

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/193254 A1

(43) Date de la publication internationale
23 décembre 2015 (23.12.2015)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
G01J 9/02 (2006.01) *G01J 11/00* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/063368
- (22) Date de dépôt international :
15 juin 2015 (15.06.2015)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1455472 16 juin 2014 (16.06.2014) FR
- (71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 Rue Leblanc, Bâtiment le Ponant D, F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : QUERE, Fabien; 21 rue Pierre et Marie Curie, F-78140 Vélizy-Villacoublay (FR). GALLET, Valentin; 21 rue des Sablons, F-91360 Epinay sur Orge (FR).
- (74) Mandataire : LEBKIRI, Alexandre; Cabinet Camus Lebkiri, 25 Rue de Maubeuge, F-75009 Paris (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : DEVICE AND METHOD FOR CHARACTERIZATION OF A LIGHT BEAM

(54) Titre : DISPOSITIF ET PROCÉDE DE CARACTERISATION D'UN FAISCEAU DE LUMIERE

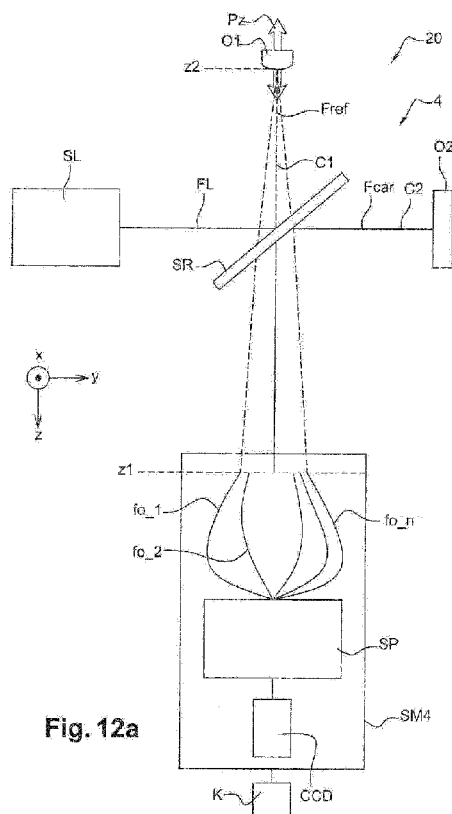


Fig. 12a

(57) Abstract : One aspect of the invention concerns a method for characterization of a light beam, comprising the following steps: - separation of the light beam by means of a separator optic into a first sub-beam and a second sub-beam; - propagation of the first sub-beam over a first optic and of the second sub-beam over a second optic, said first and second optics being respectively arranged so that the first sub-beam on leaving the first optic, referred to as the "reference beam", and the second sub-beam on leaving the second optic, referred to as the "characterized beam", are separated by a time delay τ ; - recombination of the reference beam and the characterized beam by means of a recombining optic, in such a way that the beams spatially interfere and form a two-dimensional interference pattern, the two-dimensional interference pattern extending along a first plane; - measurement of the spectral frequency of at least one part of the two-dimensional interference pattern by means of a measurement system, - calculation of the Fourier transform in the time domain of at least one spatial point of the frequency spectrum, said Fourier transform in the time domain having a time central peak and first and second time side peaks; - calculation of the Fourier transform in the frequency domain for one of said first and second time side peaks; - calculation of the spectral amplitude $A_R(\omega)$ and of the space-spectrum phase $\varphi_R(\chi, \gamma, \omega)$ for said Fourier transform in the frequency domain.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/193254 A1



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

Un aspect de l'invention concerne un procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière comprenant les étapes suivantes : - séparation au moyen d'une optique séparatrice du faisceau de lumière en un premier sous-faisceau et un deuxième sous-faisceau; - propagation du premier sous-faisceau sur une première optique et du deuxième sous-faisceau sur une deuxième optique, lesdites première et deuxième optiques étant respectivement agencées de sorte que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence », et le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser », présentent entre eux un délai temporel τ ; - recombinaison au moyen d'une optique recombinaison du faisceau de référence et du faisceau à caractériser de telle manière qu'ils interfèrent spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel, le motif d'interférence bidimensionnel s'étendant suivant un premier plan; - mesure au moyen d'un système de mesure du spectre fréquentiel d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel; - calcul de la transformée de Fourier dans le domaine temporel d'au moins un point spatial du spectre fréquentiel, ladite transformée de Fourier dans le domaine temporel présentant un pic temporel central et des premier et deuxième pics temporels latéraux; - calcul de la transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel pour l'un desdits premier et deuxième pics temporels latéraux; - calcul de l'amplitude spectrale $A_R(\omega)$ et de la phase spatio-spectrale $\varphi(\chi, \gamma, \theta)$ pour ladite transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel.

DISPOSITIF ET PROCÉDE DE CARACTERISATION D'UN FAISCEAU DE LUMIERE

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

5 Le domaine technique de l'invention est celui de la métrologie optique.
Un aspect de la présente invention concerne ainsi un dispositif et un procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière, en particulier d'un faisceau de lumière polychromatique, et notamment d'un faisceau laser polychromatique. Le dispositif et le procédé selon un aspect de l'invention permettent en particulier de
10 déterminer les propriétés spatio-temporelles d'un faisceau de lumière et notamment d'un faisceau laser impulsionnel, comprenant une ou plusieurs impulsions laser de durée typiquement femtoseconde. Plus généralement, le dispositif et le procédé selon un aspect de l'invention peuvent être utilisés pour mesurer les fonctions de corrélation croisée entre le champ électromagnétique en
15 un point du faisceau de lumière, qualifié de point de référence, et les champs électromagnétiques en tous les autres points du faisceau de lumière.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

L'invention sera décrite plus particulièrement en relation à ses applications à la
20 caractérisation d'impulsions laser ultra-brèves présentant des couplages spatio-temporels, bien que ces utilisations ne soient pas exclusives. On entend par « impulsion laser ultra-brève » une impulsion picoseconde, c'est-à-dire de durée comprise entre 0,1 et 100 ps environ, ou femtoseconde, c'est-à-dire de durée inférieure ou égale à $100 \text{ fs} = 0,1 \text{ ps}$. Les durées s'entendent à mi-hauteur du profil
25 d'intensité. Ces impulsions présentent une bande spectrale relativement large, c'est-à-dire typiquement de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, voire de l'ordre de quelques centaines de nanomètres.

Les impulsions laser ultra-brèves présentent de nombreuses applications
30 scientifiques et technologiques ; elles peuvent être amplifiées jusqu'à des énergies de plusieurs joules et former des faisceaux, dits « faisceaux impulsionnels », dont

le diamètre va de quelques millimètres à plusieurs centimètres en fonction, notamment, de leur puissance.

De façon générale, les propriétés temporelles du champ électromagnétique d'un faisceau impulsif peuvent varier spatialement ou, de façon équivalente, les propriétés spatiales du champ électromagnétique d'un faisceau impulsif peuvent dépendre du temps. Par exemple, la durée d'impulsion peut dépendre de la position (x,y) dans le faisceau. Dans la présente description, sauf indication contraire, on considérera un faisceau se propageant dans une direction « z », les axes « x », « y » et « z » formant un repère orthonormal.

Lorsqu'une telle dépendance existe, le champ $E(x,y,t)$ ne peut pas être mis sous la forme :

$$E(x, y, t) = E_1(t) \times E_2(x, y)$$

où $E_1(t)$ est une fonction du temps et $E_2(x,y)$ une fonction de l'espace. On dit alors que le faisceau présente un couplage spatio-temporel (« CST » ou « STC » de l'anglais « Space-Time Coupling »).

Les couplages spatio-temporels peuvent conduire notamment à une distorsion du front d'intensité d'un faisceau impulsif, illustrée à l'aide des figures 1a et 1b. La figure 1a illustre le cas idéal, selon lequel l'énergie électromagnétique d'un faisceau impulsif ultra-bref se propageant dans la direction z est répartie dans un disque très fin de diamètre D et d'épaisseur cT , où c est la vitesse de la lumière et T la durée de l'impulsion. Dans l'exemple de la figure 1a, $D = 8$ cm et $cT = 10$ μ m, ce qui correspond à une durée d'impulsion d'environ 33 fs. Afin de maximiser l'intensité lumineuse obtenue au foyer, ce qui est généralement souhaité, ce disque doit être le plus « plat » possible. Pour caractériser cette distribution spatiale de l'énergie, on parle de « front d'intensité » du laser. La notion de front d'intensité ne doit pas être confondue avec celle de « front d'onde ».

30

En pratique, et notamment dans le cas des lasers de haute puissance à grand diamètre de faisceau, les fronts d'intensité peuvent ne pas être plans mais

distordus, comme illustré sur la figure 1b. Par conséquent, le pic de l'impulsion peut être atteint à des instants différents dans les différents points de la section du faisceau dans le plan (x,y) , et la durée d'impulsion peut aussi varier d'un point à l'autre. D'autres types de couplage spatio-temporels sont également possibles,
5 comme par exemple une rotation des fronts d'onde dans le temps.

Des techniques de mesure de ces couplages ont été proposées, mais elles restent limitées dans leurs performances, complexes à mettre en œuvre et inadaptées à des faisceaux de grande taille, typiquement issus de sources de haute puissance.
10 En conséquence, ces techniques ne sont pas largement répandues. En effet, un faisceau lumineux est d'autant plus susceptible de présenter un couplage spatio-temporel qu'il est de grande taille. C'est donc en particulier pour de tels faisceaux lumineux qu'il est important de pouvoir réaliser une mesure de couplages spatio-temporels.

15 Ces techniques sont répertoriées ci-après.

- La technique « SPIDER-2D », coûteuse et complexe, impose une limitation de la taille du faisceau à caractériser. SPIDER-2D permet la reconstruction du faisceau à caractériser en fonction du temps t et d'une direction transverse, x ou y .

20

- La technique « STRIPED FISH » est plus simple à mettre en œuvre et moins coûteuse que SPIDER-2D. STRIPED FISH permet en outre la reconstruction du faisceau à caractériser en fonction du temps t et des deux directions transverses x et y . Toutefois, STRIPED FISH impose également
25 une limitation de la taille du faisceau à caractériser, nécessite l'utilisation d'un faisceau de référence pouvant se révéler très difficile à obtenir, et ne permet qu'un faible échantillonnage spectral.

25

- La technique « HAMSTER » est décrite dans l'article de Cousin et al.,
30 « Three-dimensional spatiotemporal pulse characterization with an acousto-optic pulse shaper and a Hartmann-Shack wavefront sensor », Optics Letters 37, 3291 (2012). HAMSTER utilise un modulateur acousto-optique

30

et un senseur de front d'onde 2D de type Shack-Hartmann afin d'effectuer une mesure temporelle en un point du faisceau à caractériser, puis de mesurer le front d'onde spatial de différentes tranches spectrales du faisceau à caractériser. A l'issue de deux séries de mesures, HAMSTER parvient à une reconstruction spatio-temporelle complète, c'est-à-dire en fonction du temps t et des deux directions transverses x et y , du faisceau à caractériser. La technique HAMSTER implique néanmoins une certaine complexité et un coût élevé, du fait notamment de l'utilisation d'un modulateur acousto-optique. D'autre part, la technique HAMSTER est inadaptée pour des faisceaux de grand diamètre.

- La technique « SEA TADPOLE » consiste à collecter la lumière en différents points du faisceau à caractériser avec une première fibre optique, en déplaçant la première fibre optique aux différents points du faisceau. Un faisceau auxiliaire est injecté dans une seconde fibre optique. Les extrémités de sortie des première et seconde fibres optiques sont placées proches l'une de l'autre, de manière qu'en divergeant, les faisceaux en sortie desdites première et seconde fibres optiques se recouvrent spatialement et produisent des interférences spatiales. Ces interférences spatiales sont résolues spectralement à l'aide d'un spectromètre, pour l'obtention d'un interférogramme. Cet interférogramme permet de déterminer la différence de phase spectrale entre le faisceau injecté dans la première fibre, et celui injecté dans la seconde fibre. On compare donc les propriétés spectrales de la lumière collectée en un point du faisceau à caractériser avec celles du faisceau auxiliaire. En déplaçant la première fibre en une pluralité de points du faisceau à caractériser, on compare chacun de ces points au faisceau auxiliaire, ce qui permet de reconstruire la phase spectrale du faisceau à caractériser. Contrairement aux techniques SPIDER-2D et STRIPED FISH, la technique SEA TADPOLE présente l'avantage de ne pas limiter la taille du faisceau à caractériser. De même que pour STRIPED FISH, le montage est relativement simple et peu coûteux et la reconstruction du faisceau à caractériser s'effectue selon trois

- dimensions (x, y, t). Cependant, la caractérisation d'un faisceau par SEA TADPOLE nécessite un grand nombre de tirs laser, la phase spectrale étant déterminée point par point. La nécessité d'effectuer plusieurs tirs laser impose que le faisceau laser à caractériser soit stable et reproductible tir-à-tir, ce qui n'est pas toujours le cas pour les lasers femtosecondes, et en particulier pour les lasers femtosecondes de haute puissance. Une autre limitation de la technique SEA TADPOLE est constituée par l'utilisation de fibres optiques, qui introduisent des fluctuations de phase aléatoires.
- 5
- 10 - L'état de la technique le plus proche est constitué par la technique dite « MUFFIN », qui est décrite dans le brevet FR 2976663 (A1). Les techniques SPIDER-2D, STRIPED FISH et SEA TADPOLE précédemment évoquées sont également décrites de manière détaillée dans le préambule du brevet FR 2976663 (A1). La technique MUFFIN se présente comme un
- 15 perfectionnement de la technique SEA TADPOLE. Au lieu d'utiliser deux fibres optiques – une première fibre optique que l'on déplace successivement en N points du faisceau à caractériser et une seconde fibre optique qui sert de référence, MUFFIN propose d'utiliser directement un ensemble de N fibres optiques. Les extrémités d'entrée de ces N fibres
- 20 collectent la lumière en N points différents du faisceau à caractériser. Les extrémités de sortie de ces N fibres sont placées les unes à côté des autres sur une ligne, de manière que les faisceaux en sortie desdites fibres se recouvrent et interfèrent spatialement. La technique MUFFIN parvient ainsi, en un seul tir et sans nécessairement disposer d'un faisceau auxiliaire, au
- 25 résultat de SEA TADPOLE. MUFFIN n'élimine pas d'emblée le problème de fluctuation de phase dans les fibres optiques, déjà identifié pour SEA TADPOLE. De telles fluctuations de phases peuvent empêcher une reconstruction complète du faisceau à caractériser. Une solution à ce problème a été proposée dans le brevet cité plus haut, mais elle
- 30 complexifie l'usage de la technique MUFFIN. Par ailleurs, il est difficile avec la technique MUFFIN d'utiliser un grand nombre de fibres optiques. En pratique, le nombre maximum de fibres optiques est de l'ordre de quelques

dizaines. En conséquence, la technique MUFFIN ne permet qu'un échantillonnage spatial limité du faisceau à caractériser.

RESUME DE L'INVENTION

5 L'invention vise donc à offrir une solution aux problèmes évoqués précédemment, en proposant un dispositif et un procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière adaptés pour un faisceau de lumière de grande taille et permettant une reconstruction complète dudit faisceau de lumière avec un bon échantillonnage spatial et un bon échantillonnage spectral, tout en demeurant relativement simple
10 et peu coûteuse à mettre en œuvre.

Un aspect de l'invention concerne donc essentiellement un dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière comportant :

- 15 - une optique séparatrice pour la séparation du faisceau de lumière en un premier sous-faisceau et un deuxième sous-faisceau, l'optique séparatrice définissant un premier chemin optique pour le premier sous-faisceau et un deuxième chemin optique pour le deuxième sous-faisceau ;
- 20 - une première optique agencée sur le premier chemin optique, la première optique ayant un premier rayon de courbure de manière que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence », présente des fronts d'onde d'un premier type ;
- 25 - une deuxième optique agencée sur le deuxième chemin optique, la deuxième optique ayant un deuxième rayon de courbure différent du premier rayon de courbure de manière que le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser », présente des fronts d'onde d'un deuxième type, différent du premier type ;
- 30 - un moyen de contrôle d'un délai temporel τ entre le faisceau de référence et le faisceau à caractériser ;
- une optique recombinaison pour la recombinaison du faisceau de référence et du faisceau à caractériser de telle manière qu'ils interfèrent

- spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel ;
- un système de mesure permettant l'obtention, à partir au moins du motif d'interférence bidimensionnel, d'une information temporelle ou d'une information fréquentielle ;
- 5 - un calculateur permettant le calcul à partir de l'information temporelle d'une transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel, ou le calcul à partir de l'information fréquentielle d'une transformée de Fourier dans le domaine temporel.
- 10 Grâce à l'invention, on utilise avantageusement une partie, considérée comme étant un point source, du premier sous-faisceau afin de générer un faisceau de référence de grande taille permettant de caractériser l'ensemble du faisceau à caractériser. On entend par « faisceau de référence de grande taille » le fait que, dans un plan de mesure souhaité, la taille du faisceau de référence est supérieure
- 15 ou égale à la taille du faisceau à caractériser. Grâce à la différence de rayon de courbure entre les première et deuxième optiques, les fronts d'onde du faisceau de référence sont du premier type et les fronts d'onde du faisceau à caractériser sont du deuxième type, le deuxième type étant différent du premier type. Le type d'un front d'onde est notamment déterminé en fonction du rayon de courbure dudit
- 20 front d'onde. Ainsi, dans le plan de mesure souhaité, le faisceau de référence considéré comme étant issu d'un point source interfère spatialement avec chaque point du faisceau à caractériser. On obtient ainsi une caractérisation du faisceau à caractériser, relativement au faisceau de référence, ledit faisceau de référence étant obtenu d'une manière simple, efficace et peu coûteuse.
- 25 Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les
- 30 combinaisons techniquement possibles.
- L'optique séparatrice et l'optique recombinaison forment une seule et même optique assurant la séparation du faisceau de lumière d'une part, et

la recombinaison du faisceau de référence et du faisceau à caractériser d'autre part.

- 5 - Le calculateur est un calculateur de transformée de Fourier entre les informations de type temporel et fréquentiel qui, à partir de l'information de l'un de ces types, calcule la transformée de Fourier de l'autre type.

Un autre aspect de l'invention concerne un premier procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière utilisant le dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention, le premier procédé comprenant les étapes
10 suivantes :

- 15 - séparation au moyen de l'optique séparatrice du faisceau de lumière en le premier sous-faisceau et le deuxième sous-faisceau, le premier sous-faisceau empruntant le premier chemin optique et le deuxième sous-faisceau empruntant le deuxième chemin optique ;
- 20 - propagation du premier sous-faisceau sur la première optique et du deuxième sous-faisceau sur la deuxième optique, lesdites première et deuxième optiques étant, grâce au moyen de contrôle, respectivement agencées sur les premier et deuxième chemins optiques de sorte que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence », et le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser », présentent entre eux un délai temporel τ balayant un intervalle de temps T1 avec un pas P1 ;
- 25 - recombinaison au moyen de l'optique recombinaison du faisceau de référence et du faisceau à caractériser de telle manière qu'ils interfèrent spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel ;
- 30 - mesure au moyen du système de mesure dudit motif d'interférence bidimensionnel en fonction du délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1 entre le faisceau de référence et le faisceau à caractériser, pour l'obtention d'un interférogramme temporel ;
- calcul au moyen du calculateur de la transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel d'au moins un point spatial de l'interférogramme

temporel, ladite transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel présentant un pic fréquentiel central et des premier et deuxième pics fréquentiels latéraux ;

- calcul au moyen du calculateur de l'amplitude spectrale $A_R(\omega)$, dite « amplitude spectrale relative », et de la phase spatio-spectrale $\phi_R(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale relative », pour l'un desdits premier et deuxième pics fréquentiels latéraux de ladite transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel.

Dans la présente description, on entend par « interférogramme temporel » l'ensemble des motifs d'interférence bidimensionnels pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps $T1$ avec le pas $P1$. L'interférogramme temporel comporte donc une information tridimensionnelle, selon deux dimensions spatiales et une dimension temporelle. Le premier procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention permet un excellent échantillonnage spatial du faisceau à caractériser. Grâce au balayage par le délai temporel τ de l'intervalle de temps $T1$ avec un pas $P1$, le premier procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention permet un excellent échantillonnage spectral du faisceau à caractériser. La qualité de l'échantillonnage spectral est en effet liée à la longueur de l'intervalle de temps $T1$ que balaie le délai temporel τ .

Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le premier procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

- Le premier procédé comporte, pour au moins un délai temporel τ balayant l'intervalle de temps $T1$ avec le pas $P1$, une étape de calcul par le calculateur de l'intensité et de la distribution spatiale de l'intensité du faisceau à caractériser. Ladite étape permet avantageusement de prendre en compte d'éventuelles fluctuations des propriétés de la source de lumière au cours du temps, c'est-à-dire typiquement d'une impulsion à l'autre dans

le cas d'une source de lumière impulsionnelle. D'éventuelles fluctuations de l'intensité et de la distribution spatiale de l'intensité de la source de lumière pendant l'intervalle de temps T1 de balayage sont en effet susceptibles de dégrader les motifs d'interférences bidimensionnels mesurés, et donc les spectres complexes qui en sont déduits.

5

- De manière préférentielle, le premier procédé comporte, pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1, ladite étape de calcul par le calculateur de l'intensité et de la distribution spatiale de l'intensité du faisceau à caractériser.

10

- Le premier procédé comporte avantageusement :
 - o une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence introduite par la première optique,
 - o puis une étape de soustraction de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0}$ $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale relative corrigée du faisceau à caractériser.

15

20

Ainsi, la courbure du front d'onde du faisceau de référence qui est introduite par la première optique est prise en compte.

- Selon une première alternative, le premier procédé comporte avantageusement :
 - o une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - o puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue du faisceau à caractériser $\varphi_{\text{abs}}(x,y,\omega)$.

25

30

Ainsi, on obtient une caractérisation absolue du faisceau à caractériser,

indépendamment du faisceau de référence.

- Selon une deuxième alternative, le premier procédé comporte avantageusement :
 - 5 ○ une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence introduite par la première optique,
 - 10 ○ une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ et de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0} \varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_R(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue corrigée du faisceau à caractériser.
- 15 Ainsi, on obtient une caractérisation absolue du faisceau à caractériser tout en corrigeant la courbure du front d'onde du faisceau de référence qui est introduite par la première optique.
- Le premier procédé comporte avantageusement une étape de filtrage du
20 premier sous-faisceau permettant d'augmenter la qualité dudit premier sous-faisceau. On contribue donc à augmenter la qualité du faisceau de référence, qui est issu d'une partie, assimilée à un point source, du premier sous-faisceau. L'étape de filtrage peut être une étape de filtrage linéaire. On améliore ainsi avantageusement les propriétés spatiales du premier
25 sous-faisceau. Alternativement, l'étape de filtrage peut être une étape de filtrage non-linéaire. On étend ainsi avantageusement le spectre du premier sous-faisceau, et donc du faisceau de référence qui est le premier sous-faisceau en sortie de la première optique. En élargissant le spectre du faisceau de référence, on s'affranchit avantageusement au moins
30 partiellement de cas où, avant ladite étape de filtrage, certaines zones du faisceau à caractériser comprennent des fréquences qui ne sont pas dans le spectre du faisceau de référence. L'étape de filtrage peut également

comporter une première sous-étape de filtrage linéaire, et une deuxième sous-étape de filtrage non-linéaire.

Un autre aspect de l'invention concerne un deuxième procédé de caractérisation
5 d'un faisceau de lumière utilisant le dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention, le deuxième procédé comprenant les étapes suivantes :

- 10 - séparation au moyen de l'optique séparatrice du faisceau de lumière en le premier sous-faisceau et le deuxième sous-faisceau, le premier sous-faisceau empruntant le premier chemin optique et le deuxième sous-faisceau empruntant le deuxième chemin optique ;
- 15 - propagation du premier sous-faisceau sur la première optique et du deuxième sous-faisceau sur la deuxième optique, lesdites première et deuxième optiques étant, grâce au moyen de contrôle, respectivement agencées sur les premier et deuxième chemins optiques de sorte que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence » et le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser », présentent entre eux un délai temporel τ ;
- 20 - recombinaison au moyen de l'optique recombinaison du faisceau de référence et du faisceau à caractériser de telle manière qu'ils interfèrent spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel, le motif d'interférence bidimensionnel s'étendant suivant un premier plan ;
- 25 - mesure au moyen du système de mesure du spectre fréquentiel d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel, le système de mesure comportant un spectromètre présentant une fente d'entrée s'étendant suivant une première direction spatiale du premier plan ;
- 30 - calcul de la transformée de Fourier dans le domaine temporel d'au moins un point spatial du spectre fréquentiel, ladite transformée de Fourier dans le domaine temporel présentant un pic temporel central et des premier et deuxième pics temporels latéraux ;
- calcul au moyen du calculateur de la transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel pour l'un desdits premier et deuxième pics temporels latéraux ;

- calcul au moyen du calculateur de l'amplitude spectrale $A_R(\omega)$, dite « amplitude spectrale relative », et de la phase spatio-spectrale $\varphi_R(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale relative », pour ladite transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel.
- 5 Le deuxième procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention permet avantageusement de s'affranchir des éventuelles fluctuations des propriétés de la source de lumière au cours du temps. En effet, ledit deuxième procédé permet une mesure dite « mono-coup », c'est-à-dire qui n'utilise qu'une
- 10 bien, dans le cas d'une source de lumière continue, qui n'utilise la source de lumière que pendant une durée très brève, pendant laquelle il est possible de considérer que ses propriétés ne fluctuent pas.

15 Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le deuxième procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

- L'étape de mesure du spectre fréquentiel d'au moins une partie du motif
20 d'interférence bidimensionnel comporte les sous-étapes suivantes :
 - agencer le spectromètre du système de mesure de manière que la fente d'entrée du spectromètre est adaptée pour recevoir ladite au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel, ladite au moins une partie s'étendant selon la première dimension spatiale du
25 premier plan ;
 - mesurer, grâce au spectromètre, le spectre fréquentiel de ladite au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel s'étendant selon la première dimension spatiale du premier plan.
- 30 - Alternativement, l'étape de mesure du spectre fréquentiel d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel comporte les sous-étapes suivantes :

- le système de mesure comportant une pluralité de fibres optiques, agencer les extrémités d'entrée de ladite pluralité de fibres optiques dans le premier plan selon une matrice bidimensionnelle, de manière à pouvoir échantillonner le motif d'interférence bidimensionnel selon une première direction spatiale du premier plan et selon une deuxième direction spatiale du premier plan ;
- agencer les extrémités de sortie de ladite pluralité de fibres optiques sur une la fente d'entrée du spectromètre du système de mesure ;
- mesurer, grâce au spectromètre du système de mesure, le spectre fréquentiel de l'échantillonnage du motif d'interférence bidimensionnel selon les première et deuxième directions spatiales du premier plan.

- Le deuxième procédé comporte avantageusement :
 - une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence introduite par la première optique,
 - puis une étape de soustraction de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0}$ $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale relative corrigée du faisceau à caractériser.

Ainsi, la courbure du front d'onde du faisceau de référence qui est introduite par la première optique est prise en compte.

- Selon une première alternative, le deuxième procédé comporte avantageusement :
 - une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue du faisceau à

caractériser $\varphi_{\text{abs}}(x,y,\omega)$.

Ainsi, on obtient une caractérisation absolue du faisceau à caractériser, indépendamment du faisceau de référence.

- 5 - Selon une deuxième alternative, le deuxième procédé comporte avantageusement :
- une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de
 - 10 référence introduite par la première optique,
 - une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ et de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0} \varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à
 - 15 la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue corrigée du faisceau à caractériser.

Ainsi, on obtient une caractérisation absolue du faisceau à caractériser tout en corrigeant la courbure du front d'onde du faisceau de référence qui est introduite par la première optique.

- 20 - Le deuxième procédé comporte avantageusement une étape de filtrage du premier sous-faisceau permettant d'augmenter la qualité dudit premier sous-faisceau. On contribue donc à augmenter la qualité du faisceau de référence, qui est issu d'une partie, assimilée à un point source, du premier
- 25 sous-faisceau. L'étape de filtrage peut être une étape de filtrage linéaire. On améliore ainsi avantageusement les propriétés spatiales du premier sous-faisceau. Alternativement, l'étape de filtrage peut être une étape de filtrage non-linéaire. On étend ainsi avantageusement le spectre du premier sous-faisceau, et donc du faisceau de référence qui est le premier sous-
- 30 faisceau en sortie de la première optique. En élargissant le spectre du faisceau de référence, on s'affranchit avantageusement au moins partiellement de cas où, avant ladite étape de filtrage, certaines zones du

faisceau à caractériser comprennent des fréquences qui ne sont pas dans le spectre du faisceau de référence. L'étape de filtrage peut également comporter une première sous-étape de filtrage linéaire, et une deuxième sous-étape de filtrage non-linéaire.

5

L'invention et ses différentes applications seront mieux comprises à la lecture de la description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

10 Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

- La figure 1a illustre un exemple de répartition de l'énergie électromagnétique dans un faisceau laser impulsionnel ultra-bref, dans un cas idéal sans couplage spatio-temporel.
- La figure 1b illustre un exemple de répartition de l'énergie électromagnétique dans un faisceau laser impulsionnel ultra-bref, dans un cas non-idéal avec couplage spatio-temporel.
- La figure 2a illustre une première étape d'un procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un premier mode de réalisation de l'invention, utilisant un premier dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- La figure 2b illustre une deuxième étape du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention, utilisant le premier dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- La figure 2c illustre une troisième étape du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention, utilisant le premier dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- La figure 3 illustre une configuration alternative du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention, utilisant un deuxième dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- La figure 4 illustre un exemple de motif d'interférence bidimensionnel pour un délai temporel donné, mesuré expérimentalement lors d'une étape du

procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention.

- 5 - Les figures 5a, 5b et 5c montrent respectivement des première, deuxième et troisième simulations des profils spatio-temporels d'un faisceau à caractériser et d'un faisceau de référence, pour des premier, deuxième et troisième délais temporels entre lesdits faisceau de référence et faisceau à caractériser.
- 10 - Les figures 6a, 6b et 6c montrent respectivement des premier, deuxième et troisième motifs d'interférences bidimensionnels, correspondants respectivement aux configurations des figures 5a, 5b et 5c.
- La figure 7a montre l'allure d'un interférogramme temporel partiel, mesuré en un point donné (x,y).
- La figure 7b montre l'allure de la transformée de Fourier de l'interférogramme temporel partiel de la figure 7a.
- 15 - La figure 8 illustre une première variante du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un mode de réalisation de l'invention.
- La figure 9 illustre une deuxième variante du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un mode de réalisation de l'invention.
- La figure 10 illustre une cinquième variante du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un mode de réalisation de l'invention.
- 20 - La figure 11a illustre un procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un deuxième mode de réalisation de l'invention, utilisant un troisième dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- La figure 11b montre une vue partielle en perspective du troisième dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.
- 25 - La figure 11c montre un exemple de spectre fréquentiel d'un motif d'interférence bidimensionnel pour un délai temporel donné, mesuré expérimentalement lors d'une étape du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le deuxième mode de réalisation de l'invention.
- 30 - La figure 12a illustre une configuration alternative du procédé de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le deuxième mode de réalisation de l'invention, utilisant un quatrième dispositif de caractérisation

d'un faisceau de lumière.

- La figure 12b montre une vue partielle en perspective du quatrième dispositif de caractérisation d'un faisceau de lumière.

5 DESCRIPTION DETAILLÉE D'AU MOINS UN MODE DE RÉALISATION DE L'INVENTION

Sauf précision contraire, un même élément apparaissant sur des figures différentes présente une référence unique.

10 Les figures 1a et 1b ont été précédemment décrites.

Les figures 2a, 2b et 2c montrent respectivement une première étape a), une deuxième étape b) et une troisième étape c) d'un procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon un premier mode de réalisation de l'invention. Le premier mode de réalisation est également dit « mode multi-coups ». Un deuxième mode de réalisation, dit « mode mono-coup », est ultérieurement décrit.

Selon le premier mode de réalisation de l'invention, le procédé 10 utilise un premier dispositif 1 de caractérisation d'un faisceau de lumière, qui est représenté aux figures 2a à 2c. Le dispositif 1 comporte :

- une optique SR ;
- une première optique O1 ;
- une deuxième optique O2 ;
- un moyen de contrôle Pz d'un délai temporel τ ;
- 25 - un système de mesure SM1 ;
- et un calculateur K.

Dans l'exemple de réalisation qui est particulièrement illustré aux figures 2a à 2c, la première optique O1 et la deuxième optique O2 sont des optiques réfléchissantes, tels que des miroirs. Selon une alternative non illustrée, la première optique O1 et/ou la deuxième optique O2 peuvent également être des lentilles optiques. Dans l'un ou l'autre cas, les première et deuxième optiques O1 et O2 ont des rayons de courbure différents. Dans l'exemple de réalisation qui est

particulièrement illustré aux figures 2a à 2c, la première optique O1 est une optique divergente, et plus précisément un miroir divergent, tandis que la deuxième optique O2 est une optique plane, et plus précisément un miroir plan. Selon une alternative non illustrée, la première optique O1 peut être une optique
5 convergente et/ou la deuxième optique O2 peut être une optique divergente ou convergente. Une pluralité de combinaisons est ainsi envisageable pour les première et deuxième optiques O1 et O2, dans la mesure où le rayon de courbure de la première optique O1 est différent du rayon de courbure de la deuxième optique O2.

10

Il est fait référence dans la suite de cette description à un repère orthonormé de centre O et d'axes x, y et z, définissant des plans Oxz, Oxy et Oyz.

Lors de ladite première étape a), illustrée à la figure 2a, un faisceau de lumière FL, généré par une source de lumière SL, est envoyé sur l'optique SR. Dans
15 l'exemple particulier de réalisation ici décrit, la source de lumière SL est un laser impulsif femtoseconde, capable de générer des impulsions de l'ordre de 25 femtosecondes à une fréquence de 10 Hz, chaque impulsion ayant une énergie de l'ordre de 2,5 J. La puissance crête de ce laser impulsif est de l'ordre de 100
20 TW, tandis que sa puissance moyenne atteint 25 W environ. Le faisceau de lumière FL en sortie de la source de lumière SL est donc formé, dans l'exemple considéré, par une succession d'impulsions lumineuses. Le faisceau de lumière FL présente dans l'exemple considéré un diamètre de l'ordre de 80 mm. D'une manière générale, le diamètre d'un faisceau est mesuré dans un plan orthogonal à
25 la direction de propagation dudit faisceau. Le diamètre du faisceau de lumière FL est donc mesuré dans un plan parallèle au plan Oxz. L'optique SR est par exemple un miroir semi-réfléchissant, qui lorsqu'il reçoit un faisceau de lumière, en réfléchit une partie et en transmet une autre partie.

30 Le faisceau de lumière FL est alors séparé par l'optique SR en un premier sous-faisceau F1 et un deuxième sous-faisceau F2. L'optique SR définit un premier chemin optique C1 pour le premier sous-faisceau F1 et un deuxième chemin

optique C2 pour le deuxième sous-faisceau F2. Les premier et deuxième sous-faisceaux présentent sensiblement le même diamètre que le faisceau de lumière initial FL. Le diamètre du premier sous-faisceau est mesuré dans un plan parallèle au plan Oxy, tandis que le diamètre du deuxième sous-faisceau est mesuré dans un plan parallèle au plan Oxz. Dans l'exemple de réalisation ici décrit, le faisceau de lumière FL arrive sur l'optique SR sous une incidence α de l'ordre de 45° . Le faisceau de lumière FL peut également, de manière équivalente, arriver sur l'optique SR sous une incidence de l'ordre de 135° . Dans l'exemple de réalisation ici décrit, le premier sous-faisceau F1 est transmis par l'optique SR, tandis que le deuxième sous-faisceau F2 est réfléchi par l'optique SR. Selon une alternative préférentielle, le premier sous-faisceau F1 est réfléchi par l'optique SR, tandis que le deuxième sous-faisceau F2 est transmis par l'optique SR.

Lors de la deuxième étape b), illustrée à la figure 2b, le premier sous-faisceau F1 se propage et atteint au moins partiellement la première optique O1 agencée sur le premier chemin optique C1, tandis que le deuxième sous-faisceau F2 se propage et atteint au moins partiellement la deuxième optique O2 agencée sur le deuxième chemin optique C2. Le positionnement de la première optique O1 sur le premier chemin optique C1 et de la deuxième optique O2 sur le deuxième chemin optique C2 est choisi de telle sorte que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence Fref », et le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser Fcar », présentent entre eux un délai temporel τ .

La première optique O1 est préférentiellement agencée de manière que le premier sous-faisceau F1 parvienne sur la première optique O1 sous une incidence normale. La deuxième optique O2 est préférentiellement agencée de manière que le deuxième sous-faisceau F2 parvienne sur la deuxième optique O2 sous une incidence normale. Autrement dit, dans l'exemple considéré, la première optique O1 est agencée parallèlement au plan Oxy, tandis que la deuxième optique O2 est agencée parallèlement au plan Oxz.

Dans l'exemple de réalisation qui est particulièrement illustré aux figures 2a à 2c, le premier sous-faisceau F1 et le deuxième sous-faisceau F2 ont des fronts d'onde plans ou quasi-plans. En aval de la première optique O1 qui est un miroir divergent, le faisceau de référence Fref présente des fronts d'onde sphériques.

5 Les fronts d'onde du faisceau de référence Fref sont donc modifiés par rapport aux fronts d'onde du premier sous-faisceau F1, en raison de la première courbure de la première optique O1. En aval de la deuxième optique O2 qui est un miroir plan, le faisceau à caractériser Fcar présente des fronts d'onde plans ou quasi-plans, sensiblement identiques aux fronts d'onde du deuxième sous-faisceau F2.

10 Selon une alternative non illustrée, la première optique O1 peut ne pas modifier le rayon de courbure du faisceau de référence Fref par rapport au premier sous-faisceau F1 et/ou la deuxième optique O2 peut modifier le rayon de courbure du faisceau à caractériser Fcar par rapport au deuxième sous-faisceau F2, dans la mesure où le rayon de courbure de la première optique O1 est différent du rayon

15 de courbure de la deuxième optique O2.

La deuxième optique O2 présente préférentiellement un diamètre, ici mesuré dans un plan parallèle au plan Oxz, supérieur ou égal au diamètre du faisceau lumineux FL, de sorte que le diamètre du faisceau à caractériser Fcar demeure sensiblement le même en aval et en amont de la deuxième optique O2. D'une

20 manière générale, on choisit avantageusement le diamètre dO2 de la deuxième optique O2 de sorte que :

$$dO2 > DFL * \sqrt{2}$$

avec DFL le diamètre du faisceau lumineux FL. Dans l'exemple de réalisation ici décrit, le diamètre DFL du faisceau lumineux FL étant de l'ordre de 8 cm, le

25 diamètre dO2 est avantageusement choisi tel que : $dOp1 > 8 * \sqrt{2}$. On peut ainsi choisir une deuxième optique O2 présentant un diamètre dO2 de l'ordre de 15 cm.

On souhaite, dans le procédé 10 de caractérisation selon le premier mode de réalisation de l'invention, contrôler le délai temporel τ entre le faisceau de

30 référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar, afin que ledit délai temporel τ puisse balayer un intervalle de temps T1 avec un pas P1. Le choix de l'intervalle de temps T1 et du pas P1 est détaillé ultérieurement. Le moyen de contrôle Pz est

utilisé afin de contrôler le délai temporel τ entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar. Le moyen de contrôle Pz est typiquement une platine piézoélectrique ayant une course de 250 μm , permettant d'effectuer des déplacements avec une précision de l'ordre de quelques angströms Å. Le moyen

5 de contrôle Pz permet préférentiellement d'ajuster le positionnement selon l'axe z de la première optique O1. En translatant ladite première optique O1 suivant l'axe z, c'est-à-dire en faisant varier la différence de chemin optique entre les premier et deuxième chemins optiques C1 et C2, on contrôle le délai temporel τ entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar. Selon une

10 alternative, le moyen de contrôle Pz permet d'ajuster le positionnement selon l'axe y de la deuxième optique O2. Selon une autre alternative, le moyen de contrôle Pz permet à la fois d'ajuster le positionnement selon l'axe z de la première optique O1 et d'ajuster le positionnement selon l'axe y de la deuxième optique O2. Selon cette dernière alternative, le moyen de contrôle Pz comporte alors typiquement

15 une deuxième platine piézoélectrique. Dans la suite de la présente description, on emploie indifféremment les termes « moyen de contrôle » et « platine piézoélectrique ».

Le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar se propagent alors

20 respectivement selon les premier et deuxième chemins optiques C1 et C2 vers l'optique SR, pour la recombinaison du faisceau de référence Fref et du faisceau à caractériser Fcar. Dans l'exemple de configuration ici considéré, l'optique SR assure dans un premier temps la fonction de séparation du faisceau de lumière FL, et dans un deuxième temps la fonction de recombinaison du faisceau de

25 référence Fref et du faisceau à caractériser Fcar. Toutefois, on peut alternativement utiliser, au lieu d'une unique optique SR, une première optique assurant la fonction de séparation du faisceau de lumière FL et une deuxième optique, distincte de la première optique, assurant la fonction de recombinaison du faisceau de référence Fref et du faisceau à caractériser Fcar. Cette configuration

30 alternative est particulièrement illustrée à la figure 3, ultérieurement décrite.

Lors de la troisième étape c), illustrée à la figure 2c, le faisceau de référence Fref

et le faisceau à caractériser F_{car} sont recombinaés par l'optique SR. Le faisceau de référence F_{ref} et le faisceau à caractériser F_{car} se propagent alors vers le système de mesure SM1. Le système de mesure SM1 est agencé de sorte que le faisceau à caractériser F_{car} parvienne sur le système de mesure SM1 sous une incidence sensiblement normale. Nous considérons par la suite deux plans parallèles au plan Oxy :

- un premier plan z_1 , dans lequel est réalisée, pour chaque délai temporel τ la mesure du motif d'interférence bidimensionnel M1, et
- un deuxième plan z_2 , qui est le plan de la première optique O1.

10 Les premier et deuxième plans z_1 et z_2 sont représentés sur les figures 2b et 2c. L'éloignement du système de mesure SM1 par rapport à la première optique O1, ici mesuré suivant l'axe z, est choisi tel que, lorsque le faisceau de référence F_{ref} et le faisceau à caractériser F_{car} atteignent le premier plan z_1 de mesure, le diamètre du faisceau de référence F_{ref} est supérieur ou égal, et préférentiellement supérieur, au diamètre du faisceau à caractériser F_{car} . Ainsi, on permet que le

15 faisceau de référence F_{ref} interfère spatialement avec la totalité du faisceau à caractériser F_{car} . Lorsque le diamètre du faisceau de référence F_{ref} est égal au diamètre du faisceau à caractériser F_{car} , la totalité du faisceau de référence F_{ref} interfère avec la totalité du faisceau à caractériser F_{car} . Dans le cas préférentiel

20 où le diamètre du faisceau de référence F_{ref} est supérieur au diamètre du faisceau à caractériser F_{car} , seule une partie du faisceau de référence F_{ref} interfère avec le faisceau à caractériser F_{car} . Plus le système de mesure SM1 est éloigné, suivant l'axe z, de l'optique SR, plus le diamètre du faisceau de référence F_{ref} augmente et plus la partie du faisceau de référence F_{ref} qui interfère avec le

25 faisceau à caractériser F_{car} est petite. Ce faisant, plus la partie du faisceau de référence F_{ref} qui interfère avec le faisceau à caractériser F_{car} est petite, moins ladite partie du faisceau de référence F_{ref} est susceptible de présenter des défauts, et donc meilleure est la qualité des résultats qui peuvent être obtenus par le procédé 10 de caractérisation selon le premier mode de réalisation de

30 l'invention. Le faisceau de référence F_{ref} influence également le contraste du motif d'interférence bidimensionnel M1, et donc la qualité des mesures. Le contraste du motif d'interférence bidimensionnel M1 est en effet influencé par le rapport entre

l'intensité du faisceau à caractériser F_{car} et celle du faisceau de référence F_{ref} , c'est-à-dire le rapport entre la taille du faisceau à caractériser F_{car} et celle du faisceau de référence F_{ref} dans le premier plan z_1 de mesure. Le contraste du motif d'interférence bidimensionnel M_1 est optimum lorsque les intensités du

5 faisceau à caractériser F_{car} et du faisceau de référence F_{ref} sont égales dans le premier plan z_1 de mesure, ce qui implique que le faisceau de référence F_{ref} ne soit pas trop petit. Il s'agit donc de trouver un compromis pour la taille du faisceau de référence F_{ref} .

10 Suite à leur recombinaison, le faisceau de référence F_{ref} et le faisceau à caractériser F_{car} interfèrent spatialement. Lorsque le faisceau de référence F_{ref} et le faisceau à caractériser F_{car} , qui présentent entre eux un délai temporel τ donné, atteignent le système de mesure SM_1 , ils forment un motif d'interférence bidimensionnel M_1 . Le motif d'interférence bidimensionnel M_1 dépend des deux

15 directions transverses x et y et est mesuré pour un délai temporel τ donné. Le motif d'interférence bidimensionnel M_1 peut donc se noter : $M_{1\tau}(x, y)$. Un exemple de motif d'interférence bidimensionnel M_1 , mesuré expérimentalement pour un délai temporel τ donné, est représenté à la figure 4. Le motif d'interférence bidimensionnel M_1 est typiquement un ensemble d'anneaux concentriques,

20 l'épaisseur des anneaux diminuant au fur et à mesure que les anneaux s'éloignent du centre du motif.

Le motif d'interférence bidimensionnel M_1 est alors mesuré au moyen du système de mesure SM_1 . On propose au moins deux types de système de mesure, en

25 fonction de la taille, c'est-à-dire du diamètre, du faisceau à caractériser F_{car} .

- Un premier type de système de mesure, comportant uniquement un capteur CCD (de l'anglais « Charge-Coupled Device », pour « dispositif à transfert de charge ») d'une caméra, peut être utilisé dans le cas où le faisceau à caractériser F_{car} est de diamètre inférieur ou égal au diamètre dudit

30 capteur CCD. En pratique, ce premier type de système de mesure pourra typiquement être utilisé dans le cas d'un faisceau à caractériser F_{car} de diamètre inférieur à 1 cm.

- Dans le cas où le faisceau à caractériser F_{car} est de diamètre supérieur au diamètre dudit capteur CCD, un deuxième type de système de mesure pourra être utilisé : ce deuxième type de système de mesure comporte, outre le capteur CCD, un écran diffusant E et un objectif Obj. C'est ce

5 deuxième type de système de mesure qui est plus particulièrement représenté sur les figures 2a à 2c. L'écran diffusant E, par exemple agencé sensiblement parallèlement au plan Oxy, diffuse un signal s_1 du motif d'interférence bidimensionnel M1. L'objectif Obj capte le signal s_1 et forme

10 une image réduite du motif d'interférence bidimensionnel M1 sur le capteur CCD.

Avec le premier type comme avec le deuxième type de système de mesure SM1, le capteur CCD enregistre alors une image du motif d'interférence bidimensionnel M1. Ladite image peut alors être transmise au calculateur K. Nous revenons ultérieurement sur la résolution spatiale requise pour ladite image du motif

15 d'interférence bidimensionnel M1.

Les trois étapes qui viennent d'être décrites, en référence aux figures 2a, 2b et 2c, sont répétées pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1. Le nombre total N d'itérations des étapes a), b) et c), correspondant au

20 nombre N de délais temporels τ pour lesquels on souhaite mesurer le motif d'interférence bidimensionnel M1, vaut : $N = E(T1/P1) + 1$, où E désigne la fonction partie entière.

Nous revenons à présent sur le choix de l'intervalle de temps T1 et du pas P1

25 pour le balayage, ou scan, du délai temporel τ . Deux principales conditions sont à respecter :

- la première condition concerne le pas P1. D'après le critère de Shannon, le pas P1 doit être suffisamment petit pour bien échantillonner la période optique du faisceau à caractériser F_{car} , notamment afin d'éviter les effets

30 d'aliasing. Le critère de Shannon indique ainsi que deux points de mesure par période optique doivent être réalisés au minimum. Pour un faisceau à caractériser F_{car} dont le spectre est centré à 800 nm, avec une période

optique de l'ordre de 2,6 fs, le pas P1 doit donc être inférieur à 1,3 fs environ, soit un déplacement de la première optique O1 – ou de la deuxième optique O2 – inférieur à $c \times P1/2 = 200 \text{ nm}$, c désignant la vitesse de la lumière. On souhaite donc pouvoir contrôler le déplacement de la première optique O1 – ou de la deuxième optique O2 – avec une précision suffisante, c'est-à-dire typiquement de l'ordre du nm. Une platine piézoélectrique Pz telle que précédemment mentionnée est donc préférentiellement utilisée pour assurer le déplacement de la première optique O1 ou de la deuxième optique O2. Une telle platine piézoélectrique Pz assure en effet une précision inférieure à un nm. En pratique, le spectre du faisceau à caractériser Fcar a une certaine largeur, et pour éviter l'aliasing sur les fréquences les plus élevées de ce spectre, on choisit préférentiellement un pas P1 typiquement deux fois plus petit que la valeur minimale issue du critère de Shannon, soit dans cet exemple particulier : P1 \approx 0,7 fs.

- La seconde condition concerne l'intervalle de temps T1. Il s'agit de scanner un intervalle de temps T1 suffisamment grand pour observer les interférences du faisceau de référence Fref avec tous les points du faisceau à caractériser Fcar. En effet, du fait de la nature impulsionnelle du faisceau lumineux FL, les interférences entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar ne sont observées, pour un délai temporel τ donné, que sur une couronne, qui ne couvre qu'une partie seulement du faisceau à caractériser Fcar. Pour reconstruire l'ensemble du faisceau à caractériser Fcar, il faut donc scanner un intervalle de temps T1 suffisamment grand pour que cette couronne passe successivement par tous les points du faisceau à caractériser Fcar. Cette notion est illustrée aux figures 5a à 5c et 6a à 6c.

o La figure 5a montre une première simulation des profils spatio-temporels du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref, pour un délai temporel τ nul entre lesdits faisceaux Fcar et Fref. Sur cette première simulation, le faisceau de référence

5 Fref interfère avec le faisceau à caractériser Fcar sur une première zone Int1, située au centre du faisceau à caractériser Fcar. De part et d'autre de cette première zone Int1, des zones latérales du faisceau à caractériser Fcar n'interfèrent pas avec le faisceau de référence Fref. La figure 6a montre un premier motif d'interférence bidimensionnel, correspondant à la configuration de la figure 5a, c'est-à-dire à un délai temporel τ nul entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar.

10 ○ La figure 5b montre une deuxième simulation des profils spatio-temporels du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref, pour un délai temporel τ de 13 fs entre lesdits faisceaux Fcar et Fref. Sur cette deuxième simulation, le faisceau de référence Fref interfère avec le faisceau à caractériser Fcar sur des deuxième et troisième zones Int2 et Int3. Entre lesdites deuxième et troisième zones Int2 et Int3, une zone centrale du faisceau à caractériser n'interfère pas avec le faisceau de référence Fref. La figure 6b montre un deuxième motif d'interférence bidimensionnel, correspondant à la configuration de la figure 5b, c'est-à-dire à un délai temporel τ de 13 fs entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar.

15 ○ La figure 5c montre une troisième simulation des profils spatio-temporels du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref, pour un délai temporel τ de 27 fs entre lesdits faisceaux Fcar et Fref. Sur cette troisième simulation, le faisceau de référence Fref n'interfère quasiment plus avec le faisceau à caractériser Fcar. La figure 6c montre un troisième motif d'interférence bidimensionnel, correspondant à la configuration de la figure 5c, c'est-à-dire à un délai temporel τ de 27 fs entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar.

20

25

30

L'intervalle de temps T1 à couvrir ou, de façon équivalente, l'intervalle de distance Δz à couvrir, peut alors être aisément calculé, d'une manière bien connue de l'homme du métier. L'intervalle de distance Δz peut ainsi s'exprimer :

$$\Delta z = \frac{\Delta x^2}{2L}$$

- 5 avec Δx = Δy le rayon du faisceau à caractériser Fcar et L la distance entre la première optique O1 et le plan de mesure. Sachant que le pas en distance doit être, au plus, de λ/2 – avec λ la longueur d'onde du faisceau à caractériser, le nombre total minimum N de pas à réaliser pour un scan complet est de :

$$N = \Delta x^2 / L \times \lambda$$

10

Dans l'exemple particulier précédemment décrit de la source laser SL, générant des impulsions de 25 fs et atteignant une puissance crête de 100TW, le faisceau à caractériser présente un rayon Δx = 40 mm et une longueur d'onde λ = 800 nm.

- On obtient donc, dans ce cas particulier : $N = 2 \cdot 10^6 / L$, la distance L entre la première optique O1 et le plan de mesure étant exprimée en mm. Afin que le nombre minimum N de pas à réaliser pour un scan complet ne soit pas trop important, on utilisera donc avantageusement de grandes valeurs pour la distance L entre la première optique O1 et le plan de mesure. Pour L = 1000 mm par exemple, on obtient un nombre minimum N de pas à réaliser qui vaut : $N = 2 \cdot 10^3$.
- 15 Sachant que le taux de répétition de la source laser SL considérée est de 10 Hz, un scan complet requiert alors environ 3 minutes, en ne réalisant qu'un seul tir laser par point de mesure.
- 20

- Il est à noter que dans l'hypothèse où le nombre de points de mesure devient critique, c'est-à-dire qu'il mène à un temps de mesure trop important compte tenu de la cadence de la source laser SL, une possibilité est de réaliser plusieurs scans « fins », c'est-à-dire avec des pas qui respectent le critère de Shannon ainsi qu'expliqué plus haut, entre lesquels on réalise des scans avec des pas beaucoup plus importants, qui ne respectent pas le critère de Shannon. On obtient ainsi une
- 25 caractérisation du faisceau à caractériser Fcar sur une série d'anneaux concentriques disjoints, ce qui peut dans bien des cas être suffisant pour évaluer les distorsions spatio-temporelles présentes dans le faisceau à caractériser.
- 30

- Nous poursuivons la description des étapes du procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention. On rappelle que les trois étapes précédemment décrites en référence aux figures 2a, 2b et 2c sont répétées pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1. A l'issue de ces N itérations, le capteur CCD a donc enregistré, pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1, une image du motif d'interférence bidimensionnel M1 correspondant, soit N images.
- 10 Lors d'une quatrième étape d), le calculateur K peut alors construire, à partir desdites N images des N motifs d'interférences bidimensionnels M1, un interférogramme temporel S1. L'interférogramme temporel S1 dépend des deux directions transverses x et y et du délai temporel τ , le délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1. L'interférogramme temporel S1 peut donc se noter : $S1(x, y, \tau)$. La figure 7a montre l'allure typique d'un interférogramme temporel partiel p1, mesuré en un point donné (x,y). L'interférogramme temporel partiel p1 peut donc se noter : $p1_{x,y}(\tau)$. L'interférogramme temporel S1 peut être vu comme l'ensemble, pour tous les points (x,y), des interférogrammes temporels partiels p1.
- 20 Le calculateur K effectue ensuite les cinquième et sixième étapes e) et f) suivantes :
- e) pour chaque point (x,y), calcul de la transformée de Fourier S1' de l'interférogramme temporel S1 par rapport à la variable τ , afin de passer dans l'espace des fréquences ω . La transformée de Fourier S1' peut donc se noter : $S1'(x,y,\omega)$. La transformée de Fourier S1' présente un pic fréquentiel central f_c , un premier pic fréquentiel latéral f_{l1} et un deuxième pic fréquentiel latéral f_{l2} . La figure 7b montre l'allure typique de la transformée de Fourier partielle p1' de l'interférogramme temporel partiel p1 de la figure 7a. La transformée de Fourier partielle P1' peut donc se noter : $p1'_{x,y}(\omega)$. La transformée de Fourier partielle p1' représente ainsi partiellement, en un point donné (x,y), le pic fréquentiel
- 25
- 30

central f_c et les premier et deuxième pics fréquentiels latéraux f_{l1} et f_{l2} de la transformée de Fourier $S1'$. La transformée de Fourier $S1'$ peut être vue comme l'ensemble, pour tous les points (x,y) , des transformées de Fourier partielles $p1'$.

5

- f) Sélection du premier pic fréquentiel latéral f_{l1} ou du deuxième pic fréquentiel latéral f_{l2} de la transformée de Fourier $S1'$ et calcul, pour le pic fréquentiel latéral sélectionné, de son amplitude spectrale $A_R(\omega)$, dite « amplitude spectrale relative » et de sa phase spatio-spectrale $\varphi_R(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale relative ». Le choix du pic fréquentiel latéral sélectionné détermine la convention de signe à appliquer aux résultats obtenus par la suite.

10

La phase spatio-spectrale $\varphi_R(x,y,\omega)$ du pic fréquentiel latéral sélectionné est la différence de la phase spatio-spectrale du faisceau à caractériser F_{car} et de la phase spatio-spectrale du faisceau de référence F_{ref} . L'amplitude spectrale $A_R(\omega)$ du pic fréquentiel latéral sélectionné est le produit de l'amplitude spectrale du faisceau à caractériser F_{car} et de l'amplitude spectrale du faisceau de référence F_{ref} . Les étapes qui viennent d'être décrites permettent donc d'obtenir :

15

- 20 - la phase spatio-spectrale du faisceau à caractériser F_{car} relativement à la phase spatio-spectrale du faisceau de référence, d'où l'appellation de « phase spatio-spectrale relative » ;
- l'amplitude spectrale du faisceau à caractériser F_{car} relativement à l'amplitude spectrale du faisceau de référence, d'où l'appellation

25

Tous les points (x,y) du faisceau à caractériser F_{car} peuvent ainsi être comparés à une même référence, qui peut éventuellement rester indéterminée. Ce type de caractérisation d'un faisceau relativement à une référence permet typiquement d'accéder aux variations de forme d'un champ électromagnétique $E(x,y,t)$ en fonction des directions transverses x et y et du temps t .

30

Nous revenons à présent sur la résolution spatiale requise lors de l'acquisition, pour chaque délai temporel τ , d'une image du motif d'interférence bidimensionnel M1 par le capteur CCD du système de mesure SM1. Comme le montre par exemple la figure 4, le procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention implique de mesurer des franges d'interférences très serrées. Ceci provient du fait que l'on fait interférer un front d'onde quasiment plan, celui du faisceau à caractériser Fcar, avec un front d'onde sphérique, celui du faisceau de référence Fref. Lorsque l'on s'éloigne du centre du faisceau recombinaison, l'angle entre ces deux fronts devient donc de plus en plus fort, comme illustré par exemple aux figures 5a à 5c, si bien que les franges d'interférences deviennent de plus en plus serrées. Dans le cas d'une source de lumière SL de grand diamètre – comme par exemple, le cas particulier de source de lumière SL décrit plus haut, qui émet un faisceau de lumière FL de 80 mm de diamètre, cela implique de disposer d'une bonne résolution spatiale pour la mesure des motifs d'interférence bidimensionnels M1, et donc des interférogrammes temporels S1. En pratique, cela impose d'utiliser une caméra dont le nombre de pixels est suffisant pour permettre de résoudre les franges d'interférence. Dans l'exemple de configuration ici décrit, une caméra de 29 Mpx est ainsi utilisée. Il n'est en revanche pas nécessaire de chercher à reconstruire le champ électromagnétique du faisceau à caractériser sur l'ensemble de ces pixels, car il est très improbable que la structure dudit champ électromagnétique varie spatialement avec des fréquences aussi élevées, pour la grande majorité des sources de lumière existantes. Un maillage de 100 X 100 selon les axes x et y est en pratique tout à fait suffisant pour reconstruire le faisceau laser à caractériser Fcar. Pour limiter le volume de données à traiter et le temps de traitement, on peut donc avantageusement sous-échantillonner les images des motifs d'interférences bidimensionnels une fois qu'elles ont été acquises, et ne garder les données que sur un sous-maillage des images initiales.

Complémentairement à la description qui vient d'être faite du premier mode de réalisation de l'invention, une analyse mathématique dudit procédé 10 est présentée ci-dessous.

Soit $E_{car}(x,y,z,t)$ le champ électromagnétique du faisceau à caractériser F_{car} . Soit $E_{ref}(x,y,z,t)$ le champ électromagnétique du faisceau de référence F_{ref} , dont l'expression exacte peut éventuellement rester indéterminée, ou bien être précisée déterminée, selon une variante ultérieurement décrite. Ainsi que
 5 précédemment décrit, le champ électromagnétique $E_{ref}(x,y,z,t)$ du faisceau de référence F_{ref} peut être décalé d'un délai temporel τ , ou retard, variable par rapport au champ électromagnétique $E_{car}(x,y,z,t)$ du faisceau à caractériser F_{car} .

Les champs électromagnétiques $E_{car}(x,y,z,t)$ et $E_{ref}(x,y,z,t)$ du faisceau à
 10 caractériser F_{car} et du faisceau de référence F_{ref} peuvent être définis de manière complexe, c'est-à-dire sous la forme générale : $E(t) = \hat{E} \exp(i\omega_L t)$, avec \hat{E} l'enveloppe complexe et ω_L la fréquence porteuse.

En un point (x,y,z_1) du premier plan z_1 , le champ total $E_{tot}(x,y,z_1,t)$, résultant de la superposition du champ $E_{car}(x,y,z,t)$ du faisceau à caractériser F_{car} et du
 15 champ $E_{ref}(x,y,z,t)$ du faisceau de référence F_{ref} , vaut :

$$E_{tot}(x, y, z_1, t) = E_{car}(x, y, z_1, t) + E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau)$$

On mesure l'interférogramme temporel S_1 , c'est-à-dire la quantité de lumière incidente en chaque point du premier plan z_1 , intégrée dans le temps, qui est donc
 20 proportionnelle à :

$$S_1(x, y, \tau) = \int |E_{car}(x, y, z_1, t) + E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau)|^2 dt$$

On obtient donc :

$$S_1(x, y, \tau) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

$$+ \int E_{car}(x, y, z_1, t) \times E_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt$$

$$+ \int E_{car}^*(x, y, z_1, t) \times E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau) dt$$
 25

où ε_1 et ε_2 sont les signaux respectivement obtenus avec le faisceau à caractériser F_{car} seul et avec le faisceau de référence F_{ref} seul au point (x,y) du plan de mesure z_1 .

30 Lorsque l'on mesure l'interférogramme temporel $S_1(x,y,\tau)$ en fonction de τ , on

obtient donc trois termes.

Le premier terme, $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$, indépendant de τ , est la somme incohérente du faisceau à caractériser F_{car} et du faisceau de référence F_{ref} .

Le deuxième terme, noté $J(x, y, \tau) = \int E_{car}(x, y, z_1, t) \times E_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt$, est la fonction de corrélation croisée entre le champ électromagnétique $E_{car}(x, y, z_1, t)$ du faisceau à caractériser et le champ électromagnétique $E_{ref}(x, y, z_1, t)$ du faisceau de référence.

Le troisième terme, noté $J^*(x, y, \tau) = \int E_{car}^*(x, y, z_1, t) E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau) dt$, est le conjugué du deuxième terme, c'est-à-dire la fonction de corrélation croisée entre le champ électromagnétique $E_{ref}(x, y, z_1, t)$ du faisceau de référence et le champ électromagnétique $E_{car}(x, y, z_1, t)$ du faisceau à caractériser.

En utilisant la décomposition en enveloppe complexe et porteuse, on obtient pour le deuxième terme $J(x, y, \tau)$:

$$J(x, y, \tau) = e^{i\omega_L \tau} \int \hat{E}_{car}(x, y, z_1, t) \times \hat{E}_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt$$

La fonction $J(x, y, \tau)$ oscille donc à la fréquence ω_L en fonction de τ , alors que sa conjuguée oscille à la fréquence $-\omega_L$ en fonction de τ . En effectuant la transformée de Fourier de $S_1(x, y, \tau)$ par rapport à τ , on obtient donc trois pics, correspondant aux trois termes de la somme ci-dessus, centrés respectivement aux fréquences de 0, ω_L , et $-\omega_L$. Ce point est illustré en particulier à la figure 7b, précédemment décrite.

On peut alors sélectionner le pic correspondant à la transformée de Fourier de $J(x, y, \tau)$.

D'après l'équation précédente pour $J(x, y, \tau)$ et le théorème de corrélation croisée (ou « cross-correlation theorem » en anglais), la transformée de Fourier $J'(x, y, \omega)$ par rapport à la variable τ de la fonction $J(x, y, \tau)$ est donnée par la relation :

$$J'(x, y, \omega) = \hat{E}_{car}'(x, y, z_1, \omega) \times \hat{E}_{ref}'^*(x, y, z_1, \omega) \otimes \delta(\omega - \omega_L)$$

où les fonctions notées « ' » correspondent aux transformées de Fourier par rapport à τ . Autrement dit, en effectuant la transformation de Fourier de $S_1(x, y, \tau)$

par rapport à τ , et en sélectionnant le pic fréquentiel latéral centré en ω_L de cette transformée de Fourier, on obtient le produit du spectre du champ électromagnétique du faisceau à caractériser, $\hat{E}_{car'}(x,y,z_1,\omega)$, et du spectre conjugué du champ électromagnétique du faisceau de référence, $\hat{E}_{ref}^*(x,y,z_1,\omega)$.

5 On remarque que le pic fréquentiel latéral centré en $-\omega_L$ peut également être choisi. On obtient alors le produit du spectre conjugué du champ électromagnétique du faisceau à caractériser, et du spectre du champ électromagnétique du faisceau de référence. Le choix du pic fréquentiel latéral sélectionné détermine simplement la convention de signe à appliquer aux résultats

10 obtenus par la suite.

Ainsi que décrit plus-haut, cette mesure donne donc accès, en utilisant les définitions de l'amplitude spectrale et de la phase spatio-spectrale :

- au produit des amplitudes spectrales du champ électromagnétique du faisceau à caractériser et du champ électromagnétique du faisceau de
- 15 référence,
- et à la différence des phases spatio-spectrales du champ électromagnétique du faisceau à caractériser et du champ électromagnétique du faisceau de référence.

20

Une première variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite. Ladite première variante permet avantageusement de prendre en compte d'éventuelles fluctuations des propriétés, telles que l'intensité et/ou la distribution spatiale de l'intensité, de la source de lumière SL au cours du temps, c'est-à-dire

25 typiquement d'une impulsion à l'autre dans le cas d'une source de lumière SL impulsionnelle. D'éventuelles fluctuations de l'intensité et/ou de la distribution spatiale de l'intensité de la source de lumière SL pendant l'intervalle de temps T_1 de balayage sont en effet susceptibles de dégrader les motifs d'interférences bidimensionnels M_1 mesurés, et donc les spectres complexes qui en sont déduits.

30

Dans cette première variante, le procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de l'invention comporte une étape g), illustrée à la

figure 8, de calcul d'au moins une propriété, telle que l'intensité et/ou la distribution spatiale de l'intensité, de la source de lumière SL au cours du temps. Dans le cas d'un calcul de la distribution spatiale de l'intensité, ledit calcul peut alors être utilisé pour corriger, au moins partiellement, l'effet d'une éventuelle fluctuation de la distribution spatiale de l'intensité de la source de lumière SL sur la mesure interférométrique réalisée. Pour calculer au moins une propriété de la source de lumière SL, on peut effectuer un simple prélèvement sur le faisceau de lumière FL et imager ledit prélèvement. Ceci peut par exemple être réalisé en plaçant une optique séparatrice sur le trajet du faisceau de lumière FL, en amont de l'optique SR. Cette solution n'est cependant pas idéale, car pour un faisceau ultrabref de grand diamètre, ladite optique séparatrice est susceptible d'affecter significativement les propriétés spatio-temporelles du faisceau de lumière FL. Une solution préférentielle consiste à utiliser une deuxième optique O2 seulement partiellement réfléchissante, c'est-à-dire par exemple une lame de verre nue. Il est alors possible de mesurer le profil spatial d'intensité du faisceau à caractériser Fcar sur la partie transmise à travers la deuxième optique O2, ladite partie transmise n'étant pas utilisée par la suite à des fins d'interférence. L'utilisation d'une optique partiellement réfléchissante permet en outre de contribuer à un meilleur équilibrage des énergies du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref, et donc d'obtenir un meilleur contraste pour les motifs d'interférences bidimensionnels M1.

Dans l'exemple particulier représenté à la figure 8, l'étape g) est réalisée après la première étape a) de séparation du faisceau de lumière FL, et avant la troisième étape c) de recombinaison du faisceau de référence Fref et du faisceau à caractériser Fcar. Le montage optique de la figure 8 comporte, par rapport au montage optique précédemment décrit en lien avec les figures 2a à 2c :

- une deuxième optique O2 permettant également de transmettre une partie du faisceau à caractériser Fcar, par exemple une lame de verre nue ;
- un deuxième système de mesure SM2 et, optionnellement, un deuxième calculateur K2.

Selon la première variante, à l'issue de ladite première étape a), le deuxième sous-faisceau F2 se propage vers la deuxième optique O2. La deuxième optique O2 réfléchit une première partie du deuxième sous-faisceau F2, et transmet une deuxième partie du deuxième sous-faisceau F2. La première partie du deuxième sous-faisceau F2 qui est réfléchi est une première partie du faisceau à caractériser Fcar et se propage vers l'optique SR afin d'être recombiniée avec le faisceau de référence Fref, ainsi que précédemment décrit. La deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar qui est transmise est une deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar et se propage vers le deuxième système de mesure SM2.

10

Le deuxième système de mesure SM2 est agencé de sorte que la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar parvienne sur ledit deuxième système de mesure SM2 sous une incidence sensiblement normale. Le deuxième système de mesure SM2 est par ailleurs analogue au premier système de mesure SM1 précédemment décrit en lien avec les figures 2a à 2c. Le deuxième système de mesure comporte ainsi, en fonction de la taille de la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar :

- uniquement un deuxième capteur CCD, référencé « CCD2 » ;
- ou, en plus du deuxième capteur CCD2, un deuxième écran diffusant E2 et un deuxième objectif Obj2. C'est ce cas qui est plus particulièrement représenté sur la figure 8.

20

Le deuxième écran diffusant E2, ici agencé parallèlement au plan Oxz, diffuse un signal s2 de la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar. Le deuxième objectif Obj2 capte ledit signal s2 et forme une image réduite de la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar sur le deuxième capteur CCD2. Le deuxième capteur CCD2 enregistre alors une image de la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar. Ladite image peut alors être transmise au calculateur K précédemment décrit, ou alternativement à un deuxième calculateur K2, pour l'analyse des propriétés de la deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar. Les propriétés de ladite deuxième partie du faisceau à caractériser Fcar sont caractéristiques des propriétés du flux de lumière FL.

25

30

L'étape g) qui vient d'être décrite peut être réalisée au moins une fois pour chaque délai temporel τ balayant l'intervalle de temps T1 avec le pas P1, c'est-à-dire au moins N fois. En particulier, dans le cas d'une source de lumière SL
5 impulsionnelle, l'étape g) qui vient d'être décrite peut être réalisée pour chaque impulsion. Afin de minimiser la durée du balayage, on utilise préférentiellement une seule impulsion par délai temporel τ . Toutefois, pour un délai temporel τ donné de l'intervalle de temps T1, plusieurs impulsions peuvent alternativement être utilisées.

10

Une deuxième variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite, en lien avec la figure 9. Ladite deuxième variante permet
avantageusement d'obtenir une caractérisation absolue du faisceau à caractériser Fcar, indépendamment du faisceau de référence Fref. Il est à noter que les
15 première et deuxième variantes peuvent être combinées ou utilisées indépendamment l'une de l'autre.

Il s'agit, pour parvenir à une caractérisation absolue du faisceau à caractériser Fcar, de mesurer :

- 20
- la phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ du faisceau de référence Fref, et
 - l'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ du faisceau de référence Fref.

On peut en effet, connaissant lesdites phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ et amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ du faisceau de référence Fref, déterminer la phase
spatio-spectrale absolue et l'amplitude spectrale absolue du faisceau à
25 caractériser Fref, et ce en tout point (x,y) où la mesure de l'interférogramme temporel S1 a été effectuée.

Dans cette deuxième variante, le procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de l'invention comporte ainsi :

- 30
- une étape i), illustrée à la figure 9, de mesure de la phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ du premier sous-faisceau F1, et
 - une étape de mesure de l'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ du premier sous-

faisceau F1.

Les deux étapes qui viennent d'être décrites peuvent typiquement être réalisées de manière simultanée par un même dispositif.

- 5 Dans l'exemple particulier représenté à la figure 9, l'étape i) est réalisée après la première étape a), au cours de laquelle le faisceau de lumière FL est séparé en le premier sous-faisceau F1 et le deuxième sous-faisceau F2, et avant la deuxième
- 10 étape b), au cours de laquelle le premier sous-faisceau F1 est réfléchi par la première optique O1. Le montage optique de la figure 9 comporte, par rapport au montage optique précédemment décrit en lien avec les figures 2a à 2c :
- un système de mesure temporelle MT ;
 - un miroir amovible Ma, permettant lorsqu'il est en place de diriger au moins une partie du faisceau de référence vers le système de mesure temporelle MT.

15

Selon la deuxième variante, le miroir amovible Ma est agencé sur le premier chemin optique C1 du premier sous-faisceau F1 de sorte que, à l'issue de la première étape a), au moins une partie dudit premier sous-faisceau F1 se propage vers le système de mesure temporelle MT. Alternativement au miroir amovible Ma,

20 l'utilisation d'une optique non-amovible semi-réfléchissante, permettant de transmettre une première partie du premier sous-faisceau F1 et de réfléchir une deuxième partie du premier sous-faisceau F1, peut être envisagée. Toutefois, toute transmission d'un faisceau à travers une optique ayant généralement un impact sur les propriétés dudit faisceau, on préfère utiliser le miroir amovible Ma.

25 Le système de mesure temporelle MT peut par exemple utiliser :

- un dispositif FROG (de l'anglais « Frequency-Resolved Optical Gating »),
 - un dispositif SPIDER (de l'anglais « Spectral Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction »), ou
 - un dispositif d'interférométrie spectrale auto-référencée SRSI (de l'anglais
- 30 « Self-Referenced Spectral Interferometry »).

On obtient ainsi, à l'issue de l'étape i) qui vient d'être décrite, une mesure de la phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ du premier sous-faisceau F1. On peut alors, en soustrayant ladite phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, par exemple au moyen du calculateur K, accéder à la phase spatio-spectrale du faisceau à caractériser Fcar, dite « phase spatio-spectrale absolue ».

L'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ peut typiquement être mesurée grâce au système de mesure temporelle MT utilisé pour mesurer la phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, ou alternativement être mesurée en utilisant un spectromètre.

10

On obtient ainsi une mesure de l'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ du faisceau de référence Fref. On peut alors, en divisant l'amplitude spectrale relative $A_{\text{R}}(\omega)$ par l'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ du faisceau de référence Fref, accéder à l'amplitude spectrale du faisceau à caractériser Fcar, dite « amplitude spectrale absolue ».

15

Complémentairement à la description qui vient d'être faite de la première variante du premier mode de réalisation de l'invention, une analyse mathématique de ladite première variante est présentée ci-dessous. Le procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention permet en effet d'obtenir un champ électromagnétique du faisceau de référence ayant une expression simple, et pouvant donc être déterminée expérimentalement selon ladite deuxième variante.

Soient (x_0,y_0) les coordonnées du point de référence dans le deuxième plan z_2 de la première optique O1, c'est-à-dire du point générant le faisceau de référence Fref qui interfère effectivement avec le faisceau à caractériser Fcar dans le premier plan z_1 de mesure du motif d'interférence bidimensionnel M1 pour chaque délai temporel τ . Il est effet possible de considérer que ledit point de référence (x_0,y_0) est un point source, dont le champ électromagnétique est homogène, dans la mesure où le faisceau de référence Fref interférant avec le faisceau à caractériser Fcar dans le premier plan z_1 est issu d'une partie dudit faisceau de référence Fref dans le deuxième plan z_2 qui est petite par rapport au faisceau à

30

caractériser F_{car} dans le premier plan z_1 . En pratique, la superficie de ladite partie du faisceau de référence F_{ref} dans le deuxième plan z_2 est typiquement de l'ordre de 10% de la superficie du faisceau à caractériser F_{car} dans le premier plan z_1 . La superficie de ladite petite partie du faisceau de référence F_{ref} dans le

5 deuxième plan z_2 n'est pas nécessairement égale à la surface de la première optique O_1 .

Nous notons le champ de point de référence, dans le deuxième plan z_2 , de la manière suivante :

$$P_{ref}(t) = P_{ref}(x_0, y_0, z_2, t)$$

10

Le champ électromagnétique du faisceau de référence F_{ref} dans le premier plan z_1 de mesure peut alors être approximé par :

$$E_{ref}(x, y, z_1, t) = P_{ref}(t - r/c)$$

où r est la distance entre le point de référence, de coordonnées (x_0, y_0, z_2) , et

15 chaque point (x, y) du premier plan z_1 de mesure, de coordonnées (x, y, z_1) . La distance $r(x, y)$ peut donc être calculée géométriquement, et est donnée par la relation :

$$r(x, y) = \sqrt{(D + f)^2 + x^2 + y^2}$$

où $D = z_1 - z_2$ est la distance entre la première optique O_1 et le premier plan z_1 , et

20 f est la distance focale de la première optique O_1 . En pratique, on a typiquement : $D \gg f$. Dans l'exemple particulier de réalisation ici décrit, $D = 3$ m, et $f = 250$ mm. Le spectre du champ électromagnétique du faisceau de référence dans le premier plan z_1 est donc donné par la relation :

$$\hat{E}_{ref}'(x, y, z_1, \omega) = \hat{P}_{ref}'(\omega) \times \exp\left[i \times \frac{\omega}{c} \times r(x, y)\right]$$

25 La caractérisation de $\hat{E}_{car}'(x, y, z_1, \omega)$ en amplitude et en phase nécessite de connaître $\hat{E}_{ref}'(x, y, z_1, \omega)$, ce qui passe donc par la mesure de $\hat{P}_{ref}'(\omega)$, encore une fois en amplitude et phase. Cette mesure du champ électromagnétique complexe en un point peut tout à fait être réalisée à l'aide de la technologie existante, aujourd'hui mise en œuvre dans des appareils commerciaux, utilisant

30 des méthodes FROG, SPIDER ou SRSI, précédemment mentionnées.

Une troisième variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite. Ladite troisième variante permet avantageusement de prendre en compte la courbure du front d'onde du faisceau de référence F_{ref} qui est éventuellement introduite par la première optique $O1$ et/ou la courbure du front d'onde du faisceau à caractériser F_{car} qui est éventuellement introduite par la deuxième optique $O2$. Dans l'exemple de réalisation qui a été décrit jusqu'à présent, le premier sous-faisceau $F1$ en entrée de la première optique $O1$ est une plane, et le faisceau de référence F_{ref} en sortie de la première optique $O1$ est une onde sphérique. Ainsi, on décrit plus particulièrement le cas où la troisième variante prend en compte la courbure du front d'onde du faisceau de référence F_{ref} qui est introduite par la première optique $O1$. Il est à noter que ladite troisième variante peut être combinée avec la première variante et/ou avec la deuxième variante, précédemment décrites, ou mise en œuvre indépendamment desdites première et deuxième variantes.

15

Selon ladite troisième variante, on réalise, après la réflexion du premier sous-faisceau $F1$ sur la première optique $O1$ et avant la recombinaison du faisceau de référence F_{ref} avec le faisceau à caractériser F_{car} , une mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 donnée du faisceau de référence $\varphi_{ref}(x,y,\omega_0)$. Un dispositif de Shack-Hartmann peut typiquement être utilisé pour réaliser la mesure de la phase spatiale du faisceau de référence. Ladite phase spatiale $\varphi_{ref}(x,y,\omega_0)$ est caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence F_{ref} introduite par la première optique $O1$.

20

On peut alors soustraire, par exemple au moyen du calculateur K , la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0} \varphi_{ref}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative ou à la phase spatio-spectrale absolue du faisceau à caractériser F_{car} , précédemment obtenues, pour l'obtention respectivement d'une phase spatio-spectrale relative corrigée ou d'une phase spatio-spectrale absolue corrigée du faisceau à caractériser F_{car} .

30

Une alternative à cette troisième variante peut être envisagée, qui est à présent décrite, en lien avec la figure 3. La figure 3 montre un deuxième dispositif 2 de

caractérisation d'un faisceau de lumière, qui peut alternativement être mis en œuvre dans le procédé 10 selon le premier mode de réalisation de l'invention. Le dispositif 2 comporte :

- 5 - une optique séparatrice O_s pour la séparation du faisceau de lumière FL en le premier sous-faisceau F1 et le deuxième sous-faisceau F2 ;
- la première optique O_1 ;
- une optique correctrice de front d'onde Cor et une troisième optique O_3 ;
- la deuxième optique O_2 , qui comporte avantageusement des premier, deuxième, troisième et quatrième miroirs mi_1 , mi_2 , mi_3 et mi_4 ;
- 10 - le moyen de contrôle Pz d'un délai temporel τ ;
- une optique recombinaison O_r pour la recombinaison du faisceau de référence Fref et du faisceau à caractériser Fcar ;
- le système de mesure SM1 ;
- et le calculateur K.

15 La première optique O_1 est agencée sur le chemin optique du premier sous-faisceau F1, en aval de l'optique séparatrice O_s . L'optique correctrice de front d'onde est agencée sur le chemin optique du faisceau de référence Fref, en aval de la première optique O_1 . La troisième optique O_3 , qui est typiquement un miroir plan, est agencée sur le chemin optique du faisceau de référence Fref, en aval de
20 l'optique correctrice de front d'onde et en amont de l'optique recombinaison O_r .

Les premier, deuxième, troisième et quatrième miroirs mi_1 à mi_4 qui forment la deuxième optique O_2 sont agencés sur le chemin optique du deuxième sous-faisceau F2, en aval de l'optique séparatrice O_s . L'optique recombinaison O_r est agencée à la fois sur le chemin optique du faisceau de référence Fref, en aval de
25 la troisième optique O_3 , et sur le chemin optique du faisceau à caractériser Fcar, en aval du quatrième miroir mi_4 de la deuxième optique O_2 .

L'optique correctrice de front d'onde Cor permet avantageusement de corriger la courbure du front d'onde du faisceau de référence Fref, qui est due à la réflexion dudit faisceau de référence Fref sur la première optique O_1 , et d'obtenir un front
30 d'onde plan pour ledit faisceau de référence Fref. On contribue ainsi avantageusement à l'obtention de franges d'interférences moins serrées pour le motif d'interférence bidimensionnel M1 entre le faisceau de référence Fref et le

faisceau à caractériser F_{car} . Augmenter l'espacement entre lesdites franges d'interférences permet de diminuer la contrainte en résolution spatiale pour le système de mesure SM1. En effet, plus les franges d'interférences sont serrées, plus la résolution spatiale du système de mesure SM1 doit être élevée. Augmenter
5 l'espacement entre lesdites franges d'interférences permet également de diminuer l'intervalle temporel à scanner.

Il s'agit pour cela d'introduire l'optique correctrice de front d'onde Cor sur le chemin optique du faisceau de référence Fref, en aval de la première optique O1 et en amont de l'optique recombinaison Or. Grâce à la configuration alternative
10 illustrée à la figure 3, l'introduction d'une telle optique correctrice dans le montage optique n'a pas d'influence sur le faisceau à caractériser F_{car} . L'optique correctrice de front d'onde Cor peut typiquement être :

- une lentille convergente agencée de telle sorte que la première optique O1 se trouve au foyer principal objet de la lentille convergente, ou
- 15 - un télescope comportant un miroir divergent et un miroir convergent, et permettant d'étendre le faisceau de référence Fref tout en conservant un front d'onde plan pour le faisceau de référence Fref.

Le faisceau de référence Fref en sortie de l'optique correctrice Cor est alors parallèle et présente des fronts d'ondes sensiblement plans.

20

Le dispositif 2 comporte avantageusement les premier, deuxième, troisième et quatrième miroirs mi_1 , mi_2 , mi_3 et mi_4 , formant la deuxième optique O2. Le premier miroir mi_1 est agencé en aval de l'optique séparatrice Os sur le chemin optique du deuxième sous-faisceau F2. Le premier miroir mi_1 permet de diriger le
25 deuxième sous-faisceau F2 vers le moyen de contrôle Pz. Dans la configuration particulière ici décrite, le moyen de contrôle Pz permet d'ajuster simultanément le positionnement des deuxième et troisième miroirs mi_2 et mi_3 selon l'axe z. Le moyen de contrôle Pz comporte avantageusement une unique platine piézoélectrique pour le déplacement précis, simultané et identique des deuxième
30 et troisième miroirs mi_2 et mi_3 . Alternativement, le moyen de contrôle Pz peut comporter une platine piézoélectrique pour chacun des deuxième et troisième miroirs mi_2 et mi_3 . En sortie du troisième miroir mi_3 , le deuxième sous-faisceau

F2 est dirigé vers le quatrième miroir mi4. Le quatrième miroir mi4 permet de diriger le deuxième sous-faisceau F2 vers l'optique recombinaison Or. Grâce à l'ensemble qui vient d'être décrit des premier, deuxième, troisième et quatrième miroirs mi1 à mi4 et du moyen de contrôle Pz, le délai temporel τ entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar peut avantageusement être contrôlé précisément tout en conservant l'alignement du montage optique. En effet, la translation selon l'axe z des deuxième et troisième miroirs mi2 et mi3, contrôlée par le moyen de contrôle Pz, ne nécessite aucun réaligement des premier et quatrième miroirs mi1 et mi4 ni de tout autre élément optique.

10

Une quatrième variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite. Ladite quatrième variante permet avantageusement d'identifier d'éventuels points (x,y) du faisceau à caractériser Fcar dans le premier plan z1 de mesure pour lesquels les spectres du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref ne se recouvrent pas, ou se recouvrent seulement partiellement. En effet, pour de tels points (x,y), il ne se produit aucune interférence entre le faisceau à caractériser Fcar et le faisceau de référence Fref, et le procédé 10 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le premier mode de réalisation de l'invention rencontre une limite. Ces cas, rares, peuvent néanmoins se produire pour certains types de couplages spatio-temporels, par exemple si le faisceau à caractériser Fcar présente du « chirp » spatial, ou dérive de fréquence spatiale, dans le premier plan z1 de mesure, c'est-à-dire si l'amplitude spectrale du faisceau à caractériser Fcar varie spatialement. Il est à noter que ladite quatrième variante peut être combinée avec la première variante et/ou avec la deuxième variante et/ou avec la troisième variante précédemment décrites, ou mise en œuvre indépendamment desdites première, deuxième et troisième variantes

15

20

25

30

On propose ainsi, dans la quatrième variante du premier mode de réalisation de l'invention, d'utiliser une première optique O1 plane et une deuxième optique O2 plane. Le faisceau de référence Fref est alors identique au faisceau à caractériser Fcar, donc le montage optique obtenu permet de faire interférer chaque point du faisceau à caractériser avec lui-même. Il est alors possible de réaliser une

spectroscopie de Fourier résolue spatialement. La transformée de Fourier de l'interférogramme temporel mesuré en chaque point du faisceau à caractériser F_{car} permet d'accéder à l'intensité spectrale du faisceau à caractériser en chacun de ses points. D'éventuels problèmes de chirp spatial en certains points du faisceau peuvent alors être détectés, permettant ainsi d'identifier des éventuelles limitations de la reconstruction du faisceau à caractériser F_{car} , réalisée par le procédé 10 selon le premier mode de réalisation de l'invention.

Une cinquième variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite, qui permet avantageusement d'éliminer, au moins partiellement, les éventuels points (x,y) du faisceau à caractériser F_{car} dans le premier plan z_1 de mesure pour lesquels les spectres du faisceau à caractériser F_{car} et du faisceau de référence F_{ref} ne se recouvrent pas, ou se recouvrent seulement partiellement. Il est à noter que ladite cinquième variante peut être combinée avec une ou plusieurs des première, deuxième, troisième et quatrième variantes précédemment décrites, ou mise en œuvre indépendamment desdites première, deuxième, troisième et quatrième variantes.

On propose ainsi, dans la cinquième variante du premier mode de réalisation de l'invention, d'ajouter une étape de filtrage du premier sous-faisceau F_1 , afin d'augmenter la qualité dudit premier sous-faisceau F_1 . Ladite étape de filtrage peut typiquement consister en l'introduction d'un élément optique non-linéaire sur le chemin optique du premier sous-faisceau F_1 . La figure 10 illustre schématiquement le montage optique précédemment décrit en lien avec les figures 2a, 2b et 2c, et dans lequel un élément optique non-linéaire FRNL est agencé sur le chemin optique du premier sous-faisceau F_1 . Ledit élément optique non-linéaire est choisi afin de permettre la génération, en sortie de l'élément optique non-linéaire, d'un premier sous-faisceau filtré contenant toutes les composantes spectrales du premier sous-faisceau initial, de façon à pouvoir interférer de manière optimale avec le faisceau à caractériser F_{car} . D'une manière générale, il s'agit que le spectre du premier sous-faisceau filtré comprenne le spectre du premier sous-faisceau non-filtré. Une telle étape de filtrage s'appuie

typiquement sur un processus non-linéaire du troisième ordre, dit « XPW ». Du fait de sa non-linéarité d'ordre 3, le processus XPW élargit fortement le spectre du faisceau de référence Fref incident. On contribue ainsi à limiter significativement les éventuels problèmes de recouvrement spectraux entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar. En outre, il a été démontré que le processus XPW agit comme un filtre temporel, si bien que lorsque le faisceau de référence incident n'est pas trop loin de sa limite de Fourier, le faisceau de référence filtré en sortie de l'élément optique non-linéaire peut être considéré comme limité par Transformée de Fourier. Autrement dit, si la phase spatio-spectrale du faisceau de référence incident est relativement plate et qu'on étend ledit faisceau de référence par le processus XPW, alors on peut considérer que le faisceau de référence filtré présente également une phase spatio-spectrale plate. Ceci permettrait donc potentiellement de s'affranchir de l'étape de mesure de la phase spatio-spectrale de la référence.

15

Une sixième variante du premier mode de réalisation de l'invention est à présent décrite, qui permet avantageusement de prendre en compte d'éventuels couplages spatio-temporels résiduels sur le faisceau de référence Fref. Il est à noter que ladite sixième variante peut être combinée avec une ou plusieurs des première, deuxième, troisième, quatrième et cinquième variantes précédemment décrites, ou mise en œuvre indépendamment desdites première, deuxième, troisième, quatrième et cinquième variantes.

20

Dans le premier mode de réalisation de l'invention, supposition est faite que le champ électromagnétique du premier sous-faisceau F1 en amont de la surface de la première optique O1 est uniforme. La première optique O1 a cependant une surface finie, et son diamètre ne peut pas être choisi trop petit, sans quoi le rapport de signal entre le faisceau de référence en aval de la première optique O1 et le faisceau à caractériser sera trop différent de 1 pour observer un motif d'interférence bidimensionnel avec un bon contraste. Dans ces conditions, les couplages spatio-temporels du premier sous-faisceau F1 en amont de la première optique O1 ne sont pas systématiquement suffisamment faibles pour que l'on puisse considérer que le champ électromagnétique dudit premier sous-faisceau

30

F1 est homogène sur l'ensemble de la surface de la première optique O1. Cette approximation peut donc induire des erreurs sur le champ électromagnétique du faisceau à caractériser Fcar finalement reconstruit.

5 On propose ainsi, dans la sixième variante du premier mode de réalisation de l'invention, d'utiliser l'algorithme itératif suivant :

i. on suppose que le champ électromagnétique du premier sous-faisceau F1 est effectivement homogène sur la première optique O1, et on en déduit le champ électromagnétique du faisceau de référence Fref dans le plan de
10 mesure z1, comme décrit précédemment ;

ii. connaissant ledit champ du faisceau de référence Fref dans le plan de mesure z1 et en utilisant les interférogrammes temporels S1 mesurés grâce au procédé 10 selon le premier mode de réalisation de l'invention, on déduit une reconstruction du champ du premier sous-faisceau F1 en espace et en
15 temps, ou en espace et en fréquence ;

iii. cette reconstruction du champ du premier sous-faisceau F1 comprend la partie du champ du premier sous-faisceau F1 qui se réfléchit sur la première optique O1 pour produire le champ du faisceau de référence Fref dans le plan de mesure z1, et qui n'est pas nécessairement homogène
20 spatialement à cette échelle. On utilise cette reconstruction pour déterminer un nouveau champ du faisceau de référence dans le plan de mesure z1, qui cette fois n'est plus basé sur l'hypothèse que le champ du premier sous-faisceau F1 est homogène sur l'ensemble de la surface de la première optique O1.

25

On réinjecte alors ce nouveau champ du faisceau de référence Fref à l'étape ii, et on répète de façon itérative les étapes ii et iii, jusqu'à converger vers une solution auto-consistante telle que :

- le champ électromagnétique du faisceau à caractériser Fcar est reconstruit, et
30

- le champ électromagnétique du faisceau de référence dans le premier plan z1 de mesure est le résultat de l'expansion de ce champ,

potentiellement inhomogène même sur une surface restreinte, par la première optique O1.

Le type d'algorithme itératif qui vient d'être exposé est plus particulièrement décrit dans l'article de T. Oksenhendler et al, « Self-referenced spectral interferometry »,
5 Applied Physics B (99), 7-12.

Le deuxième mode de réalisation de l'invention, dit « mode mono-coup » est à présent décrit.

La figure 11a illustre un procédé 20 de caractérisation d'un faisceau de lumière
10 selon un deuxième mode de réalisation de l'invention, utilisant un troisième dispositif 3 de caractérisation d'un faisceau de lumière.

Le troisième dispositif 3 comporte un système de mesure SM3 d'un deuxième type, comprenant :

- un spectromètre SP ayant une fente d'entrée Fe ;
- 15 - le capteur CCD d'une caméra tel que précédemment décrit pour les premier et deuxième systèmes de mesure SM1 et SM2.

La figure 11b montre une vue partielle en perspective du troisième dispositif 3 de caractérisation d'un faisceau de lumière. La figure 11b montre ainsi le
20 spectromètre SP ayant sa fente d'entrée Fe orientée suivant la direction x.

La figure 11c montre un exemple de spectre fréquentiel Spe d'un motif d'interférence bidimensionnel M1 pour un délai temporel τ donné, mesuré expérimentalement par le spectromètre SP lors d'une étape du procédé 20 de
25 caractérisation d'un faisceau de lumière selon le deuxième mode de réalisation de l'invention. Le spectre fréquentiel Spe de la figure 11c comporte ainsi une information fréquentielle pour la direction x dans laquelle le motif d'interférence bidimensionnel M1 a été capté par la fente Fe du spectromètre SP.

30 La figure 12a illustre une configuration alternative du procédé 20 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le deuxième mode de réalisation de l'invention, utilisant un quatrième dispositif 4 de caractérisation d'un faisceau de

lumière.

Le quatrième dispositif 4 comporte un système de mesure SM4 d'un deuxième type, comprenant :

- le spectromètre SP présentant la fente d'entrée Fe ;
- 5 - le capteur CCD d'une caméra tel que précédemment décrit pour les premier et deuxième systèmes de mesure SM1 et SM2 ;
- une pluralité de fibres optiques fo_1, fo_2, ..., fo_n. Ladite pluralité de fibres optiques comporte au moins deux fibres optiques. Le nombre de fibres optiques de la pluralité de fibres optiques est inférieur ou égal au nombre de pixels verticaux du capteur CCD. Ce nombre de pixels
- 10 verticaux peut être supérieur à 500. Préférentiellement, ladite pluralité de fibres optiques comporte un nombre de fibres optiques compris entre 4 et 100.

Les extrémités d'entrée de la pluralité de fibres optiques fo_1, fo_2, ..., fo_n sont agencées dans le premier plan z1, préférentiellement en une matrice bidimensionnelle, c'est-à-dire comportant au moins deux lignes et deux colonnes, ou alternativement en une matrice-ligne – comportant une seule ligne et plusieurs colonnes, ou en une matrice-colonne – comportant une seule colonne et plusieurs lignes. Lorsque la matrice est bidimensionnelle, le signal du motif d'interférence

20 bidimensionnel M1 peut avantageusement être échantillonné suivant deux dimensions spatiales dans le premier plan z1.

Dans l'exemple de la figure 12b, la matrice bidimensionnelle présente un nombre L>1 de lignes et un nombre C>1 de colonnes, chaque ligne s'étendant

25 parallèlement à l'axe y et chaque colonne s'étendant parallèlement à l'axe x, les axes x et y étant orthogonaux. Plus généralement, chaque ligne pourra s'étendre parallèlement à un premier axe et chaque colonne pourra s'étendre parallèlement à un deuxième axe distinct du premier axe, les premier et deuxième axes formant entre eux un angle non nul et non plat. La matrice bidimensionnelle est

30 préférentiellement carrée, c'est-à-dire avec autant de lignes que de colonnes, ou alternativement rectangle, c'est-à-dire avec un nombre L de lignes différent du nombre C de colonnes.

Les extrémités de sortie de la pluralité de fibres optiques fo_1, fo_2, ..., fo_n sont alors agencées sur la fente d'entrée Fe du spectromètre SP, en prenant avantageusement soin de séparer spatialement les signaux issus de chacune des fibres optiques.

5

La figure 12b montre une vue partielle en perspective du quatrième dispositif 4 de caractérisation d'un faisceau de lumière. La figure 12b montre ainsi le premier plan z1 dans lequel les extrémités de sortie de la pluralité de fibres optiques fo_1, fo_2, ..., fo_n sont agencées en une matrice bidimensionnelle, et la fente d'entrée
10 Fe du spectromètre SP sur laquelle les extrémités de sortie de ladite pluralité de fibres optiques sont alignées.

La deuxième variante du procédé 10 selon le premier mode de réalisation, précédemment décrite en lien avec la figure 9, et qui permet avantageusement
15 d'obtenir une caractérisation absolue du faisceau à caractériser Fcar indépendamment du faisceau de référence Fref est également compatible avec le procédé 20 selon le deuxième mode de réalisation de l'invention. Dans cette deuxième variante, le procédé 20 de caractérisation d'un faisceau de lumière selon le deuxième mode de l'invention comporte ainsi :

- 20
- l'étape i), illustrée à la figure 9, de mesure de la phase spatio-spectrale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ du premier sous-faisceau F1, et
 - l'étape de mesure de l'amplitude spectrale $A_{\text{ref}}(\omega)$ du premier sous-faisceau F1.

25 La troisième variante du procédé 10 selon le premier mode de réalisation, qui a précédemment été décrite et qui permet avantageusement de prendre en compte la courbure du front d'onde du faisceau de référence Fref introduite par la première optique O1, est également compatible avec le procédé 20 selon le
30 deuxième mode de réalisation de l'invention. La troisième variante peut alors naturellement être combinée avec la deuxième variante, ou mise en œuvre indépendamment de ladite deuxième variante.

Dans la troisième variante du procédé 20 de caractérisation d'un faisceau de

- lumière selon le deuxième mode de l'invention, on réalise ainsi, après la réflexion du premier sous-faisceau F1 sur la première optique O1 et avant la recombinaison du faisceau de référence Fref avec le faisceau à caractériser Fcar, la mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$. Ladite
- 5 phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ est caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence Fref introduite par la première optique O1.
- L'alternative à la troisième variante, qui a précédemment été décrite, est également compatible du deuxième mode de réalisation de l'invention.
- 10 La quatrième variante du procédé 10 selon le premier mode de réalisation, qui a précédemment été décrite et qui permet avantageusement d'identifier d'éventuels points (x,y) du faisceau à caractériser Fcar dans le premier plan z1 de mesure pour lesquels les spectres du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de
- 15 référence Fref ne se recouvrent pas, ou se recouvrent seulement partiellement, est également compatible avec le deuxième mode de réalisation de l'invention. La quatrième variante peut alors naturellement être combinée avec la deuxième variante et/ou avec la troisième variante, ou mise en œuvre indépendamment desdites deuxième et troisième variantes.
- 20 La cinquième variante du procédé 10 selon le premier mode de réalisation de l'invention, qui a précédemment été décrite en lien avec la figure 10 et qui permet avantageusement d'éliminer, au moins partiellement, lesdits éventuels points (x,y) du faisceau à caractériser Fcar dans le premier plan z1 de mesure pour lesquels
- 25 les spectres du faisceau à caractériser Fcar et du faisceau de référence Fref ne se recouvrent pas, ou se recouvrent seulement partiellement, est également compatible avec le procédé 20 selon le deuxième mode de réalisation de l'invention. Il est à noter que ladite cinquième variante peut alors naturellement être combinée avec une ou plusieurs des deuxième, troisième et quatrième
- 30 deuxième, troisième et quatrième variantes.

La sixième variante du procédé 10 selon le premier mode de réalisation de l'invention est également compatible avec le procédé 20 selon le deuxième mode de réalisation. L'algorithme itératif selon la sixième variante, appliqué au procédé 20 selon le deuxième mode de réalisation, est le suivant :

- 5 i. on suppose que le champ électromagnétique du premier sous-faisceau F1 est effectivement homogène sur la première optique O1, et on en déduit le champ électromagnétique du faisceau de référence Fref dans le plan de mesure z1, comme décrit précédemment ;
- 10 ii. connaissant ledit champ du faisceau de référence Fref dans le plan de mesure z1 et en utilisant au moins un interférogramme fréquentiel mesuré grâce au procédé 20 selon le deuxième mode de réalisation de l'invention, on déduit une reconstruction du champ du premier sous-faisceau F1 en espace et en temps, ou en espace et en fréquence ;
- 15 iii. cette reconstruction du champ du premier sous-faisceau F1 comprend la partie du champ du premier sous-faisceau F1 qui se réfléchit sur la première optique O1 pour produire le champ du faisceau de référence Fref dans le plan de mesure z1, et qui n'est pas nécessairement homogène spatialement à cette échelle. On utilise cette reconstruction pour déterminer un nouveau champ du faisceau de référence dans le plan de mesure z1, qui cette fois n'est plus basé sur l'hypothèse que le champ du premier sous-faisceau F1 est homogène sur l'ensemble de la surface de la première optique O1.
- 20

Dans la présente description, on entend par « interférogramme fréquentiel »
25 l'ensemble des motifs d'interférence spatiaux mesurés en fonction de la fréquence ω , pour un délai temporel τ_0 fixé entre le faisceau de référence Fref et le faisceau à caractériser Fcar. Les motifs d'interférence spatiaux mesurés peuvent être unidimensionnels ou bidimensionnels.

- 30 - Si les motifs d'interférence spatiaux mesurés sont unidimensionnels, l'interférogramme fréquentiel comporte une information selon une dimension spatiale et selon une dimension fréquentielle, donc une information bidimensionnelle.

- Si les motifs d'interférence spatiaux mesurés sont bidimensionnels, l'interférogramme fréquentiel comporte une information selon deux dimensions spatiales et selon une dimension fréquentielle, donc une information tridimensionnelle.

5 Un interférogramme fréquentiel bidimensionnel peut être obtenu en un seul tir laser, en tirant parti de la résolution spatiale le long de la fente d'entrée d'un spectromètre imageur. L'obtention d'un interférogramme fréquentiel tridimensionnel nécessite en revanche de balayer le faisceau laser sur la fente d'entrée du spectromètre, selon l'une de ses deux dimensions spatiales.

10

On réinjecte alors ce nouveau champ du faisceau de référence F_{ref} à l'étape ii, et on répète de façon itérative les étapes ii et iii, jusqu'à converger vers une solution auto-consistante telle que :

- le champ électromagnétique du faisceau à caractériser F_{car} est reconstruit, et
- le champ électromagnétique du faisceau de référence dans le premier plan z_1 de mesure est le résultat de l'expansion de ce champ, potentiellement inhomogène même sur une surface restreinte, par la première optique O_1 .

20

REVENDICATIONS

1. Procédé (20) de caractérisation d'un faisceau de lumière (FL) comprenant les étapes suivantes :
 - 5 - séparation au moyen d'une optique séparatrice (Os, SR) du faisceau de lumière (FL) en un premier sous-faisceau (F1) et un deuxième sous-faisceau (F2), le premier sous-faisceau empruntant un premier chemin optique (C1) et le deuxième sous-faisceau empruntant un deuxième chemin optique (C2) ;
 - 10 - propagation du premier sous-faisceau (F1) sur une première optique (O1) et du deuxième sous-faisceau (F2) sur une deuxième optique (O2), le premier sous-faisceau (F1) ayant un champ électromagnétique inhomogène sur l'ensemble de la surface de la première optique (O1), lesdites première et deuxième optiques (O1, O2) étant, grâce à un moyen
15 de contrôle (Pz), respectivement agencées sur les premier et deuxième chemins optiques (C1, C2) de sorte que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence (Fref) », et le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser (Fcar) », présentent entre eux un délai temporel τ ;
 - 20 - recombinaison au moyen d'une optique recombinaison (Or, SR) du faisceau de référence (Fref) et du faisceau à caractériser (Fcar) de telle manière qu'ils interfèrent spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel (M1), le motif d'interférence bidimensionnel (M1) s'étendant suivant un premier plan (z1) ;
 - 25 - mesure au moyen d'un système de mesure (SM3, SM4) du spectre fréquentiel (Spe) d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel (M1), le système de mesure (SM3, SM4) comportant un spectromètre (SP) présentant une fente d'entrée (Fe) s'étendant suivant une première direction spatiale (x) du premier plan (z1) ;
 - 30 - calcul de la transformée de Fourier dans le domaine temporel (TFT) d'au moins un point spatial du spectre fréquentiel (Spe), ladite transformée de Fourier dans le domaine temporel (TFT) présentant un pic temporel central

- (tc) et des premier et deuxième pics temporels latéraux (tl1, tl2) ;
- calcul au moyen d'un ordinateur (K) de la transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel (TFT') pour l'un desdits premier et deuxième pics temporels latéraux (tl1, tl2) ;
- 5
- calcul au moyen du ordinateur (K) de l'amplitude spectrale $A_R(\omega)$, dite « amplitude spectrale relative », et de la phase spatio-spectrale $\phi_R(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale relative », pour ladite transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel (TFT').
- 10
2. Procédé (20) selon la revendication précédente caractérisé en ce qu'il comporte :
- une étape i) selon laquelle le champ électromagnétique du faisceau de référence (Fref) dans le premier plan (z1) de mesure est calculé en supposant que le champ électromagnétique du premier sous-faisceau (F1) est homogène dans le deuxième plan (z2) de la première optique (O1) ;
- 15
- une étape ii) selon laquelle une reconstruction du champ électromagnétique du premier sous-faisceau (F1) dans le deuxième plan (z2) de la première optique (O1) est calculée, à partir du champ électromagnétique du faisceau de référence (Fref) dans le premier plan (z1) de mesure précédemment calculé et d'un interférogramme fréquentiel ;
- 20
- une étape iii) selon laquelle le champ électromagnétique du faisceau de référence (Fref) dans le premier plan (z1) de mesure est calculé en utilisant la reconstruction du champ électromagnétique du premier sous-faisceau (F1) dans le deuxième plan (z2) de la première optique (O1),
- 25
- précédemment calculé.
3. Procédé (20) selon la revendication précédente caractérisé en ce que l'étape ii) et l'étape iii) sont itérées jusqu'à ce qu'elles convergent vers une solution auto-consistante telle que :
- 30
- le champ électromagnétique du faisceau à caractériser (Fcar) est reconstruit, et
 - le champ électromagnétique du faisceau de référence (Fref) dans le premier plan (z1) de mesure est le résultat de l'expansion dudit champ

électromagnétique du faisceau de référence (Fref) par la première optique (O1).

4. Procédé (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que l'étape de mesure du spectre fréquentiel (Spe) d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel (M1) comporte les sous-étapes suivantes :
- agencer le spectromètre (SP) du système de mesure (SM3) de manière que la fente d'entrée (Fe) du spectromètre (SP) est adaptée pour recevoir ladite au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel (M1), ladite au moins une partie s'étendant selon la première dimension spatiale (x) du premier plan (z1) ;
 - mesurer, grâce au spectromètre (SP), le spectre fréquentiel (Spe) de ladite au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel (M1) s'étendant selon la première dimension spatiale (x) du premier plan (z1).
5. Procédé (20) selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'étape de mesure du spectre fréquentiel (Spe) d'au moins une partie du motif d'interférence bidimensionnel (M1) comporte les sous-étapes suivantes :
- le système de mesure (SM4) comportant une pluralité de fibres optiques (fo_1, fo_2, fo_n), agencer les extrémités d'entrée de ladite pluralité de fibres optiques (fo_1, fo_2, fo_n) dans le premier plan (z1) selon une matrice bidimensionnelle, de manière à pouvoir échantillonner le motif d'interférence bidimensionnel (M1) selon une première direction spatiale (x) du premier plan (z1) et selon une deuxième direction spatiale (y) du premier plan (z1) ;
 - agencer les extrémités de sortie de ladite pluralité de fibres optiques (fo_1, fo_2, fo_n) sur une la fente d'entrée (Fe) du spectromètre (SP) du système de mesure (SM4) ;
 - mesurer, grâce au spectromètre (SP) du système de mesure (SM3), le spectre fréquentiel (Spe) de l'échantillonnage du motif d'interférence bidimensionnel (M1) selon les première et deuxième directions spatiales (x, y) du premier plan (z1).

6. Procédé (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comporte :
- une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence (Fref) introduite par la première optique (O1),
 - puis une étape de soustraction de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0} \varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale relative corrigée du faisceau à caractériser.
7. Procédé (20) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 caractérisé en ce qu'il comporte :
- une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue du faisceau à caractériser $\varphi_{\text{abs}}(x,y,\omega)$.
8. Procédé (20) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 caractérisé en ce qu'il comporte :
- une étape de mesure de la phase spatiale à une fréquence ω_0 du faisceau de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$, ladite phase spatiale $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ étant caractéristique de la courbure du front d'onde du faisceau de référence (Fref) introduite par la première optique (O1),
 - une étape de mesure de la phase spatio-spectrale du premier sous-faisceau $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$, dite « phase spatio-spectrale de référence »,
 - puis une étape de soustraction de ladite phase spatio-spectrale de référence $\varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega)$ et de la phase spatio-spectrale $\frac{\omega}{\omega_0} \varphi_{\text{ref}}(x,y,\omega_0)$ à la phase spatio-spectrale relative $\varphi_{\text{R}}(x,y,\omega)$, pour l'obtention de la phase spatio-spectrale absolue corrigée du faisceau à caractériser.

9. Dispositif (3, 4) de caractérisation d'un faisceau de lumière (FL) pour la mise en œuvre du procédé (20) selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comporte :
- 5 - une optique séparatrice (Os, SR) pour la séparation du faisceau de lumière (FL) en un premier sous-faisceau (F1) et un deuxième sous-faisceau (F2), l'optique séparatrice (Os, SR) définissant un premier chemin optique (C1) pour le premier sous-faisceau (F1) et un deuxième chemin optique (C2) pour le deuxième sous-faisceau (F2) ;
 - 10 - une première optique (O1) agencée sur le premier chemin optique (C1), la première optique (O1) ayant un premier rayon de courbure de manière que le premier sous-faisceau en sortie de la première optique, dit « faisceau de référence (Fref) », présente des fronts d'onde d'un premier type ;
 - 15 - une deuxième optique (O2) agencée sur le deuxième chemin optique (C2), la deuxième optique (O2) ayant un deuxième rayon de courbure différent du premier rayon de courbure de manière que le deuxième sous-faisceau en sortie de la deuxième optique, dit « faisceau à caractériser (Fcar) », présente des fronts d'onde d'un deuxième type, différent du premier type ;
 - 20 - un moyen de contrôle (Pz) d'un délai temporel τ entre le faisceau de référence (Fref) et le faisceau à caractériser (Fcar) ;
 - une optique recombinaison (Or, SR) pour la recombinaison du faisceau de référence (Fref) et du faisceau à caractériser (Fcar) de telle manière qu'ils interfèrent spatialement et forment un motif d'interférence bidimensionnel (M1) ;
 - 25 - un système de mesure (SM3, SM4) permettant l'obtention, à partir au moins du motif d'interférence bidimensionnel (M1), d'une information temporelle ou d'une information fréquentielle ;
 - 30 - un calculateur (K) permettant le calcul à partir de l'information temporelle d'une transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel (TFF), ou le calcul à partir de l'information fréquentielle d'une transformée de Fourier dans le domaine temporel (TFT).

10. Dispositif (3, 4) selon la revendication précédente caractérisé en ce que l'optique séparatrice (Os) et l'optique recombinaison (Or) forment une seule et même optique (SR) assurant la séparation du faisceau de lumière (FL) d'une part, et la recombinaison du faisceau de référence (Fref) et du faisceau à caractériser (Fcar) d'autre part.

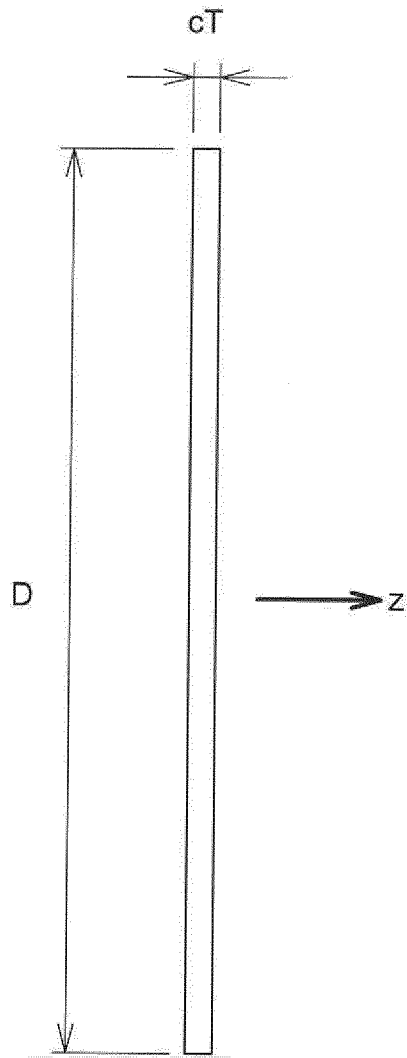


Fig. 1a

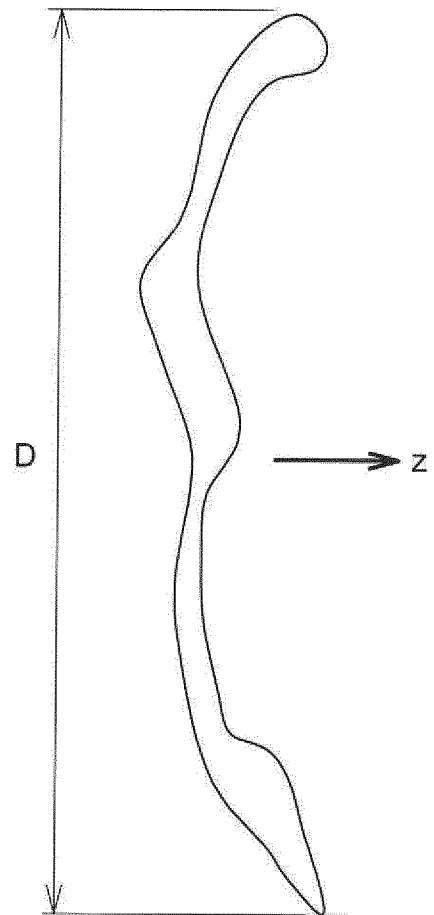


Fig. 1b

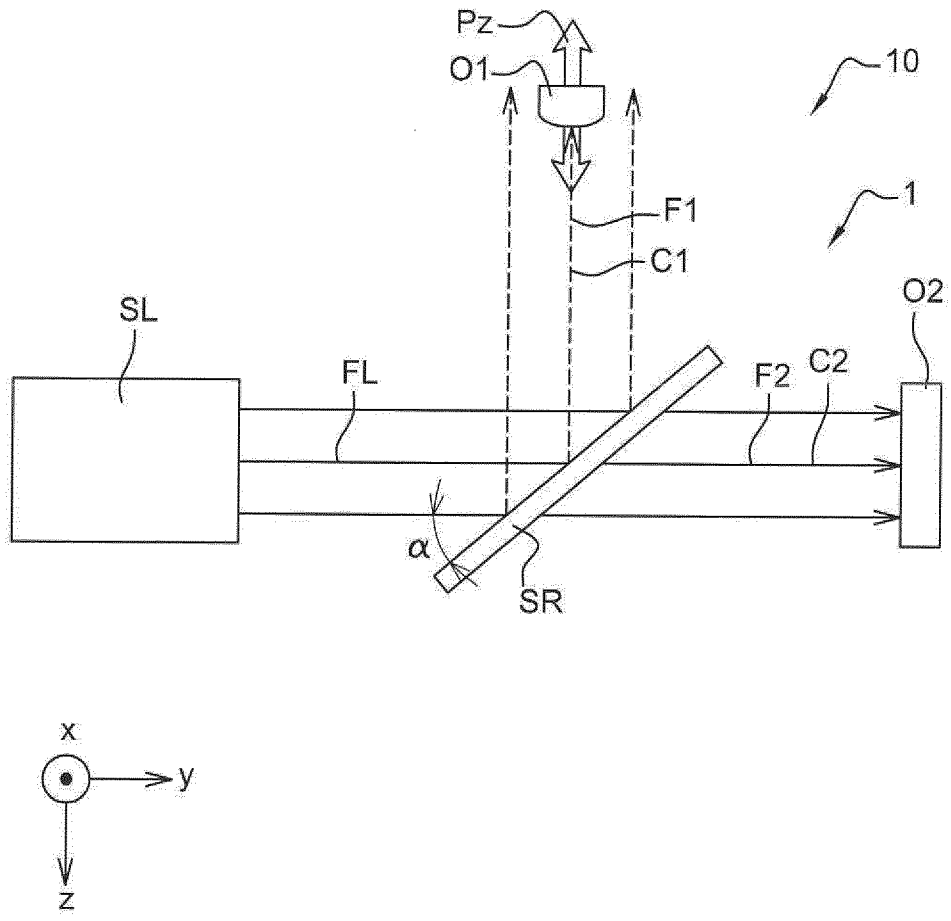
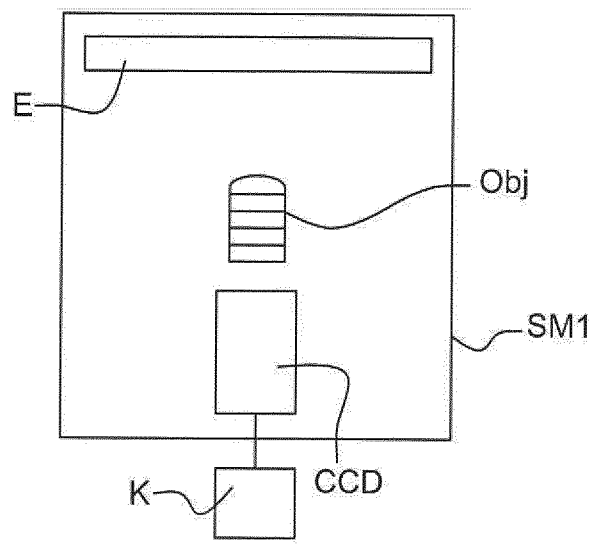


Fig. 2a



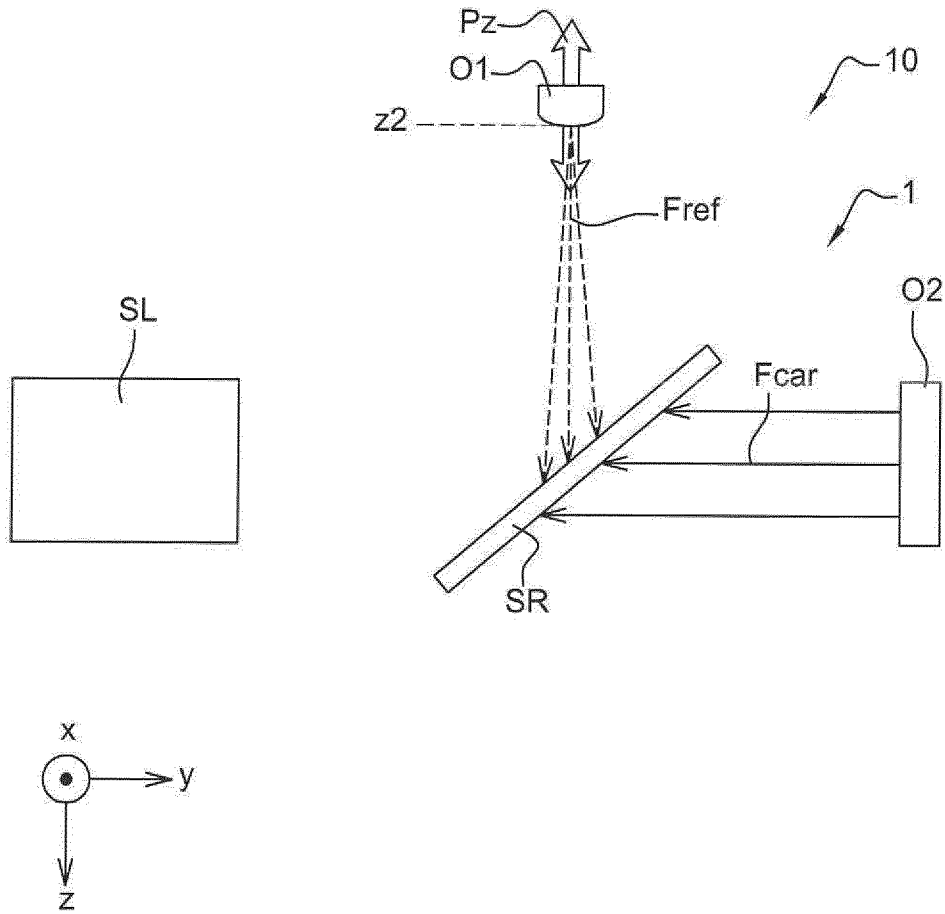
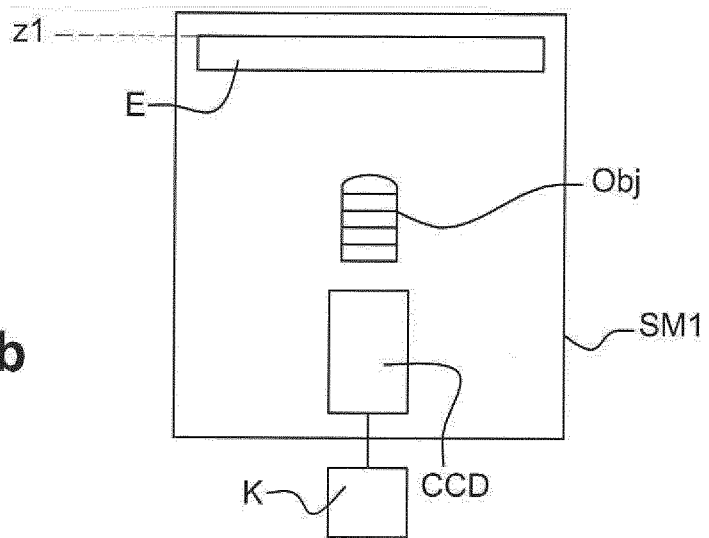


Fig. 2b



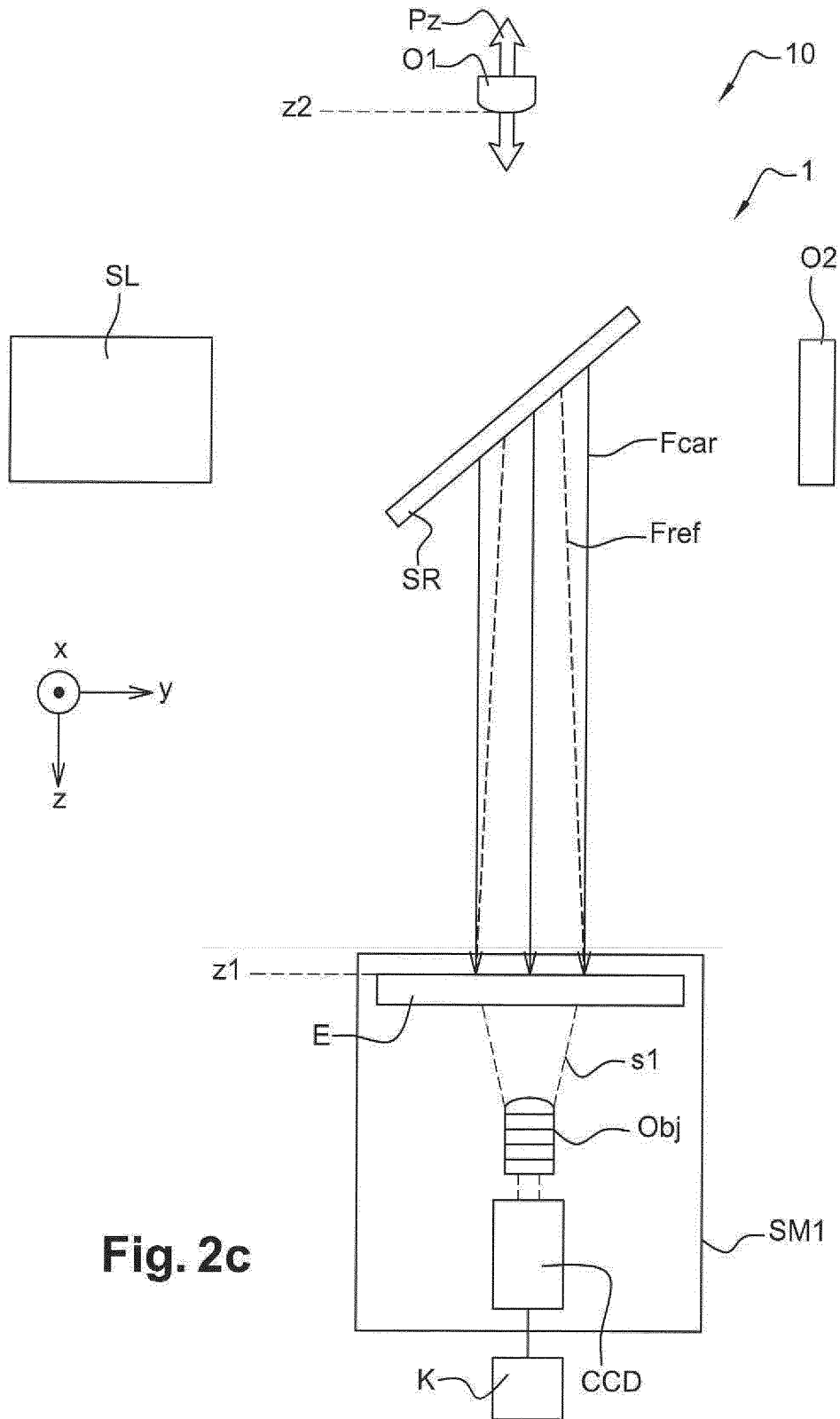


Fig. 2c

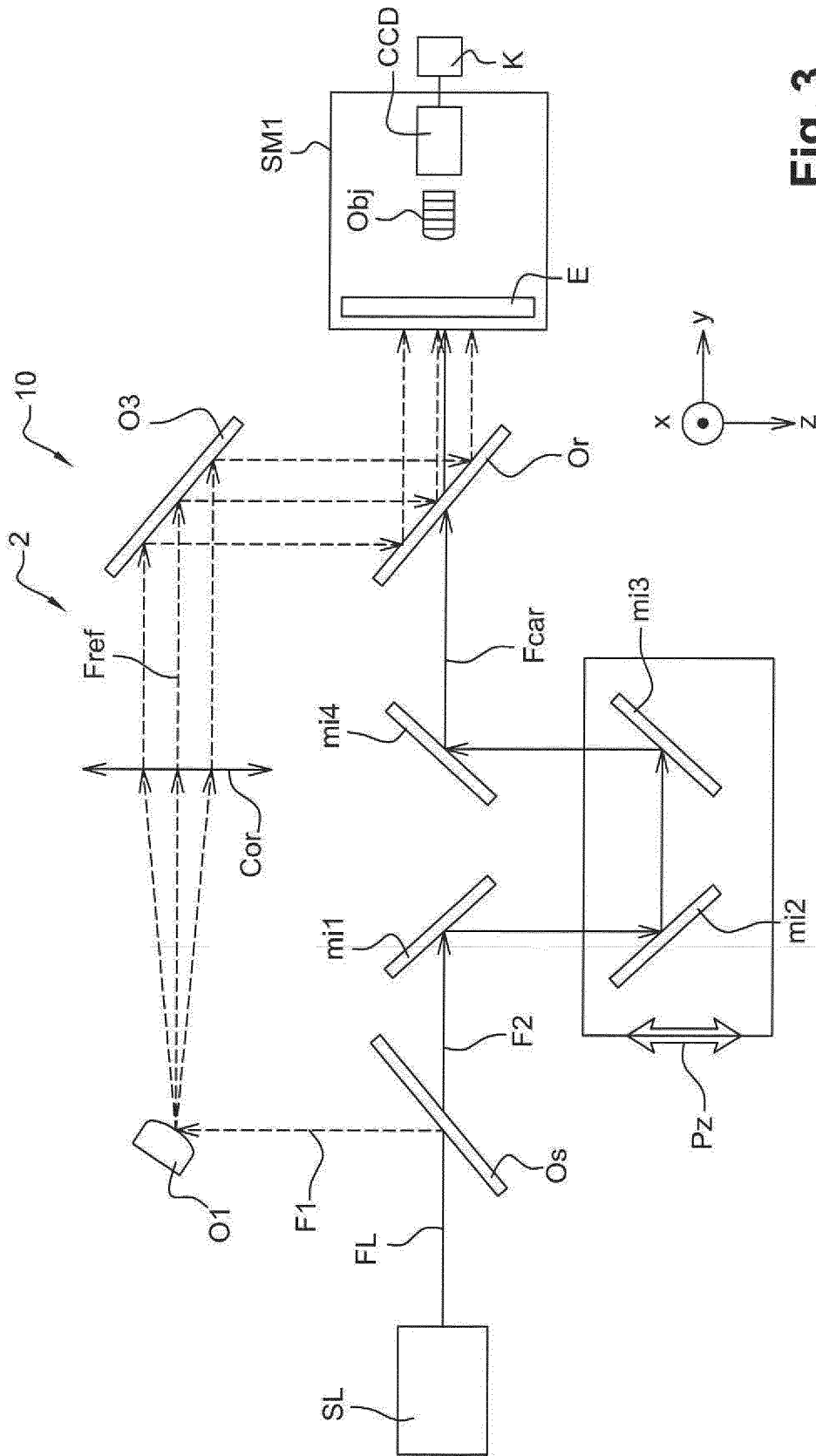


Fig. 3

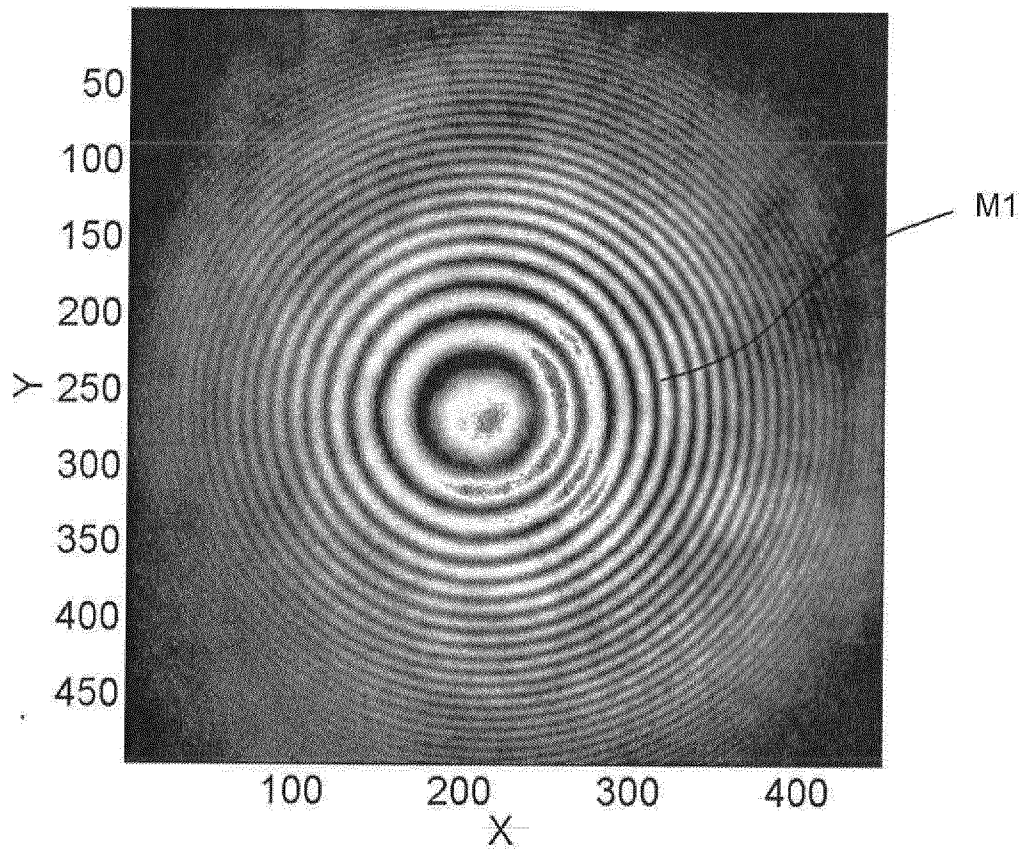


Fig. 4

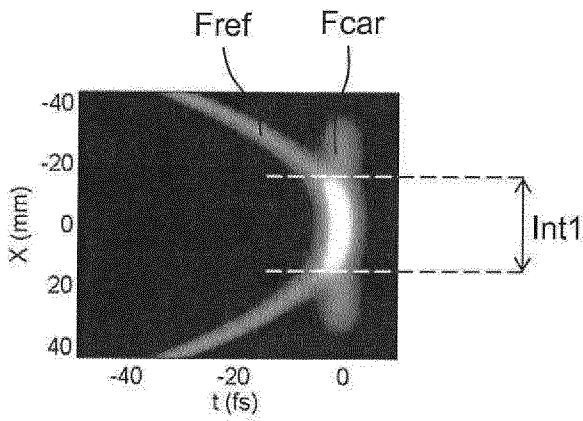


Fig. 5a

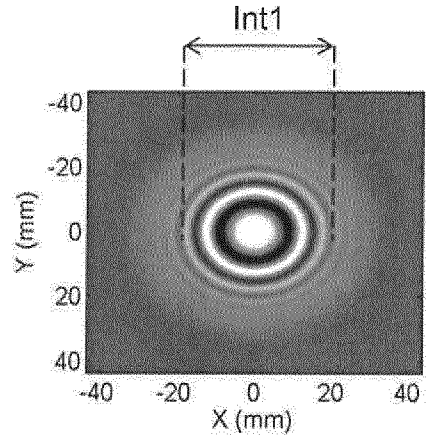


Fig. 6a

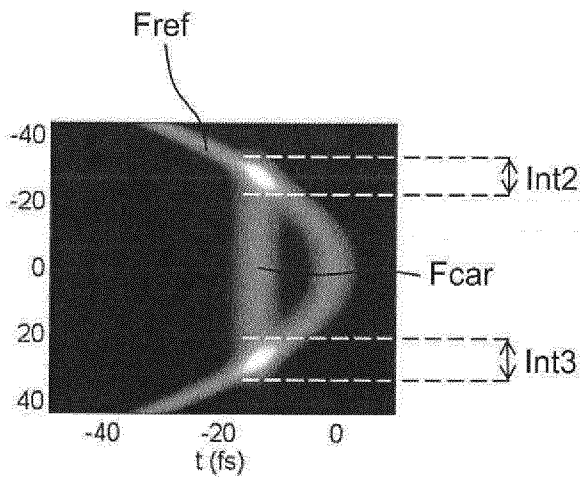


Fig. 5b

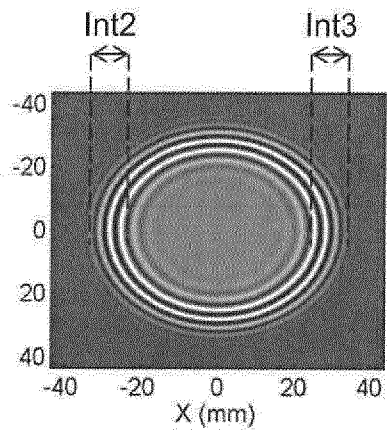


Fig. 6b

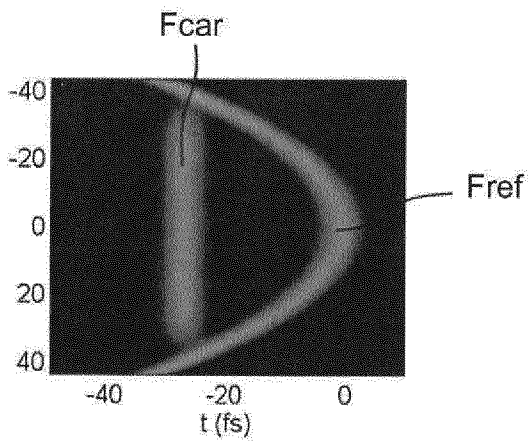


Fig. 5c

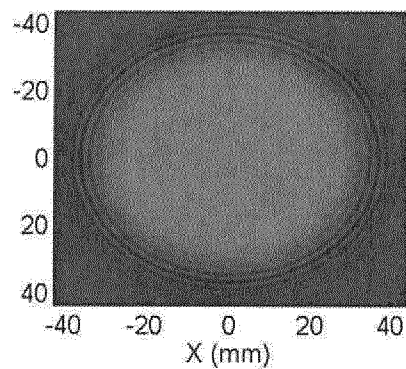


Fig. 6c

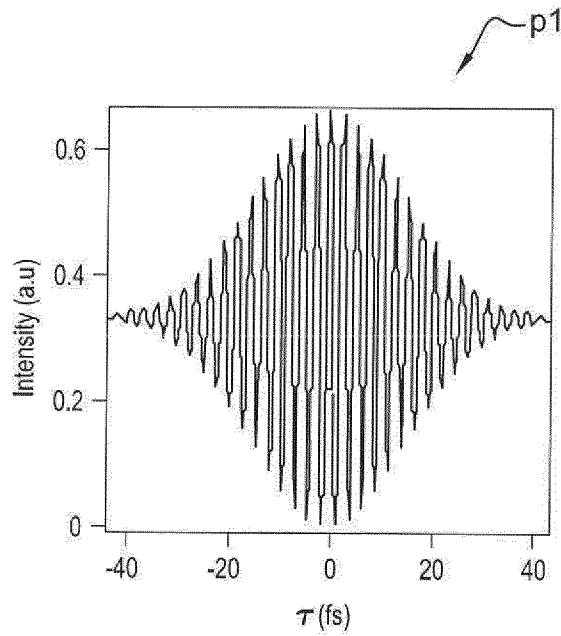


Fig. 7a

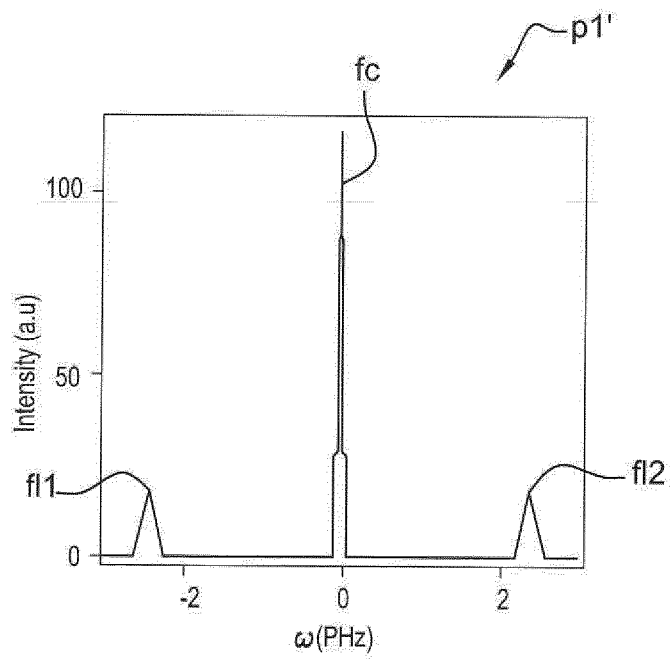


Fig. 7b

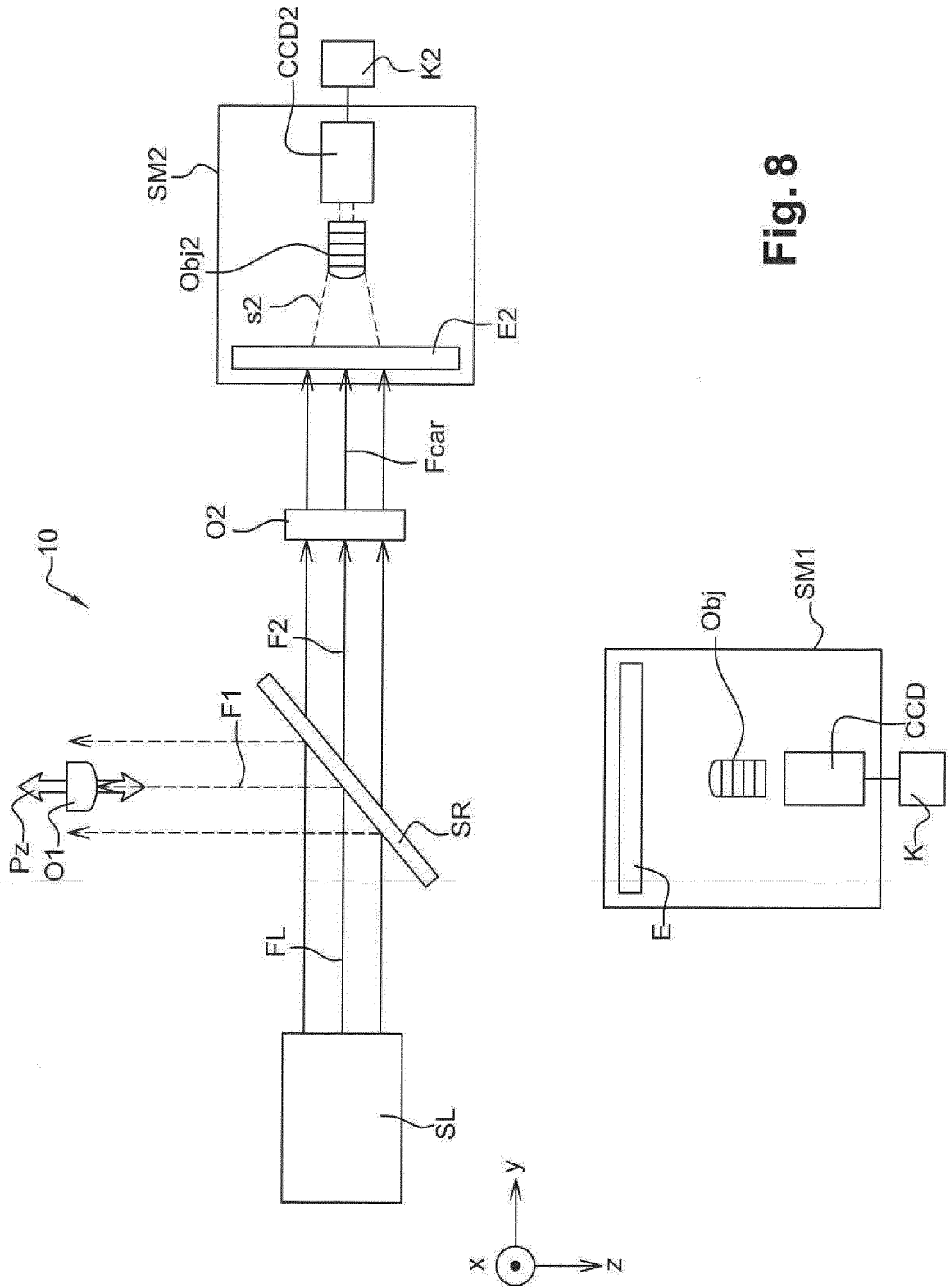


Fig. 8

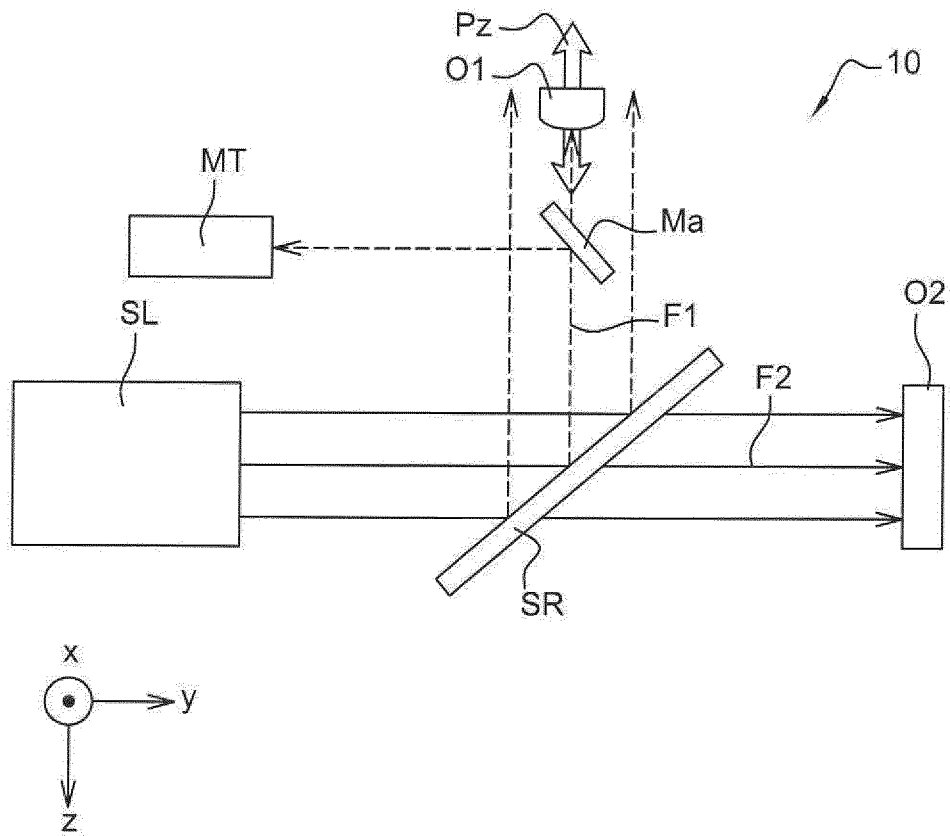
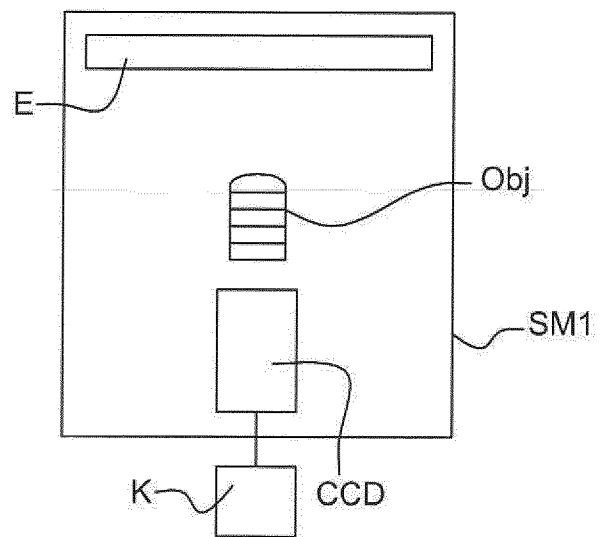


Fig. 9



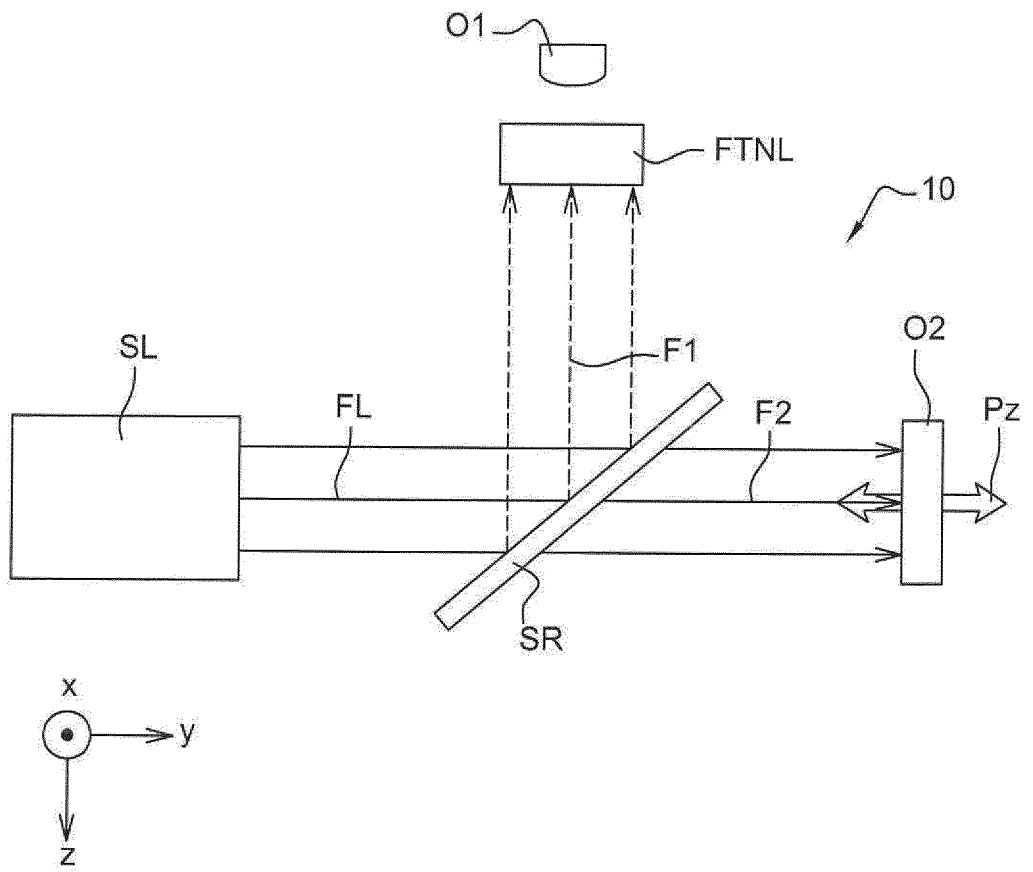
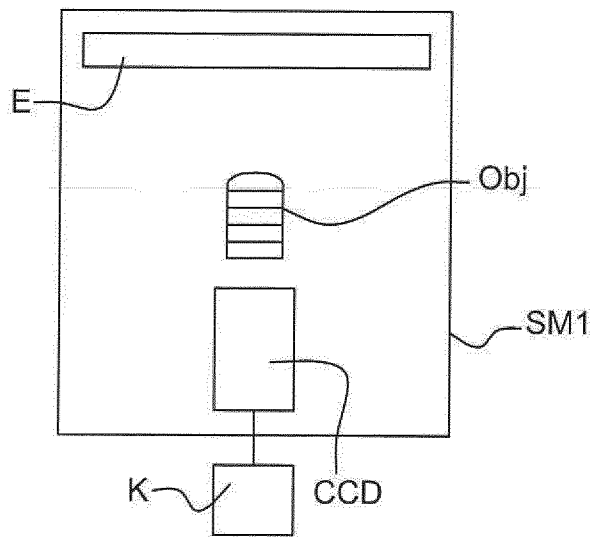


Fig. 10



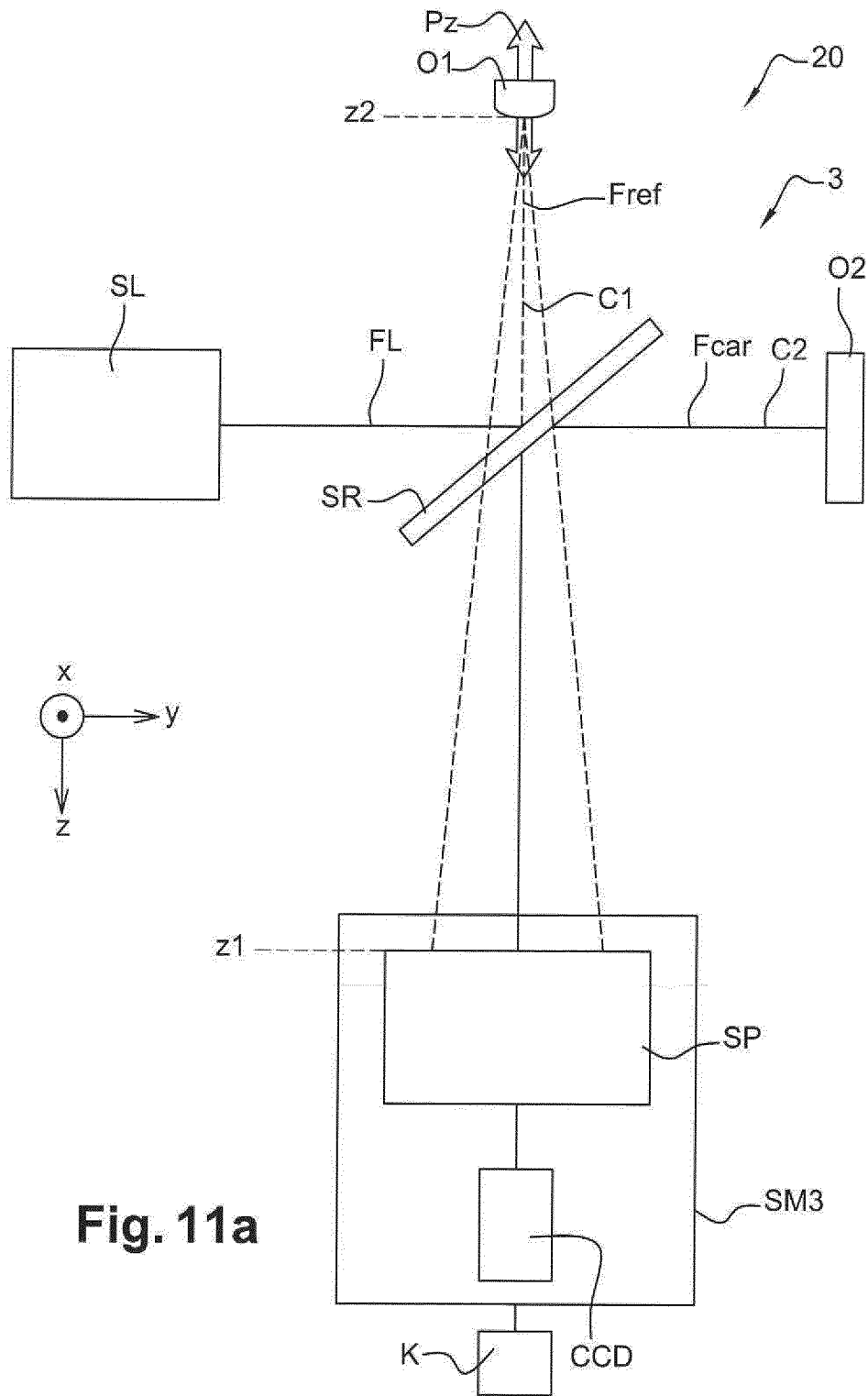


Fig. 11a

13 / 15

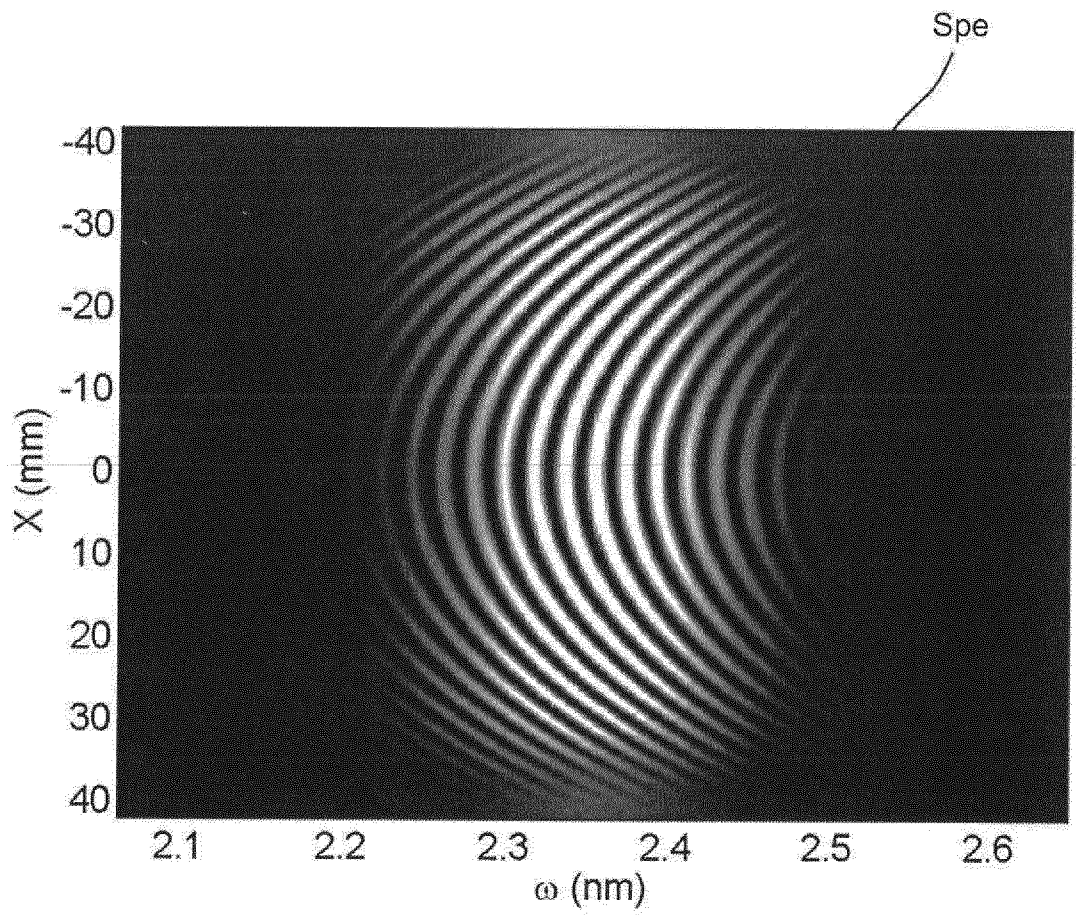
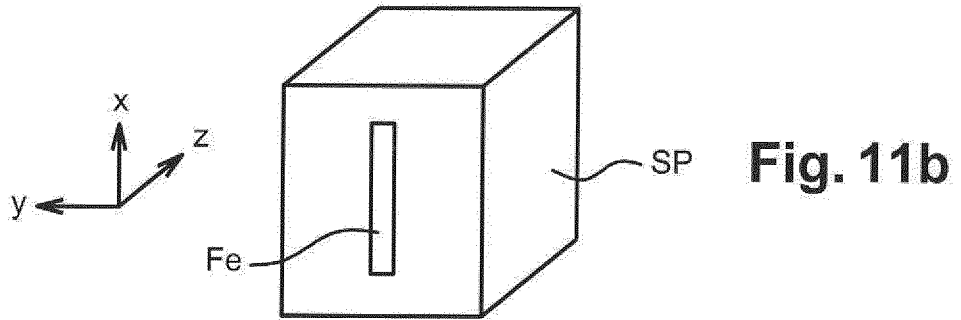


Fig. 11c

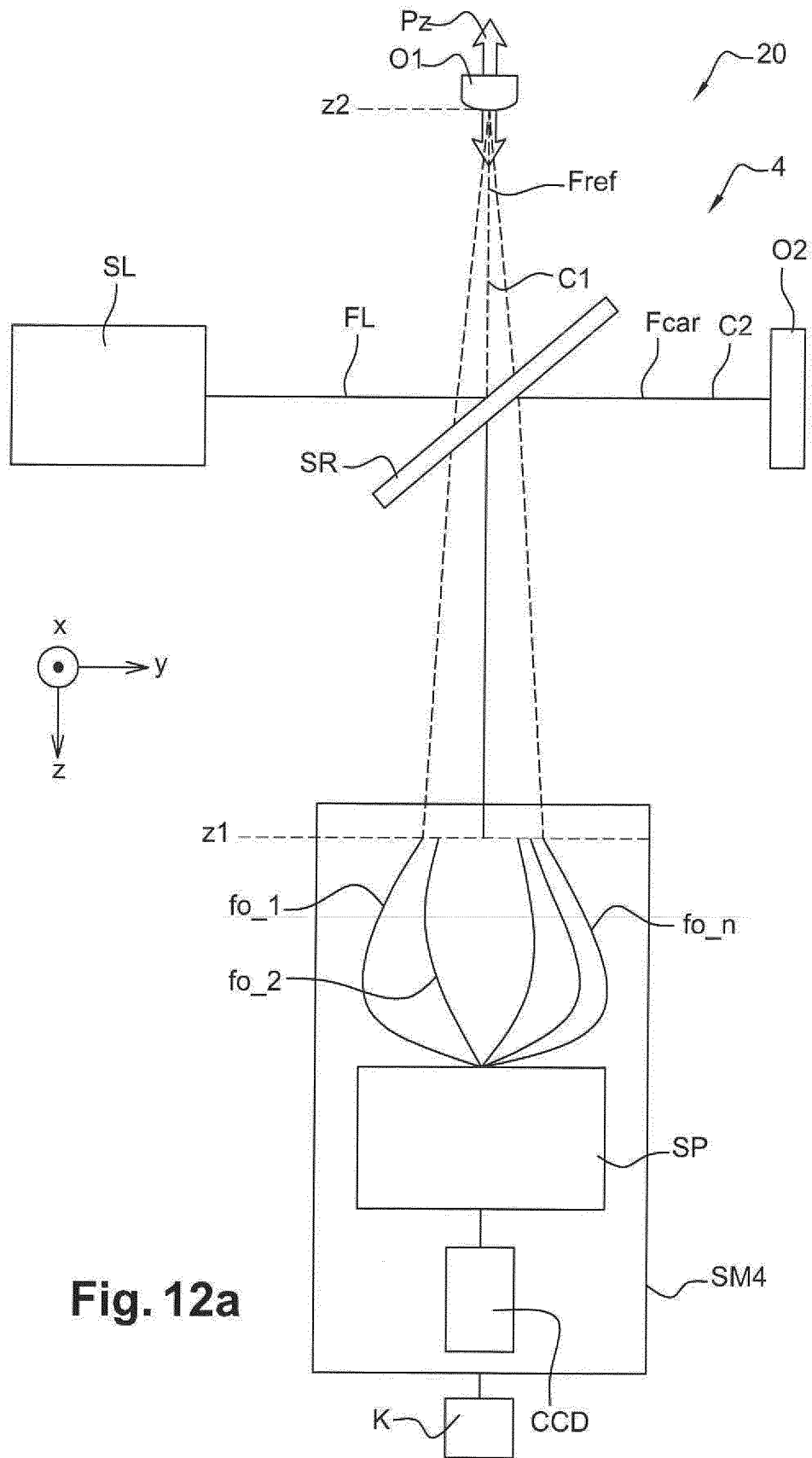


Fig. 12a

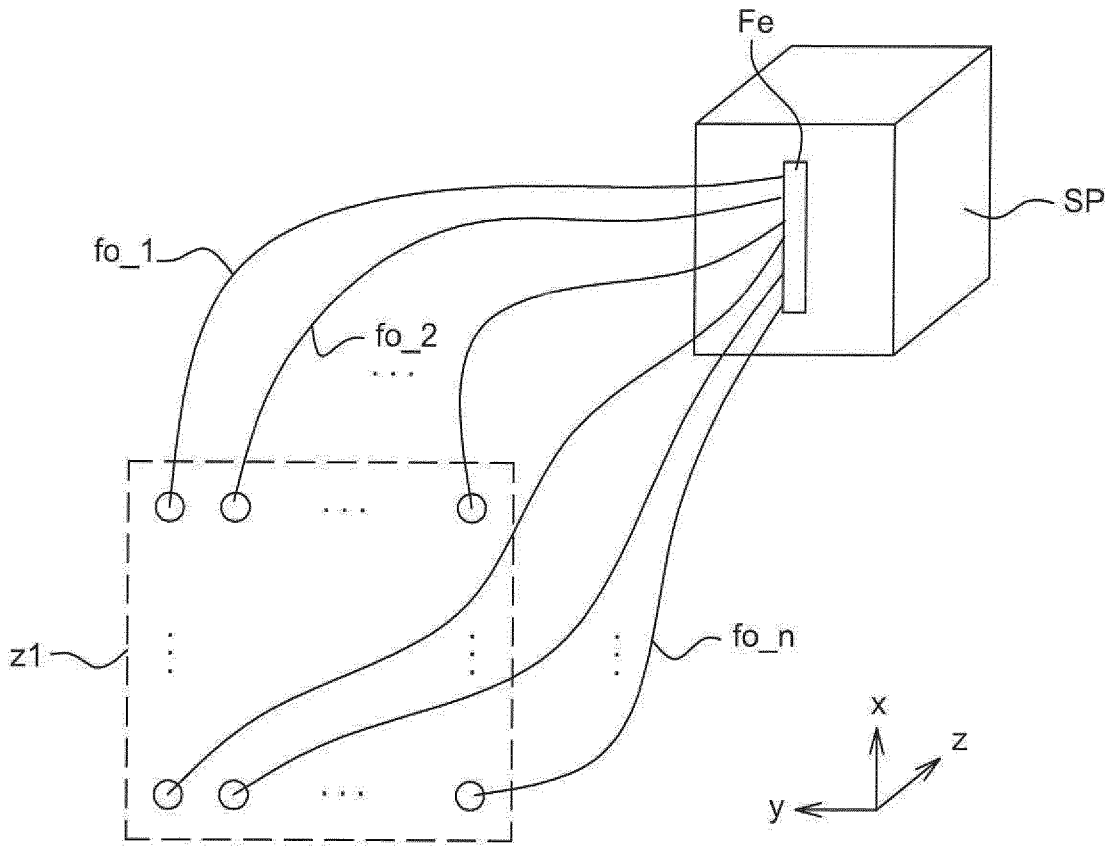


Fig. 12b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/063368

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01J9/02 G01J11/00
ADD.
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)
G01J G01B
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, WPI Data

| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
|--|--|-----------------------|
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| Y | <p>BENJAMÍN ALONSO ET AL: "Frequency resolved wavefront retrieval and dynamics of diffractive focused ultrashort pulses", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 29, no. 8, 1 August 2012 (2012-08-01), pages 1993-2000, XP007923042, ISSN: 0740-3224 [retrieved on 2012-07-17] page 1994, right-hand column, last paragraph - page 1995, left-hand column, paragraph 3; figure 1</p> <p style="text-align: center;">----- -/--</p> | 1-10 |

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

6 October 2015

Date of mailing of the international search report

15/10/2015

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Jacquin, Jérôme

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/063368

| C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
|--|---|-----------------------|
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| Y | <p>CHRISTOPHE DORRER ET AL: "Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 17, no. 10, 1 October 2000 (2000-10-01), pages 1795-1802, XP002553899, ISSN: 0740-3224, DOI: 10.1364/JOSAB.17.001795 page 1795, right-hand column, last paragraph - page 1796, column g, last paragraph</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 1-10 |
| Y | <p>OKSENHENDLER T ET AL: "Self-referenced spectral interferometry", APPLIED PHYSICS B ; LASERS AND OPTICS, SPRINGER, BERLIN, DE, vol. 99, no. 1-2, 6 February 2010 (2010-02-06), pages 7-12, XP019801509, ISSN: 1432-0649 page 10, right-hand column, last paragraph</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 2,3 |
| Y | <p>WO 2012/172463 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; QUERE FABIEN [FR]) 20 December 2012 (2012-12-20) page 14, line 3 - page 15, line 14; figure 6</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 5 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/063368

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|--|------------------|-------------------------|------------------|
| WO 2012172463 | A1 | 20-12-2012 | |
| | | EP 2721385 A1 | 23-04-2014 |
| | | FR 2976663 A1 | 21-12-2012 |
| | | US 2014098367 A1 | 10-04-2014 |
| | | WO 2012172463 A1 | 20-12-2012 |
| ----- | | | |

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2015/063368

| A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01J9/02 G01J11/00 ADD. | | |
|--|---|--|
| 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) G01J G01B | | |
| 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, WPI Data | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | |
| Catégorie* | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents | no. des revendications visées |
| Y | BENJAMÍN ALONSO ET AL: "Frequency resolved wavefront retrieval and dynamics of diffractive focused ultrashort pulses", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 29, no. 8, 1 août 2012 (2012-08-01), pages 1993-2000, XP007923042, ISSN: 0740-3224 [extrait le 2012-07-17] page 1994, colonne de droite, dernier alinéa - page 1995, colonne de gauche, alinéa 3; figure 1 ----- -/-- | 1-10 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> 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 6 octobre 2015 | | Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 15/10/2015 |
| 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 Jacquin, Jérôme |

| C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | |
|---|--|-------------------------------|
| Catégorie* | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents | no. des revendications visées |
| Y | <p>CHRISTOPHE DORRER ET AL: "Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 17, no. 10, 1 octobre 2000 (2000-10-01), pages 1795-1802, XP002553899, ISSN: 0740-3224, DOI: 10.1364/JOSAB.17.001795 page 1795, colonne de droite, dernier alinéa - page 1796, colonne g, dernier alinéa</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 1-10 |
| Y | <p>OKSENHENDLER T ET AL: "Self-referenced spectral interferometry", APPLIED PHYSICS B ; LASERS AND OPTICS, SPRINGER, BERLIN, DE, vol. 99, no. 1-2, 6 février 2010 (2010-02-06), pages 7-12, XP019801509, ISSN: 1432-0649 page 10, colonne de droite, dernier alinéa</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 2,3 |
| Y | <p>WO 2012/172463 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]; QUERE FABIEN [FR]) 20 décembre 2012 (2012-12-20) page 14, ligne 3 - page 15, ligne 14; figure 6</p> <p style="text-align: center;">-----</p> | 5 |

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2015/063368

| Document brevet cité au rapport de recherche | Date de publication | Membre(s) de la famille de brevet(s) | Date de publication |
|---|------------------------|---|------------------------|
| WO 2012172463 A1 | 20-12-2012 | EP 2721385 A1 | 23-04-2014 |
| | | FR 2976663 A1 | 21-12-2012 |
| | | US 2014098367 A1 | 10-04-2014 |
| | | WO 2012172463 A1 | 20-12-2012 |
| ----- | | | |