur de polarisation 11 et forme un faisceau de sortie 200 se propageant suivant une direction qui est fixée par les orientations des différents composants optiques et en particulier du miroir 15, du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et du cube séparateur de polarisation 11.

[0057] Comme illustré sur la [Fig.3], lorsque le faisceau 10 est incident sur la face d'entrée 17 du cube séparateur de polarisation 11 sous un angle d'incidence nul, autrement dit sous incidence normale, le faisceau 200 en sortie du dispositif optique dispersif 50, 51 se propage suivant la même direction et dans le même sens que le faisceau 10 incident. Comme indiqué ci-dessus, les franges du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et le plan du miroir 15 sont parallèles, à 0.1 degrés près. Le faisceau 200 émergeant du dispositif optique dispersif 50, 51 est alors parfaitement parallèle au faisceau 10 incident quel que soit l'angle entre le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et le cube séparateur de polarisation 11. Le faisceau 200 est ainsi parfaitement aligné et se propage suivant la même direction que le faisceau 10 incident sur la face d'entrée 17 sous incidence normale et avec une polarisation identique à la polarisation du faisceau 10. Le faisceau 200 présente une dispersion totale égale à la somme de la dispersion induite par le réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et de la dispersion initiale du faisceau laser 10 incident, compte tenu du signe de chacune de ces dispersions.

[0058] Le dispositif optique dispersif 50, 51 de la [Fig.3] permet de comprimer ou d'étirer une impulsion laser tout en conservant la direction du faisceau laser. Le dispositif optique dispersif 50 de la [Fig.3] peut être utilisé pour fabriquer un étireur monobloc ou un compresseur monobloc.

[0059] Le dispositif optique dispersif 50, 51 est ainsi avantageusement inséré sur le trajet d'un faisceau d'impulsions laser 10 pour modifier la dispersion de vitesse de groupe des impulsions, sans modifier la direction ni la position du faisceau laser 200 en sortie. Le dispositif optique dispersif 50, 51 détermine par construction la direction du faisceau de sortie 200 par rapport au faisceau 10 incident.

[0060] Selon une variante du premier mode de réalisation illustrée sur la [Fig.4],

l'emplacement de la première lame quart d'onde 12 fixée au premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable est permuté avec celui de la deuxième lame-quart d'onde 14 fixée au composant optique réflecteur 15. Cette permutation ne modifie nullement le fonctionnement du dispositif optique dispersif 50, 51. En effet, dans ce cas, le faisceau lumineux est transmis deux fois à travers la deuxième lame quart-d'onde 14 et réfléchi sur le composant optique réflecteur 15 avant de traverser le cube séparateur de polarisation 11 pour être réfléchi par le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et transmis deux fois à travers la première lame quart d'onde 12. Dans cette variante, le faisceau 10 incident sur la face d'entrée 17 polarisé S est réfléchi sur l'interface 18, puis transmis via la face latérale 19 à travers la deuxième lame quart d'onde 14 pour former un faisceau 140 de polarisation circulaire qui est réfléchi sur le composant optique réflecteur 15 pour former un faisceau 150 de polarisation circulaire. Le faisceau 150 traverse la deuxième lame quart d'onde 14 pour former un faisceau 155 de polarisation linéaire P. Le faisceau 155 de polarisation linéaire P est transmis à travers le cube séparateur de polarisation 11 en direction de l'autre face latérale 20. Le faisceau 155 de polarisation linéaire P est transmis à travers la première lame quart d'onde 12 et forme un faisceau 120 de polarisation circulaire. Le faisceau 120 polarisé circulairement est réfléchi sur les franges du premier réseau de Bragg 13 pour former un faisceau réfléchi 130 de polarisation circulaire. Le faisceau réfléchi 130 est transmis à travers la première lame quart d'onde 12 et forme un faisceau 150 de polarisation linéaire S en direction du cube séparateur de polarisation 11. L'interface 18 réfléchit le faisceau 150 de polarisation linéaire S et forme le faisceau 200 de sortie. Comme décrit en lien avec la [Fig.3], le faisceau 200 de sortie présente une dispersion totale égale à la somme de la dispersion induite par le réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et de la dispersion initiale du faisceau laser 10 incident, compte tenu du signe de chacune de ces dispersions.

[0061] En particulier, comme illustré en [Fig.4], lorsque le faisceau 10 incident est perpendiculaire à la face d'entrée 17, le faisceau réfléchi par l'interface 18 est parfaitement perpendiculaire à la surface réfléchissante du composant optique réflecteur 15. Le faisceau 155 réfléchi par le composant optique réflecteur 15 et transmis deux fois à travers la deuxième lame quart d'onde est perpendiculaire aux franges du premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable incident. Le faisceau 150 réfléchi par le premier réseau de Bragg 13 et transmis deux fois à travers la première lame quart d'onde est incliné exactement de 45 degrés sur l'interface 18 et le faisceau de sortie 200 est parfaitement parallèle au faisceau incident 10. Dans le cas où le faisceau laser lumineux 10 incident est perpendiculaire à la face d'entrée 17 du cube séparateur de polarisation 11, le faisceau lumineux 200 de sortie a la même direction, la même polarisation et la même position que le faisceau lumineux 10 d'entrée. Autrement dit,

lorsque le faisceau 10 est incident sur la face d'entrée 17 du cube séparateur de polarisation 11 sous incidence normale, on obtient également un faisceau de sortie 200 parfaitement aligné et se propageant suivant la même direction que le faisceau incident 10.

[0062] De nombreuses variantes du dispositif optique dispersif 50, 51 sont ici considérées.

[0063] La [Fig.4] illustre en outre une variante selon laquelle le composant optique réflecteur 15 est constitué d'un traitement réfléchissant appliqué sur la face externe de la deuxième lame quart-d'onde 14, à la longueur d'onde du faisceau laser 10 incident. Dans cette configuration les deux faces de la deuxième lame quart-d'onde 14 sont polies parallèlement avec un angle entre les deux faces n'excédant pas 0.05 degré.

[0064] Selon une variante illustrée sur la [Fig.5], le dispositif optique dispersif 50, 51 comporte en outre un isolateur optique disposé sur le faisceau lumineux 200 de sortie. L'isolateur optique comprend par exemple un cube polariseur 26 et une troisième lame quart d'onde 27. Avantageusement, le cube polariseur 26 et la troisième lame quart d'onde 27 ont des faces d'entrée et de sortie parfaitement parallèles entre elles et sont assemblés par exemple par collage sur ces faces, afin de maintenir l'orientation des composants. Plus précisément, le cube polariseur 26 est fixé à la face de sortie 21 du cube séparateur de polarisation 11 et la troisième lame quart d'onde 27 est fixée à la face opposée du cube polariseur 26. Le cube polariseur 26 est orienté à 90 degrés du cube séparateur de polarisation 11. Lorsque le cube séparateur de polarisation 11 réfléchit la polarisation S dans un plan horizontal, le cube polariseur 26 réfléchit la polarisation S dans un plan vertical et vice versa. La troisième lame quart d'onde 27 à la longueur d'onde du faisceau laser 200 est orientée de façon à ce que ses axes soient à 45 degrés des axes du cube polariseur 26. Le dispositif optique dispersif 50, 51 muni de cet isolateur optique reste monobloc. L'isolateur optique ainsi formé n'introduit aucune déviation ni aucun déplacement du faisceau laser 250 de sortie.

[0065] Le faisceau laser 200 en sortie du cube séparateur de polarisation 11 est polarisé S. Le cube polariseur 26 transmet le faisceau laser 200 de sortie polarisé S. En traversant la troisième lame quart d'onde 27, cette polarisation devient circulaire et forme le faisceau de sortie 250. Si une surface réfléchissante réfléchit tout ou partie de la puissance laser vers la troisième lame quart d'onde 27, le faisceau polarisé circulairement traverse à nouveau la troisième lame quart d'onde et sa polarisation est transformée en une polarisation rectiligne P. Cette polarisation P est réfléchie par le cube polariseur 26 perpendiculairement à l'axe du faisceau laser 250 de sortie et ne se propage pas dans le dispositif optique dispersif 50, 51 vers la source laser. On obtient ainsi un effet d'isolation optique.

[0066] Selon un deuxième mode de réalisation, illustré sur la [Fig.6], le dispositif optique dispersif 50, 51 comporte en outre un prisme 28 à angle droit disposé entre la face latérale 19 du cube séparateur de polarisation 11 et la première lame quart d'onde 12.

Plus précisément, le prisme 28 à angle droit a une première face et une deuxième face formant un angle de 90 degrés. La première face du prisme 28 à angle droit est fixée à la face latérale 19 du cube séparateur de polarisation 11. La deuxième face du prisme 28 à angle droit est fixée à une face de la première lame quart d'onde 12. Le prisme 28 à angle droit permet de dévier de 90 degrés le faisceau entrant et sortant du premier réseau de Bragg 13. Cette configuration permet de réduire l'encombrement du dispositif optique dispersif 50, 51 lié à la longueur du premier réseau de Bragg 13 en particulier lorsque le réseau 13 a une longueur plus grande que les dimensions de sa face d'entrée. C'est en général le cas pour des impulsions étirées de grande durée.

[0067] De façon optionnelle, le dispositif optique dispersif 50, 51 selon le deuxième mode de réalisation comporte un isolateur optique, comme décrit ci-dessus et illustré sur la [Fig.6], sans augmenter l'encombrement du dispositif optique dispersif 50, 51. L'isolateur optique peut être fixé non seulement au cube séparateur de polarisation 11 mais aussi premier réseau de Bragg 13, ce qui permet de renforcer encore la robustesse du dispositif optique dispersif 50, 51. Cette configuration est particulièrement adaptée pour les réseaux de grande longueur.

[0068] Selon un troisième mode de réalisation, illustré sur la [Fig.7], le composant optique réflecteur 15 est remplacé par un deuxième réseau de Bragg 25 volumique à pas variable. L'utilisation conjointe dans le même dispositif optique dispersif 50, 51 de deux réseaux de Bragg volumiques à pas variable 13 et 25 permet d'augmenter la dispersion de vitesses de groupe introduite par le dispositif optique dispersif 50, 51. Cette configuration permet d'obtenir une dispersion très importante tout en utilisant des RBVPV de dimensions réduites et relativement faciles à fabriquer. De façon optionnelle, le dispositif optique dispersif 50, 51 selon le troisième mode de réalisation comporte un isolateur optique, comme décrit en lien avec la [Fig.5].

[0069] En effet, dans le troisième mode de réalisation, illustré en [Fig.7], le faisceau laser incident 10 est réfléchi sur l'interface 18 en direction de la première lame quart d'onde 12. Le faisceau laser est transmis une première fois à travers la première lame quart d'onde 12, réfléchi par le premier réseau de Bragg 13, puis transmis une seconde fois à travers la première lame quart d'onde 12 pour former le faisceau 130 dispersé une fois. Le faisceau 130 se propage à travers le cube séparateur de polarisation 11 en direction de la deuxième lame quart d'onde 14. Le faisceau 130 est transmis une première fois à travers la deuxième lame quart d'onde 14, réfléchi par le deuxième réseau de Bragg 25 volumique à pas variable, puis transmis une seconde fois à travers la deuxième lame quart d'onde 14 pour former un faisceau 150 dispersé deux fois : une première dispersion par le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable et une deuxième dispersion par le deuxième réseau de Bragg 25 volumique à pas variable. Le faisceau 150 est réfléchi sur l'interface 18 du cube séparateur 11 et forme le faisceau de sortie

200. Ici aussi, lorsque le faisceau 10 est incident sur la face d'entrée 17 du cube séparateur de polarisation 11 sous incidence normale, on obtient également un faisceau de sortie 200 parfaitement aligné et se propageant suivant la même direction que le faisceau incident 10. Le faisceau 200 présente ici une dispersion totale égale à la somme de la dispersion induite par le premier réseau de Bragg 13 volumique à pas variable, de la dispersion induite par le deuxième réseau de Bragg 25 volumique à pas variable et de la dispersion initiale du faisceau laser 10 incident, compte tenu du signe de chacune de ces dispersions.

[0070] Selon une variante du troisième mode de réalisation, on dispose un prisme à angle droit entre le cube séparateur de polarisation 11 et chacun des deux réseau de Bragg volumiques à pas variable. Cette configuration permet de réduire l'encombrement du dispositif optique dispersif 50, 51 utilisant deux réseaux de Bragg volumiques à pas variable.

[0071] Comme illustré en lien avec la [Fig.8], le dispositif optique dispersif 50, 51 de la présente divulgation permet d'ajuster aisément la dispersion introduite par le dispositif. Considérons un dispositif optique dispersif 50, 51 selon l'un quelconque des premier, deuxième ou troisième mode de réalisation décrit ci-dessus. Sur la [Fig.8], on a représenté un exemple de dispositif optique dispersif 50, 51 selon le premier mode de réalisation. Considérons une rotation du dispositif optique dispersif 50, 51 d'un angle alpha (noté α) autour d'un axe Y perpendiculaire au plan de la [Fig.8]. A cet effet, le dispositif optique dispersif 50, 51 est placé sur une monture opto-mécanique ajustable en angle. Si l'angle alpha est nul, le faisceau émergeant est parallèle et confondu avec le faisceau incident. Toutefois, la rotation d'un angle alpha non nul n'affecte pas la direction du faisceau 200 émergeant qui reste parfaitement parallèle au faisceau laser 10 incident. La rotation d'un angle alpha autour d'un axe perpendiculaire au plan de la [Fig.8], c'est à dire perpendiculaire au plan contenant le premier réseau de Bragg 13 et le composant optique réflecteur 15 introduit uniquement une translation du faisceau de sortie 200 dans le plan XZ d'une quantité d qui est proportionnelle à l'angle alpha et à la distance L entre le miroir 15 et le milieu de la zone du premier réseau de Bragg 13 dans laquelle sont inscrites les franges dudit réseau. La translation d du faisceau est donnée approximativement par la formule :

[0072] $$d = 2L\sin(\alpha)$$

[0073] Pour un angle alpha inférieur à 5 degrés, une distance L de l'ordre de 10 mm, la distance d est de l'ordre de 1,7 mm faible devant le diamètre du faisceau laser incident 10. Ce faible déplacement latéral sans déviation angulaire, permet un positionnement facile du dispositif optique dispersif 50, 51 sur le faisceau laser 10 incident. Le positionnement du dispositif optique dispersif 50, 51 ne nécessite pas de réglage angulaire fin, mais seulement à quelques degrés près. Il convient néanmoins de s'assurer que le

plan XZ est parallèle au faisceau incident pour éviter d'introduire une déviation angulaire dans la direction perpendiculaire à ce plan.

[0074] Cette propriété d'invariance par rotation dans le plan XZ permet d'utiliser le dispositif optique dispersif 50, 51 comme un étireur ou compresseur ajustable. En effet, la dispersion introduite sur l'impulsion par le réseau 13 dépend de l'angle d'incidence du faisceau sur le réseau de Bragg volumique à pas variable 13. Or, la variation de l'angle d'incidence du faisceau sur le réseau de Bragg 13 volumique à pas variable permet de modifier la dispersion introduite par le réseau de Bragg 13 volumique à pas variable. Il est ainsi possible d'ajuster finement la dispersion spectrale introduite par le dispositif optique dispersif 50, 51 afin de compenser exactement celle de l'impulsion incidente ou simplement afin de faire varier la dispersion résiduelle de l'impulsion émergente du dispositif optique dispersif 50, 51.

[0075] Selon le quatrième mode de réalisation, illustré en figures 9 et 10, le dispositif optique dispersif 50, 51 ne comporte pas de deuxième lame quart d'onde 14, ni de composant optique réflecteur 15, les autres composants étant identiques à ceux décrits en lien avec la [Fig.3] par exemple. Le dispositif optique dispersif 50, 51 selon le quatrième mode de réalisation permet de générer un faisceau de sortie 135 dévié d'exactement 90 degrés par rapport au faisceau incident tout modifiant la dérive de fréquence des impulsions qui le traversent. Le dispositif optique dispersif 50 selon le quatrième mode de réalisation de la [Fig.9] permet de comprimer une impulsion laser tout en faisant tourner le faisceau laser de 90 degrés par rapport à la direction incidente. Le dispositif optique dispersif 50 de la [Fig.9] peut être utilisé pour fabriquer un compresseur monobloc ou un étireur monobloc.

[0076] Une rotation d'un angle alpha du dispositif optique dispersif 50, 51 selon le quatrième mode de réalisation autour d'un axe perpendiculaire à l'axe du faisceau incident permet aussi d'ajuster la dispersion introduite par le réseau de Bragg volumique à pas variable sans déplacement notable de la direction de l'onde réfléchie. En orientant le dispositif autour de cet axe on peut ainsi ajuster la dispersion de vitesse de groupe introduite par le dispositif sans modifier la direction du faisceau émergeant.

[0077] Il est ainsi possible d'obtenir une source d'impulsions laser femtosecondes ou pico-secondes de forte puissance en utilisant un ou plusieurs dispositifs optiques dispersif 50, 51 selon la présente divulgation.

[0078] En particulier, la [Fig.11] présente un système amplificateur d'impulsions à dérive de fréquence comprenant une source 1 d'impulsions brèves incidente sur un premier dispositif optique dispersif 50 configuré pour étirer temporellement les impulsions 3. Les impulsions étirées 3 sont alors amplifiées dans une chaine amplificatrice 6 comportant un ou plusieurs milieux amplificateurs solides cristallins ou en verres dopés ou à base de fibres optiques dopées. Après amplification, un second optique

dispersif 51 est configuré pour présenter une dispersion opposée à celle du premier dispositif optique dispersif 50, de façon à comprimer temporellement les impulsions 4. L'accord de compensation peut être réglé finement en ajustant l'angle d'incidence sur l'un des deux dispositifs dispersifs 50 ,51.

[0079] La [Fig.11] illustre par exemple un ajustement de la dispersion par rotation du premier dispositif optique dispersif 50 ou étireur. Le dispositif optique dispersif 50, 51 selon la présente divulgation peut servir à compenser la dispersion introduite dans un montage incluant une source d'impulsions brèves et des composants optiques qui introduisent une dispersion de vitesse de groupe sur lesdites impulsions et modifient donc leur durée. Par exemple une source laser femtoseconde incidente sur un microscope grâce à une fibre optique subit la dispersion de vitesse de groupe introduite par la fibre et par conséquent la durée des impulsions focalisées par le microscope sur l'échantillon en observation est fortement allongée. Le dispositif optique dispersif 50, 51 permet une compensation ajustable dans un environnement très compact et de préférence sans modifier la direction du faisceau incident sur le microscope.

[0080] La [Fig.12] illustre par exemple un ajustement de la dispersion par rotation du second optique dispersif 51 ou compresseur. Cet ajustement par rotation n'a aucun effet sur la direction du faisceau et permet donc d'ajuster la durée des impulsions sans aucun autre ajustement dans le système laser.

[0081] Le dispositif optique dispersif 50, 51 permet ainsi d'obtenir une source d'impulsions amplifiées de forte puissance et de durée accordable sans modification de la direction du faisceau.

[0082] La [Fig.14] représente schématiquement un exemple de système laser comprenant une source 1 produisant des impulsions 2 de 300 fs qui sont étirées à une durée de 100 à 500 ps par un premier dispositif optique dispersif 50 selon l'un des modes de réalisation décrits. Le premier dispositif optique dispersif 50 comprend au moins un premier réseau de Bragg volumique à pas variable configuré pour présenter une dispersion égale à 30 ps/nm. La chaine amplificatrice 6 comporte une série de fibres actives dopées à l'ytterbium ou d'amplificateurs à cristaux dopés à l'Ytterbium. La chaine amplificatrice 6 reçoit les impulsions étirées 3 et génère des impulsions étirées amplifiées 4. Le second optique dispersif 51 comprend un autre réseau de Bragg volumique à pas variable configuré pour présenter une dispersion de l'ordre de -30 ps/nm. Le second optique dispersif 51 reçoit les impulsions étirées amplifiées 4 et génère des impulsions amplifiées comprimées 5 ayant une durée de l'ordre de 300 fs. En pratique, le second optique dispersif 51 peut être basé sur le même réseau de Bragg volumique à pas variable que le premier dispositif optique dispersif 50 : il suffit d'orienter le RBVPV de façon inversée, la face arrière devenant la face avant et vice-versa.

[0083] Une autre utilisation du dispositif optique dispersif 50, 51 est illustré sur la [Fig.12]. Une source 1 d'impulsions laser picosecondes, par exemple d'une durée de 50 ps, est amplifiée dans une chaine amplificatrice 6 comportant une série de fibres actives dopées à l'ytterbium. Les impulsions 3, 4 subissent lors de leur propagation une forte auto-modulation de phase qui a pour effet d'élargir le spectre en créant une dérive de fréquence. Un dispositif optique dispersif 51 permet de compenser cette dérive de fréquence et de comprimer les impulsions à une durée beaucoup plus courte. Dans un exemple particulier, les impulsions initiales 3, 4 ont une durée de 50 ps, sont amplifiées jusqu'à une énergie de 15 µJ avant d'être comprimées par le dispositif optique dispersif 51 tel que décrit en lien avec la [Fig.5], comprenant un RBVPV ayant une dispersion comprise entre -10 et -20 ps/nm. La [Fig.13] montre un exemple de trace d'autocorrélation d'une impulsion 5 produite par une tel système laser, qui présente une durée d'environ 980 fs.

[0084] Le dispositif optique dispersif 50, 51 décrit ici peut être utilisé dans toutes les applications pour lesquelles un compresseur dit de TREACY est utilisé, ou dans lesquelles un étireur d'impulsion est utilisé.

[0085] Dans une application, la présente divulgation propose un dispositif optique dispersif 51 permettant de comprimer une impulsion laser d'une durée comprise entre 20 ps et 100 ps vers une durée finale comprise entre 0.1 ps et 3 ps, dans un volume extrêmement compact et, de préférence sans modifier la direction ou la position du faisceau laser. La source laser est par exemple une source picoseconde amplifiée dans un amplificateur à fibres ou à solides. Elle peut aussi être une source femtoseconde étirée dans un étireur à réseaux ou utilisant la dispersion des matériaux puis amplifiée et finalement recomprimée par le dispositif optique dispersif selon l'un des modes de réalisation décrits ci-dessous.

[0086] De façon particulièrement avantageuse, le dispositif optique dispersif peut être utilisé pour ajuster la durée des impulsions comprimées sans modifier la direction du faisceau laser. Une simple rotation du dispositif optique dispersif sur lui-même permet d'obtenir une durée d'impulsion variable d'environ 1 ps pour quelques degrés d'angle de rotation.

[0087] De façon particulièrement avantageuse, le dispositif optique dispersif est suffisamment compact pour être fixé à l'extrémité d'un laser à fibre souple. Un tel laser à fibre équipé du dispositif dispersif permet la production d'un faisceau d'impulsions laser ultra-brèves et très intenses. L'extrémité souple du laser à fibre peut prendre n'importe quelle position et direction, selon l'application. La position et la direction du faisceau d'impulsions laser ultra-brèves peuvent être modifiées rapidement et sans être limité par le compresseur, qui reste stable.

[0088] Dans une autre application, le dispositif optique dispersif 50 permet d'étirer les im-

pulsions avant amplification et d'ajuster la durée des impulsions amplifiées et éventuellement comprimées, de préférence sans réalignement de la chaine amplificatrice.

[0089] Bien entendu, diverses autres modifications peuvent être apportées à la présente divulgation dans le cadre des revendications annexées.

Revendications

[Revendication 1] Dispositif optique dispersif (50, 51) adapté pour modifier une dispersion de vitesse de groupe d'un faisceau (10) d'impulsions lumineuses, le dispositif optique dispersif comprenant : un cube séparateur de polarisation (11), un premier réseau de Bragg (13) volumique à pas variable et une première lame quart d'onde (12), le cube séparateur de polarisation (11) ayant une face d'entrée (17), une face de sortie (21) parallèle à la face d'entrée (17), deux faces latérales (19, 20) perpendiculaires à la face d'entrée (17) et une interface (18) inclinée de 45 degrés par rapport à la face d'entrée (17) et aux deux faces latérales (19, 20), la face d'entrée (17) étant apte à recevoir le faisceau (10), la première lame quart d'onde (12) étant à faces planes et parallèles, une face de la première lame quart d'onde (12) étant fixée à une face d'entrée-sortie (23) du premier réseau de Bragg (13), le premier réseau de Bragg (13) volumique à pas variable étant photoinscrit dans un matériau suivant des plans parallèles à la face d'entrée-sortie (23) du premier réseau de Bragg (13), une autre face de la première lame quart d'onde (12) étant rendue solidaire d'une des deux faces latérales (19, 20) du cube séparateur de polarisation (11) de façon à ce que la normale au plan des franges du premier réseau de Bragg volumique à pas variable fasse un angle de 45 degrés avec la normale à l'interface (18).

[Revendication 2] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendication 1 dans lequel le dispositif optique dispersif est monobloc.

[Revendication 3] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendication 1 ou 2 dans lequel l'autre face de la première lame quart d'onde (12) est fixée à l'une des deux faces latérales (19, 20) du cube séparateur de polarisation (11).

[Revendication 4] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendication 1 ou 2 comprenant un prisme à angle droit (28) ayant une première face formant un angle de 90 degrés avec une deuxième face du prisme à angle droit, la première face prisme à angle droit étant fixée à l'une des deux faces latérales (19, 20) du cube séparateur de polarisation (11) et la deuxième face du prisme à angle droit étant fixée à la première lame quart d'onde (12).

[Revendication 5] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendications 3 ou 4, comprenant une deuxième lame quart d'onde (14) et un composant optique réflecteur (15, 25), la deuxième lame quart d'onde (14) étant à

faces planes et parallèles, la deuxième lame quart d'onde (14) étant disposée entre le composant optique réflecteur (15, 25) et l'autre des deux faces latérales (19, 20) du cube séparateur de polarisation (11), une face de la deuxième lame quart d'onde (14) étant fixée au composant optique réflecteur (15, 25) et une autre face de la deuxième lame quart d'onde (14) étant fixée à l'autre des deux faces latérales (19, 20) au cube séparateur de polarisation (11).

[Revendication 6] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendication 5 dans lequel le composant optique réflecteur (15, 25) comprend un miroir (15) ou un traitement réfléchissant appliqué directement sur ladite autre face de la deuxième lame quart d'onde (14).

[Revendication 7] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon la revendication 5 dans lequel le composant optique réflecteur (15, 25) comprend un deuxième réseau de Bragg (25) volumique à pas variable, la deuxième lame quart d'onde (14) étant fixée à une face d'entrée-sortie du deuxième réseau de Bragg (25), le deuxième réseau de Bragg (25) volumique à pas variable étant photoinscrit dans un matériau suivant des plans parallèles à la face d'entrée-sortie du deuxième réseau de Bragg (25).

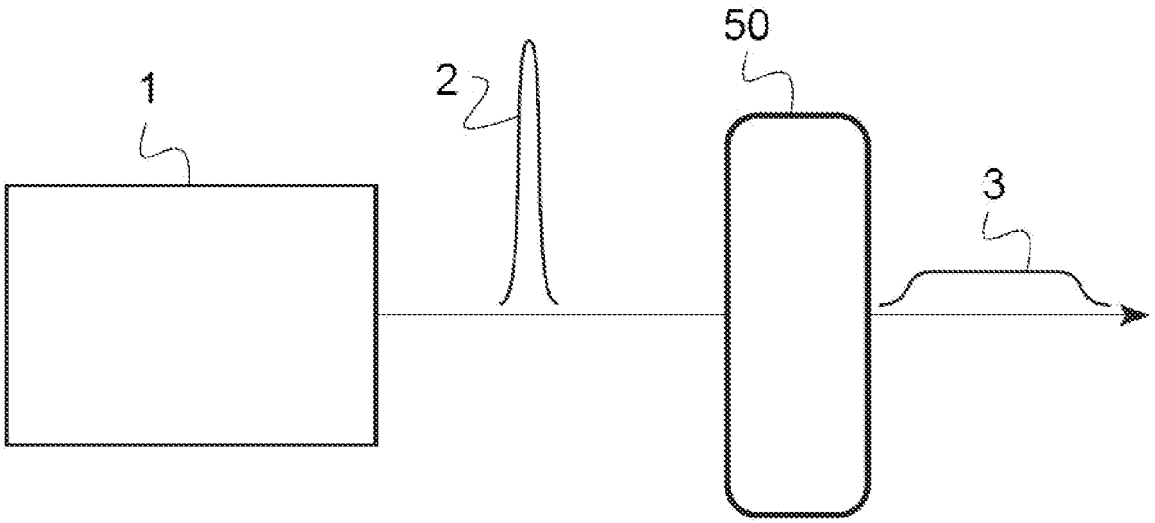
[Revendication 8] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon l'une des revendications 1 à 7, comprenant un isolateur optique fixé à la face de sortie (21) du cube séparateur de polarisation (11).

[Revendication 9] Dispositif optique dispersif (50, 51) selon l'une des revendications 1 à 8 comprenant des moyens d'inclinaison du dispositif optique dispersif (50, 51) par rotation autour d'un axe parallèle à l'intersection entre la face d'entrée (17) et l'interface (18) du cube séparateur de polarisation (11).

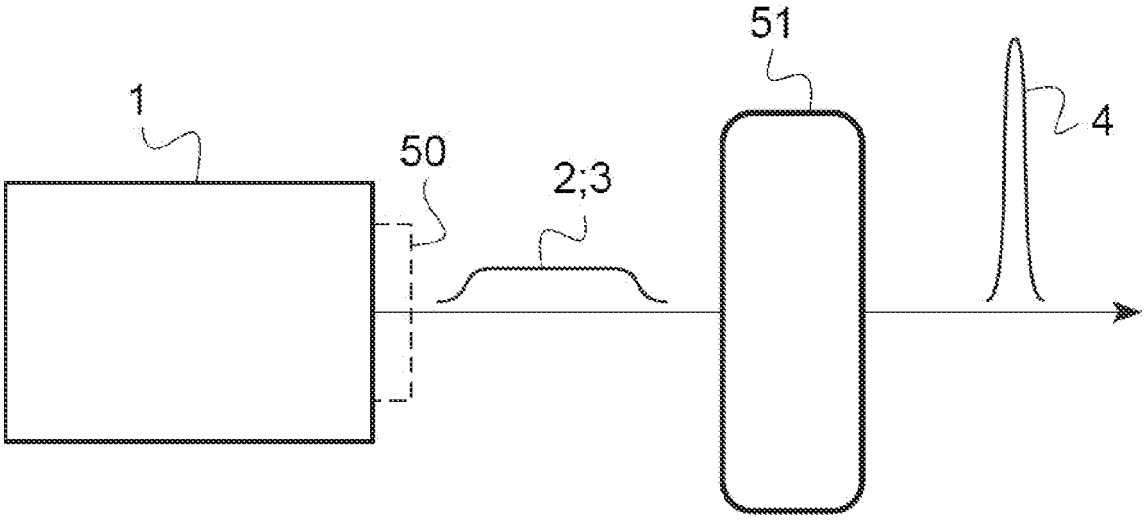
[Revendication 10] Système laser à impulsions de durée comprise entre 10 femtosecondes et 1 nanoseconde et de puissance comprise entre 1 W et 1 kW, le système laser comprenant une source apte à générer des impulsions source polarisées linéairement, un système amplificateur optique, un étireur et/ou un compresseur comprenant au moins un dispositif optique dispersif (50, 51) selon l'une des revendications 1 à 9.

[Revendication 11] Système laser à impulsions de durée ajustable entre 10 femtoseconde et 10 picoseconde comprenant un étireur et/ou un compresseur comprenant au moins un dispositif optique dispersif (50, 51) selon l'une des revendications 1 à 9.

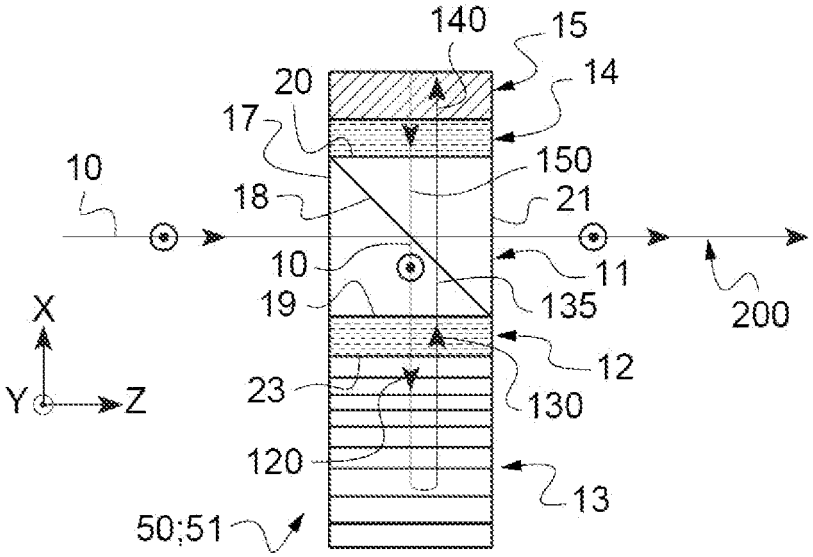
[Fig. 1]



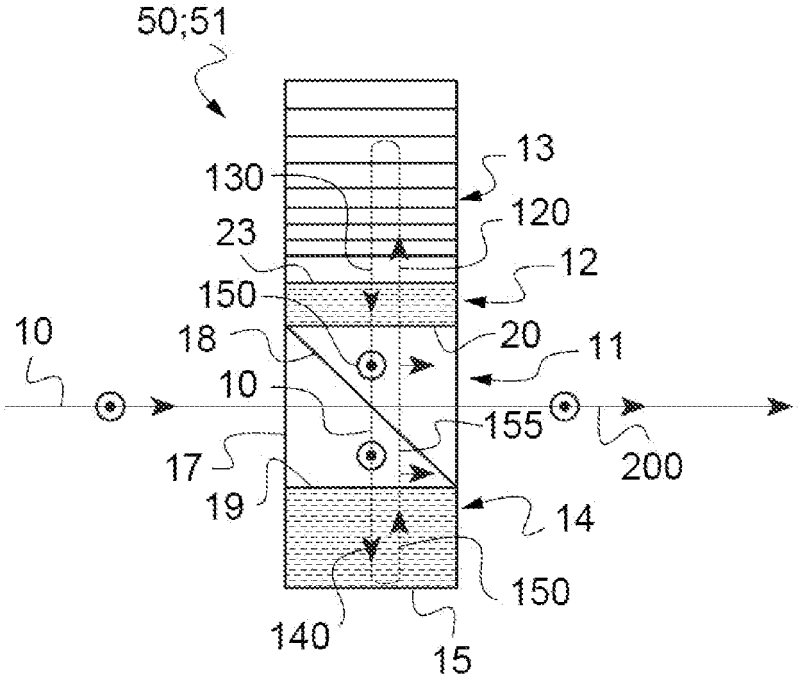
[Fig. 2]



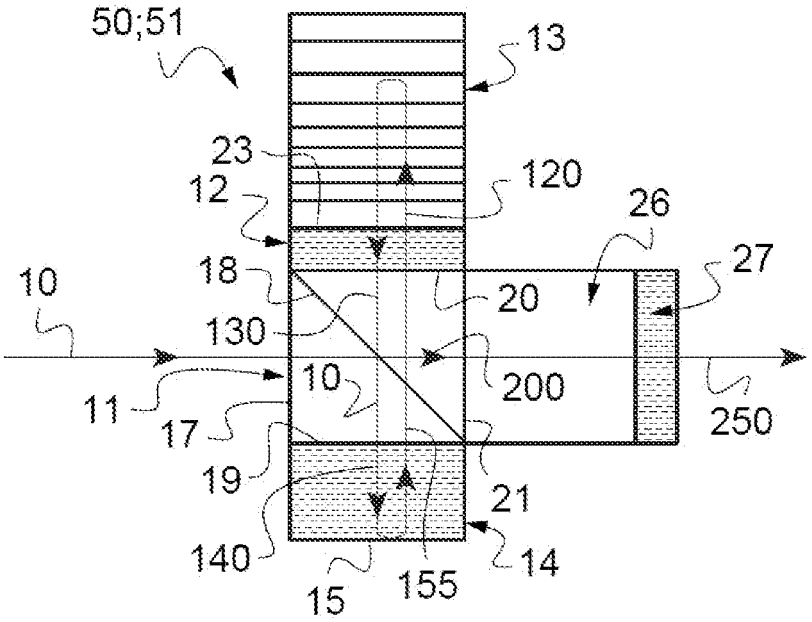
[Fig. 3]



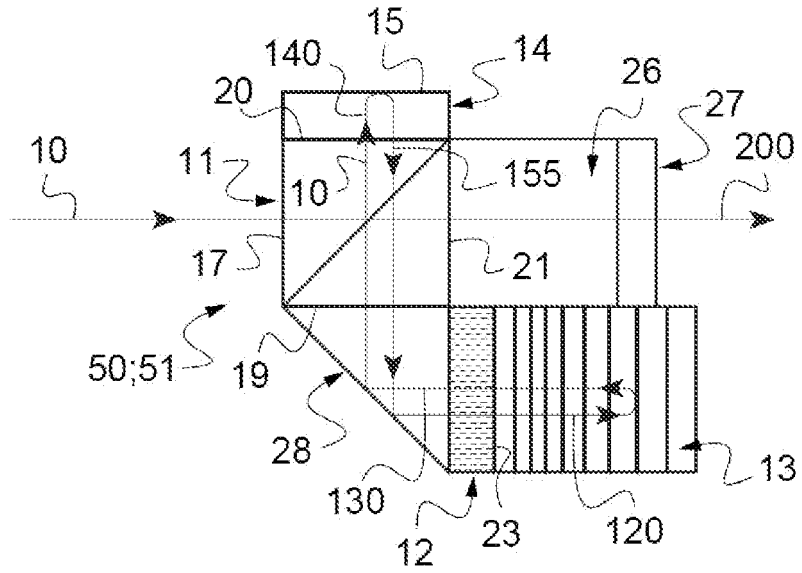
[Fig. 4]


50;51
13
130
120
23
12
150
10
18
20
11
10
155
200
17
19
14
150
140
15

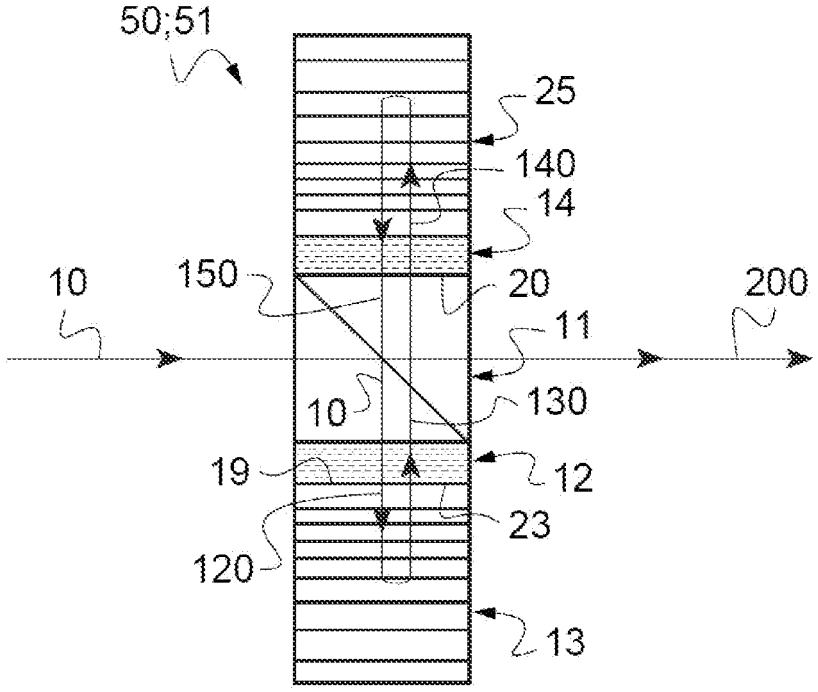
[Fig. 5]


50;51
13
23
120
12
26
27
18
10
20
130
200
10
11
250
17
19
21
140
14
15
155

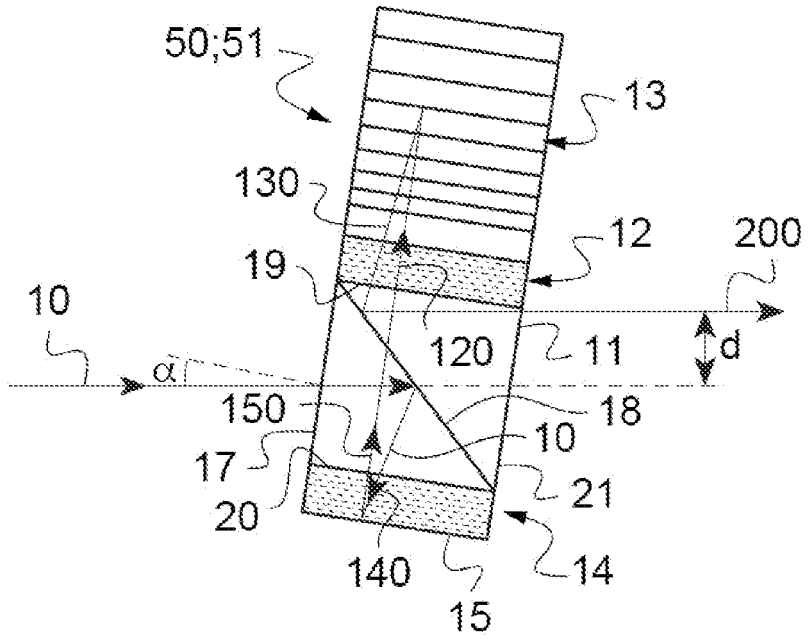
[Fig. 6]


15
140
14
20
26
27
10
11
10
155
200
17
21
50;51
19
28
13
130
12
23
120

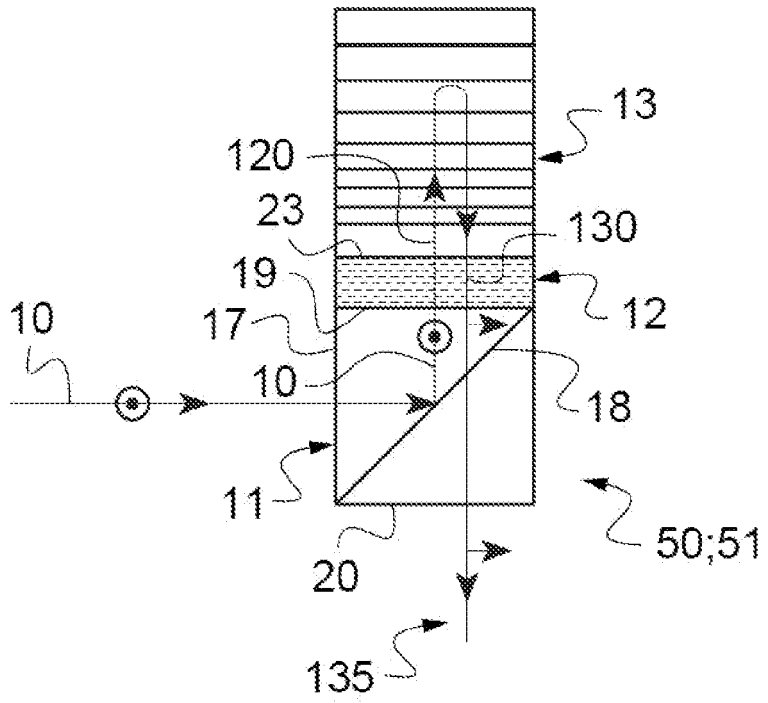
[Fig. 7]


50;51
25
140
14
10
150
20
200
11
10
130
19
12
23
120
13

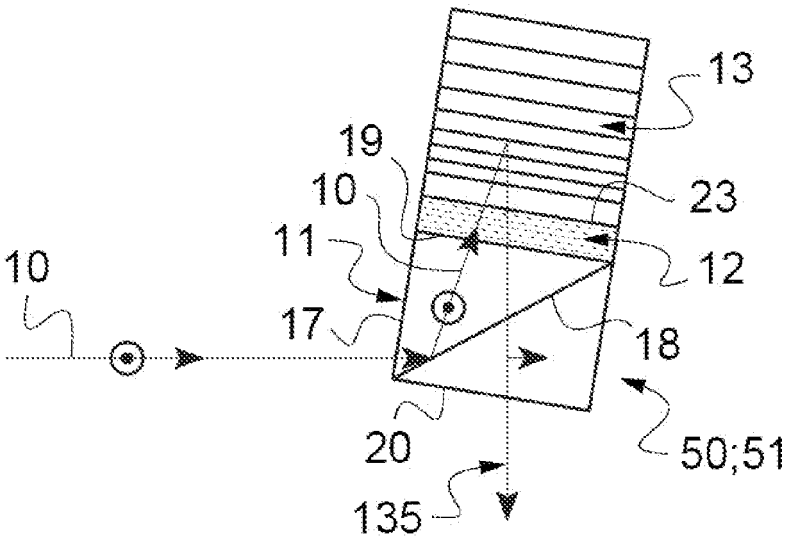
[Fig. 8]


50;51
13
130
12
200
19
10
120
11
d
α
150
18
10
17
21
20
140
14
15

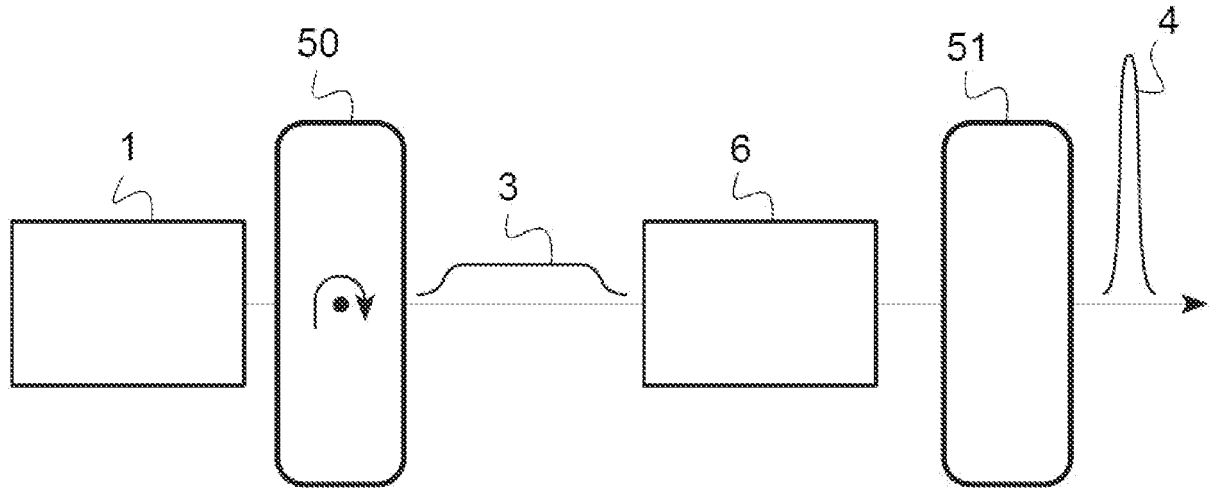
[Fig. 9]


13
120
23
130
19
12
10
17
10
18
11
50;51
20
135

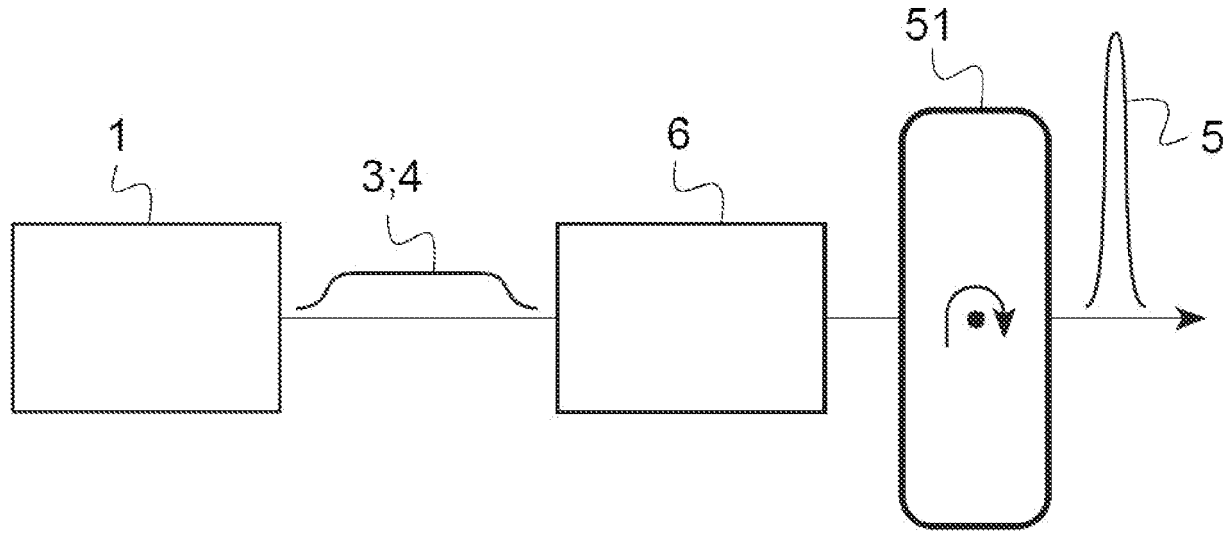
[Fig. 10]



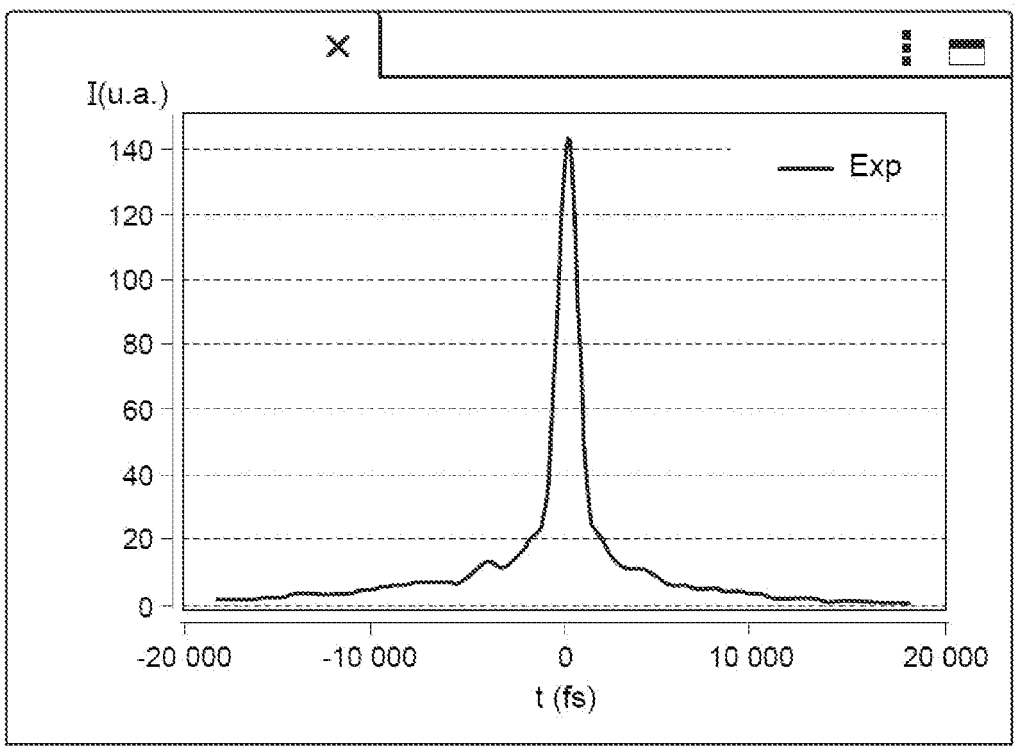
[Fig. 11]



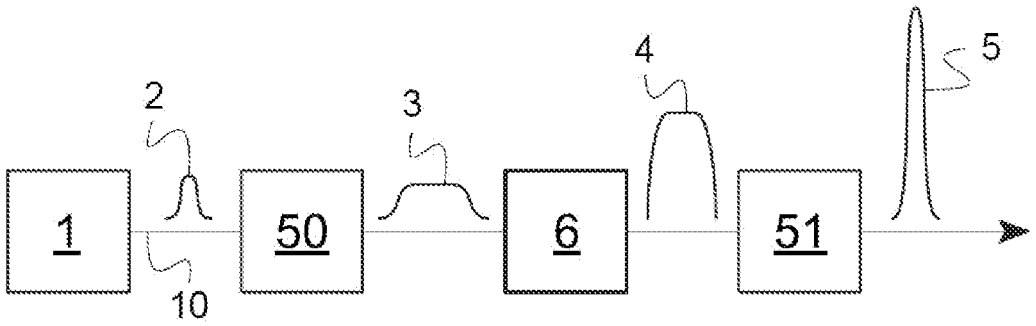
[Fig. 12]



[Fig. 13]


I(u.a.)
140
120
100
80
60
40
20
0
Exp
-20 000
-10 000
0
10 000
20 000
t (fs)

[Fig. 14]


1
2
10
50
3
6
4
51
5

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveauté) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.
Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

[x] Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

NEANT

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

US 2014/168755 A1 (CLOWES JOHN REDVERS [GB] ET AL) 19 juin 2014 (2014-06-19)

US 6 198 568 B1 (GALVANAUSKAS ALMANTAS [US] ET AL) 6 mars 2001 (2001-03-06)

US 8 189 971 B1 (VAISSIE LAURENT [US] ET AL) 29 mai 2012 (2012-05-29)

US 2016/094011 A1 (DENG YUJUN [US] ET AL) 31 mars 2016 (2016-03-31)

CN 212 011 592 U (QINGDAO FREE TRADE LASER TECH CO LTD) 24 novembre 2020 (2020-11-24)

US 9 240 669 B2 (PAPADOPOULOS DIMITRIS [FR]; HANNA MARC [FR] ET AL.) 19 janvier 2016 (2016-01-19)

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

NEANT