

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 117 206

②1 N° d'enregistrement national : 20 12605

⑤1 Int Cl⁸ : G 01 B 9/02 (2020.12), H 01 S 3/00, G 01 J 11/00

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 03.12.20.

⑫③ Priorité :

⑫④ Date de mise à la disposition du public de la demande : 10.06.22 Bulletin 22/23.

⑫⑤ Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑫⑥ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : UNIVERSITE DE BOURGOGNE organisme public — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS - organisme public — FR.

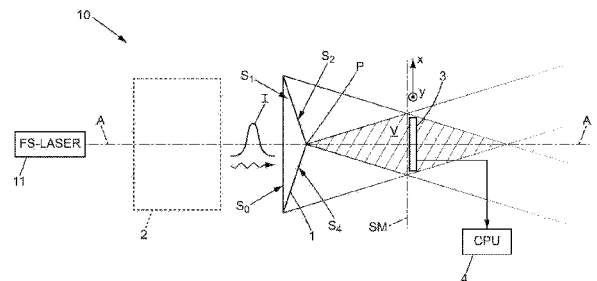
⑦② Inventeur(s) : BEJOT Pierre, BILLARD Franck et HERTZ Edouard.

⑦③ Titulaire(s) : UNIVERSITE DE BOURGOGNE organisme public, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS - organisme public.

⑦④ Mandataire(s) : Plasseraud IP.

⑤④ CARACTERISATION D'UNE IMPULSION DE RAYONNEMENT PAR FENETRAGE OPTIQUE RESOLU EN TEMPS.

⑤⑦ Un système (10) de caractérisation d'une impulsion (I) de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps, comprend un dispositif (1) de formation d'une interférence qui est adapté pour superposer quatre parties de l'impulsion. Le système comprend aussi un capteur d'images matriciel (3) qui saisit sélectivement à partir d'absorptions à deux photons, une figure d'interférence formée par l'impulsion. Ledit système permet d'obtenir de façon complète et exacte la forme de l'impulsion, et est particulièrement adapté pour caractériser des impulsions ultracourtes. Figure d'abrégi : Figure 2



FR 3 117 206 - A1



Description

Titre de l'invention : CARACTERISATION D'UNE IMPULSION DE RAYONNEMENT PAR FENETRAGE OPTIQUE RESOLU EN TEMPS

Domaine technique

[0001] La présente description concerne un système et un procédé de caractérisation d'une impulsion de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps.

Technique antérieure

[0002] Il est difficile de connaître la forme d'une impulsion de rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire connaître son profil d'amplitude complexe de champ électromagnétique, lorsqu'il s'agit d'une impulsion de très courte durée, dite impulsion ultracourte. A titre d'exemple, une telle impulsion peut durer quelques femtosecondes ou quelques dizaines de femtosecondes, voire un peu plus de cent femtosecondes, et posséder une longueur d'onde nominale d'environ 1,5 μm (micromètre). Plusieurs méthodes ont déjà été proposées pour caractériser le profil d'amplitude complexe de telles impulsions. Certaines de ces méthodes, dites multi-coup ou «multiple shot» en anglais, ne peuvent pas être mises en œuvre à partir d'une impulsion unique, car elles nécessitent que plusieurs mesures d'impulsion soient effectuées successivement. Tel est le cas lorsqu'est utilisé un montage optique qui fait interférer une impulsion de rayonnement électromagnétique avec elle-même en introduisant un retard qui possède une valeur unique pour chaque mesure. La valeur du retard est alors variée entre des mesures successives. Le nombre de mesures qui est nécessaire dans ce cas peut être important, en fonction de la précision souhaitée pour la caractérisation de l'impulsion, ce qui impose une durée totale de caractérisation qui peut être longue ou très longue. Dans la pratique, une telle méthode multi-coup peut même être inutilisable lorsque la fréquence de répétition des impulsions est faible. Par opposition à ces méthodes de caractérisation multi-coup, celles qui sont dites mono-coup, ou «single shot» en anglais, permettent de caractériser une impulsion en une seule mesure.

[0003] Par ailleurs, les caractérisations qui impliquent de mesurer le spectre d'une impulsion de rayonnement électromagnétique sont dites à fenêtrage optique résolu en fréquence, et désignées par FROG pour «Frequency-Resolved Optical Gating» en anglais. De telles caractérisations FROG peuvent être du type multi-coup ou du type mono-coup, comme décrit dans le document US 8,068,230. Elles nécessitent de mesurer le spectre et, à cause de cela, leur mise en œuvre matérielle est compliquée. Toutes les méthodes FROG mettent en œuvre un mécanisme non-linéaire de propagation du rayonnement, qui est appliqué aux parties d'impulsion qui sont superposées pour former une in-

terférence, avec un retard entre ces parties d'impulsion qui est noté τ . Toutefois, le mécanisme non-linéaire qui est utilisé peut varier entre des méthodes FROG qui sont différentes. Une information bidimensionnelle est alors recueillie, sous la forme de signaux spectraux de détection $S(\omega, \tau)$, où ω est la pulsation optique qui correspond à la mesure d'intensité spectrale effectuée. L'amplitude complexe de l'impulsion, notée $A(t)$, qui caractérise sa forme d'enveloppe, peut alors être déduite en utilisant des algorithmes itératifs, à partir de tous les signaux de détection $S(\omega, \tau)$ recueillis lorsque les deux paramètres ω et τ ont des valeurs variables indépendamment l'un de l'autre.

[0004] Pour les méthodes FROG qui sont dites SHG-FROG, SHG signifiant «Second Harmonic Generation» ou méthode à génération de deuxième harmonique, le mécanisme non-linéaire qui est utilisé est le doublement de fréquence optique. Ce mécanisme est obtenu en disposant un cristal doubleur de fréquence, aussi appelé cristal SHG, sur le trajet du rayonnement, et en limitant la détection exclusivement aux photons à fréquence doublée. Dans ces conditions, chaque signal de détection $S(\omega, \tau)$ correspond à la formule suivante :

$$S(\omega, \tau) = \left| \int A(t) \cdot A(t - \tau) \cdot e^{i\omega\tau} dt \right|^2$$

L'article intitulé «Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement» de P. O'Shea et al., Opt. Lett. 26(12), 2001, pp. 932-934 décrit une telle méthode SHG-FROG mono-coup.

[0005] Enfin, le document FR 3 034 577 décrit encore une autre méthode mono-coup pour caractériser une impulsion de rayonnement électromagnétique. Cette autre méthode utilise un biprisme de Fresnel pour former une figure d'interférence en superposant deux parties de l'impulsion dans une portion d'espace, et la figure d'interférence est saisie par un capteur d'images qui est sélectionné pour n'être sensible qu'à des absorptions à deux photons. Ainsi, le capteur d'images produit un courant qui est directement proportionnel à la probabilité d'absorber deux photons à chaque endroit de la figure d'interférence. Il est nécessaire de garantir que le capteur d'images ne détecte pas des photons par le mécanisme d'absorption linéaire usuel, en le sélectionnant pour que son intervalle spectral de sensibilité ne contienne pas la ou les valeur(s) de longueur d'onde de l'impulsion. Dans ces conditions, les signaux de détection qui sont délivrés par le capteur d'images pour une impulsion ultracourte, lorsque la durée d'accumulation du capteur d'images est supérieure à celle de l'impulsion, sont proportionnels au carré du module de la fonction d'autocorrélation du champ électrique, ce champ électrique étant encore représenté par un nombre complexe. Toutefois, il n'est pas possible de déduire de façon univoque l'amplitude complexe du champ électrique de l'impulsion à partir des valeurs du carré du module de cette fonction d'autocorrélation. A cause de cela, il est nécessaire de faire l'hypothèse d'une forme paramétrique de l'impulsion pour déduire les valeurs de certains de ses paramètres.

Ces paramètres peuvent être par exemple la durée de l'impulsion, une dérive temporelle de sa valeur instantanée de longueur d'onde, appelée «chirp» dans le jargon de l'Homme du métier, etc. Mais une telle caractérisation de l'impulsion n'est que partielle, et peut être inexacte si la forme réelle de l'impulsion ne correspond pas à la forme paramétrique qui a été utilisée.

Problème technique

- [0006] A partir de cette situation, un but de la présente invention est de proposer un nouveau procédé de caractérisation d'une impulsion de rayonnement électromagnétique, qui soit du type mono-coup.
- [0007] Un but supplémentaire de l'invention est de fournir une caractérisation complète et exacte de la forme d'une impulsion, c'est-à-dire sans qu'une hypothèse sur un type de forme paramétrique d'enveloppe d'impulsion soit nécessaire.
- [0008] Encore un autre but de l'invention est d'utiliser un montage optique qui soit simple et peu onéreux.

Résumé de l'invention

- [0009] Pour atteindre l'un au moins de ces buts ou un autre, un premier aspect de l'invention propose un nouveau système de caractérisation d'une impulsion de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps, qui comprend :
- un dispositif de formation d'une interférence, adapté pour superposer dans un volume d'interférence, plusieurs parties d'un rayonnement initial qui est incident sur ce dispositif ;
 - un chemin optique d'entrée, agencé pour diriger l'impulsion à caractériser sur le dispositif de formation de l'interférence, de sorte que l'impulsion constitue le rayonnement initial qui est incident sur ce dispositif ;
 - un capteur d'images matriciel, qui est disposé pour saisir sélectivement à partir d'absorptions à deux photons, une figure d'interférence formée par l'impulsion dans le volume d'interférence ; et
 - une unité de traitement, qui est configurée pour déduire des caractéristiques de forme de l'impulsion à partir de signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel, et correspondant à la figure d'interférence formée par l'impulsion.
- [0010] Selon l'invention, le dispositif de formation d'interférence est adapté pour superposer dans le volume d'interférence, quatre parties du rayonnement initial, de façon à former une interférence à quatre ondes et à ce que les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel varient en fonction de deux paramètres indépendants associés à deux directions différentes qui sont contenues dans la surface photosensible du capteur d'images matriciel.
- [0011] En outre, les caractéristiques de l'impulsion qui sont déduites par l'unité de

traitement à partir d'une partie au moins des signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel, comprennent des valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion.

[0012] Par conséquent, la caractérisation d'impulsion qui est fournie par le système de l'invention est du type mono-coup, grâce à l'échantillonnage de la figure d'interférence que produit le capteur d'images. En outre, elle est du type à fenêtrage optique résolu dans le temps, car chaque endroit de la figure d'interférence correspond à des valeurs de deux retards qui sont appliqués entre plusieurs parties de l'impulsion par le dispositif de formation de l'interférence.

[0013] Grâce au fait que la figure d'interférence soit bidimensionnelle, avec des variations d'intensité qui sont indépendantes entre les deux directions du capteur d'images matriciel, une information beaucoup plus complète est recueillie sur l'impulsion par le système de l'invention. Il est alors possible d'en déduire une caractérisation complète de la forme de l'impulsion, par les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion, par exemple de son champ électrique. Aucune hypothèse sur un type de forme paramétrique d'enveloppe d'impulsion n'est nécessaire de cette façon, si bien que la caractérisation de la forme de l'impulsion qui est fournie par le système de l'invention, est exacte.

[0014] Le dispositif de formation d'interférence à quatre ondes qui est utilisé dans le système de l'invention peut être particulièrement simple. En particulier, sa mise en œuvre peut être beaucoup plus simple que celle d'un spectromètre. Par exemple, ce peut être une portion d'un matériau réfringent limitée par une face d'entrée optique qui est plane et par quatre faces de sortie optique qui sont aussi planes, les quatre faces de sortie étant des images les unes des autres par des rotations de 90° autour d'un axe optique qui est perpendiculaire à la face d'entrée. Pour une telle réalisation du dispositif de formation d'interférence, chaque face de sortie forme un prisme avec la face d'entrée dont l'angle au sommet est non-nul, et elle est orientée en plus pour qu'une partie de faisceau du rayonnement initial qui est incidente sur la face d'entrée parallèlement à l'axe optique et qui émerge à travers cette face de sortie soit déviée par la portion de matériau réfringent en direction de l'axe optique en aval du dispositif de formation d'interférence.

[0015] Alternativement, le dispositif de formation d'interférence qui est utilisé dans le système de l'invention peut comprendre deux biprismes chacun en matériau réfringent et qui sont disposés l'un suivant l'autre sur un chemin de propagation du rayonnement initial, avec des arêtes respectives de ces deux biprismes qui ont des orientations différentes en projection sur un plan perpendiculaire au chemin de propagation du rayonnement initial. Préférentiellement, les arêtes des deux biprismes peuvent être orthogonales en projection sur le plan qui est perpendiculaire au chemin de propagation

du rayonnement initial.

- [0016] De façon générale pour l'invention, l'unité de traitement peut être configurée pour :
- sélectionner au moins une composante d'une décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence telle que saisie par le capteur d'images matriciel sélectivement à partir des absorptions à deux photons, et
 - déduire les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion, à partir de l'au moins une composante sélectionnée.
- [0017] Avantageusement, l'unité de traitement peut être configurée pour que la composante qui est sélectionnée dans la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, possède des valeurs nulles en dehors du volume d'interférence. Le résultat de la caractérisation d'impulsion qui est fourni par le système de l'invention dépend ainsi dans une moindre mesure, ou ne dépend pas, de la taille de la fenêtre spatiale de détection que constitue la surface photosensible du capteur d'images matriciel.
- [0018] Par exemple, la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, qui est sélectionnée par l'unité de traitement, peut être associée au double d'une fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon une des directions du capteur d'images matriciel, et associée à une seule fois cette fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon l'autre direction du capteur d'images matriciel, lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction de contributions de retard qui sont créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel. Cette composante est appelée $F_{2,1}$, et les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion sont déduites de cette composante $F_{2,1}$ par l'unité de traitement. La composante $F_{2,1}$ possède des valeurs nulles en dehors du volume d'interférence.
- [0019] Alternativement, l'unité de traitement peut être configurée pour sélectionner la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, appelée $F_{2,0}$, qui est associée au double de la fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon une première des directions du capteur d'images matriciel, mais sans être associée à aucune variation selon une seconde direction du capteur d'images matriciel, lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction des contributions de retard qui sont créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel. Les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion sont alors déduites de cette composante $F_{2,0}$ par l'unité de traitement. Toutefois, les valeurs de la composante $F_{2,0}$ ne sont pas nulles en dehors du volume d'interférence. Pour pallier cet inconvénient, l'unité de traitement peut être

configurée pour sélectionner par ailleurs la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, appelée $F_{2,2}$, qui est associée au double de la fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon la première des directions du capteur d'images matriciel, et qui est aussi associée au double de la fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon la seconde direction du capteur d'images matriciel, encore lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction des contributions de retard qui sont créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel. Alors, l'unité de traitement est aussi configurée pour calculer des transformées de Fourier unidimensionnelles respectives des composantes $F_{2,0}$ et $F_{2,2}$ par rapport aux contributions de retard qui sont créées par les déplacements selon la première des directions du capteur d'images matriciel, ces transformées de Fourier unidimensionnelles étant notées $TF_1(F_{2,0})$ pour la composante $F_{2,0}$, et $TF_1(F_{2,2})$ pour la composante $F_{2,2}$. Elle est alors configurée pour déduire les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe du champ de l'impulsion, à partir d'un résultat de $TF_1(F_{2,0}) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})]$, où $\text{Mod}[\cdot]$ désigne un module de nombre complexe.

[0020] Un second aspect de l'invention propose un procédé de caractérisation d'une impulsion de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps, qui est exécuté en utilisant un système conforme au premier aspect ci-dessus. En outre, l'impulsion à caractériser possède un spectre tel que toutes les valeurs de longueur d'onde qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles, ou sensiblement non-nulles, soient en dehors d'un intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel, et tel que des résultats de divisions par deux de ces valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles ou sensiblement non-nulles, soient à l'intérieur de l'intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel.

[0021] L'intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel peut être directement son intervalle spectral de sensibilité. Dans ce cas, l'intervalle spectral de sensibilité du capteur d'images matriciel doit exclure toutes les valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles ou sensiblement non-nulles, et contenir les résultats des divisions par deux de ces valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles ou sensiblement non-nulles. Par exemple, le capteur d'images matriciel qui est utilisé dans le système de l'invention peut être d'un type à base de silicium, auquel cas son intervalle spectral de sensibilité s'étend approximativement de 400 nm (nanomètre) à 1200 nm, en valeurs de longueur d'onde. Alors, toutes les valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion à caractériser qui correspondent à

des amplitudes spectrales non-nulles ou substantiellement non-nulles doivent être comprises entre 1200 nm et 2400 nm.

[0022] Alternativement, une lame d'un cristal doubleur de fréquence, appelée lame de cristal SHG, peut être placée dans le volume d'interférence, et le capteur d'images matriciel être mis en œuvre ou sélectionné pour détecter des photons à fréquence optique doublée qui sont produits par la lame de cristal SHG, à l'exclusion des photons de l'impulsion. Eventuellement, l'intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel qui est utilisé avec une telle lame de cristal SHG peut être limité par un filtre spectral qui est situé entre cette lame de cristal SHG et ce capteur, de façon à supprimer les photons de l'impulsion. L'intervalle spectral de détection résulte alors de la combinaison de l'intervalle spectral de sensibilité du capteur d'images matriciel avec une fenêtre de transmission spectrale du filtre.

Brève description des figures

[0023] Les caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront plus clairement dans la description détaillée ci-après d'exemples de réalisation non-limitatifs, en référence aux figures annexées parmi lesquelles :

[0024] [fig.1a] est une vue en perspective d'un dispositif de formation d'interférence qui peut être utilisé dans un système conforme à l'invention ;

[0025] [fig.1b] regroupe une vue en plan et des sections du dispositif de formation d'interférence de [fig.1a] ;

[0026] [fig.1c] correspond à [fig.1a] pour un mode de réalisation alternatif de l'invention ;

[0027] [fig.2] est un schéma synoptique d'un système conforme à l'invention ;

[0028] [fig.3] montre des étapes exécutées par une unité de traitement d'un système conforme à l'invention ; et

[0029] [fig.4] est un diagramme qui illustre un résultat de caractérisation d'une impulsion de rayonnement électromagnétique, tel que fourni par le système de [fig.2].

Description détaillée de l'invention

[0030] Pour raison de clarté, les dimensions des éléments qui sont représentés dans ces figures ne correspondent ni à des dimensions réelles, ni à des rapports de dimensions réels. En outre, certains de ces éléments ne sont représentés que symboliquement, et des références identiques qui sont indiquées dans des figures différentes désignent des éléments identiques ou qui ont des fonctions identiques.

[0031] Conformément à [fig.1a] et [fig.1b], un dispositif de formation d'interférence 1 comprend une portion d'un matériau homogène, transparent et réfringent pour la longueur d'onde nominale d'une impulsion de rayonnement électromagnétique à caractériser. S_0 désigne une face d'entrée optique de cette portion, qui est plane, et S_1 , S_2 , S_3 et S_4 désignent ses quatre faces de sortie optique qui ont des formes identiques et

sont chacune aussi planes. Les quatre faces de sortie S_1 - S_4 sont situées sur un côté de la portion de matériau réfringent qui est opposé à celui de la face d'entrée S_0 . En outre, les faces de sortie S_1 - S_4 sont réparties autour d'un axe optique A-A qui est perpendiculaire à la face d'entrée S_0 , conformément à une symétrie par rotation d'ordre quatre pour qu'un faisceau de rayonnement initial R_0 qui est incident sur la face d'entrée S_0 en étant parallèle à cet axe optique et centré par rapport à lui, ressorte de façon équirépartie à travers les quatre faces de sortie S_1 - S_4 . En outre, chaque face de sortie S_1 - S_4 est inclinée par rapport à la face d'entrée S_0 de façon à ce que le dispositif 1 divise le faisceau du rayonnement initial R_0 en quatre parties de faisceau qui ressortent de la portion de matériau réfringent une-à-une par chacune des faces de sortie S_1 - S_4 , avec des directions de propagation respectives qui se rapprochent de l'axe optique A-A. Les parties de faisceau qui émergent des faces de sortie S_1 - S_4 se superposent ainsi à l'intérieur d'un volume d'interférence qui est noté V (voir [fig.2]), et qui s'étend à partir d'un sommet P commun aux quatre faces de sortie. Une surface latérale S_L de la portion de matériau réfringent qui constitue le dispositif de formation d'interférence 1, entre la face d'entrée S_0 d'une part et les faces de sortie S_1 - S_4 d'autre part, peut avoir une forme sélectionnée pour augmenter une surface de section transversale du volume d'interférence V. L'angle entre les bissectrices respectives issues du sommet P de deux des faces de sortie S_1 - S_4 qui sont opposées par rapport à l'axe optique A-A est noté α , et peut être d'environ 160° (degré). Deux faces de sortie qui sont voisines sont séparées par une arête rectiligne, et deux de ces arêtes qui sont opposées par rapport à l'axe optique A-A forment entre elles un angle β . Les valeurs respectives des angles α et β sont reliées par formule :

$$\alpha = \text{acos} \left(- \frac{1 - 2 \cdot \tan^2(\beta)}{1 + 2 \cdot \tan^2(\beta)} \right), \text{ où } \text{acos}(\cdot) \text{ désigne la}$$

fonction réciproque du cosinus, et $\tan(\cdot)$ désigne la fonction tangente.

[0032] Les angles δ et γ d'émergence du rayonnement qui sont produits par le dispositif de formation d'interférence 1 lorsque le rayonnement initial R_0 est incident sur la face d'entrée S_0 parallèlement à l'axe optique A-A, tels que ces angles δ et γ sont indiqués dans [fig.1a], sont donnés par les formules : $\delta = \text{asin} \left(2^{-1/2} \cdot \sin(\theta_r) \right)$ et

$\gamma = \text{atan} \left(2^{-1/2} \cdot \tan(\theta_r) \right)$, où $\sin(\cdot)$ et $\text{asin}(\cdot)$ désignent le sinus et sa fonction réciproque, $\text{atan}(\cdot)$ désigne la fonction réciproque de tangente, et θ_r est donné par

$$\theta_r = \text{asin} \left(\frac{n\sqrt{2} \cdot \tan(\beta)}{\sqrt{1 + 2 \cdot \tan^2(\beta)}} \right) - \text{asin} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \tan(\beta)}{\sqrt{1 + 2 \cdot \tan^2(\beta)}} \right), \text{ n étant l'indice de}$$

réfraction du matériau qui constitue le dispositif de formation d'interférence 1 pour la longueur d'onde nominale du rayonnement initial R_0 .

[0033] Dans [fig.2], la référence 10 désigne globalement un système de caractérisation

d'impulsion de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps qui est conforme à l'invention. Le système 10 comprend le dispositif de formation d'interférence 1, un chemin optique d'entrée 2, un capteur d'images matriciel 3 et une unité de traitement 4. Le plan de [fig.2] contient les bissectrices de deux des faces de sortie du dispositif 1 qui sont opposées par rapport à l'axe optique A-A, par exemple les bissectrices respectives des faces de sortie S_2 et S_4 . La référence I désigne l'impulsion à caractériser. Elle peut être produite par une source 11 d'impulsions laser ultracourtes, aussi appelée laser femtoseconde et notée FS-LASER, par exemple avec une longueur d'onde nominale λ_0 qui est proche de la valeur 1550 nm.

- [0034] Le chemin optique d'entrée 2 peut être conçu pour adapter une taille de section de faisceau de l'impulsion I conformément à la taille de la face d'entrée S_0 du dispositif de formation d'interférence 1. Il peut comprendre une optique d'entrée, par exemple à base d'une combinaison de plusieurs miroirs sphériques et/ou de lentilles. Le chemin optique d'entrée 2 est de préférence conçu pour que l'impulsion I soit incidente sur la face d'entrée S_0 parallèlement à l'axe A-A, et d'une façon qui est centrée sur cet axe. Ainsi, l'impulsion I constitue le rayonnement initial R_0 pour le dispositif de formation d'interférence 1. Dans ces conditions, le volume d'interférence V commence au sommet commun P des faces de sortie S_1 - S_4 , est symétrique par rapport à l'axe A-A, et possède une section perpendiculaire à l'axe A-A qui est de plus en plus grande jusqu'à un plan de section maximale, notée SM.
- [0035] Le capteur d'images matriciel 3 possède par exemple 600 x 600 éléments photosensibles. Il est disposé dans le volume d'interférence V, perpendiculairement à l'axe A-A, de préférence à proximité du plan de section maximale SM. Il est orienté de sorte que ses directions de lignes et de colonnes d'éléments photosensibles, notées x et y respectivement, soient parallèles un-à-un aux côtés latéraux du volume d'interférence V. L'angle α du dispositif de formation d'interférence 1 est saillant, en étant suffisamment proche de 180° pour que les franges d'interférence qui sont produites dans le volume V soient résolues par le capteur d'images matriciel 3. Ainsi, un pas p des éléments photosensibles de ce capteur d'images matriciel détermine une limite inférieure pour l'angle α . Pour respecter la condition de Nyquist, l'angle θ_r introduit plus haut doit satisfaire l'inégalité : $\sin(\theta_r) < \frac{\lambda_0}{4\sqrt{2} \cdot p}$, où λ_0 est encore la longueur d'onde nominale de l'impulsion I. Par exemple, le pas p des éléments photosensibles peut être égal à 1,6 μm lorsque la longueur d'onde nominale λ_0 est égale à environ 1550 nm.
- [0036] Le capteur d'images matriciel 3 est sélectionné ou mis en œuvre pour ne pas être sensible à la valeur de longueur d'onde nominale λ_0 de l'impulsion I, mais sensible dans un intervalle spectral qui contient la valeur moitié de cette valeur de longueur d'onde nominale λ_0 , c'est-à-dire $\lambda_0/2$, en s'étendant suffisamment de part et d'autre de

$\lambda_0/2$. Lorsque la longueur d'onde nominale λ_0 de la source 11 des impulsions laser est d'environ 1550 nm, le capteur d'images matriciel 3 peut être du type à base de silicium. Dans ces conditions, le capteur d'images matriciel 3 est sensible à des absorptions à deux photons qui sont générées par l'impulsion I et se produisent dans ses éléments photosensibles, et dont le nombre d'occurrences dépend du lieu où se trouve chaque élément photosensible à l'intérieur du volume d'interférence V. Du fait que l'impulsion I soit beaucoup plus courte que la durée d'accumulation des éléments photosensibles du capteur d'images matriciel 3, le signal de détection qui est délivré par chaque élément photosensible du capteur d'images matriciel 3 est :

$$S(\tau_1, \tau_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{\text{tot}}(t, \tau_1, \tau_2)|^4 dt \text{ où } E_{\text{tot}} \text{ est le champ électrique que génère}$$

l'impulsion I en un point du volume d'interférence V et à l'instant t. En prenant l'une des quatre ondes qui sont produites par le dispositif de formation d'interférence 1 à l'endroit de l'élément photosensible considéré comme référence de déphasage, le champ électrique E_{tot} est donné par :

$$E_{\text{tot}}(t, \tau_1, \tau_2) = A(t) \cdot e^{-i\omega_0 t} + A(t - \tau_1) \cdot e^{-i\omega_0(t - \tau_1)} + A(t - \tau_2) \cdot e^{-i\omega_0(t - \tau_2)} + A(t - \tau_1 - \tau_2) \cdot e^{-i\omega_0(t - \tau_1 - \tau_2)} + \text{complexe conjugué.}$$

où τ_1 et τ_2 sont les retards qui résultent des déplacements selon les deux directions x et y par rapport à l'onde prise pour référence de déphasage. ω_0 est la pulsation nominale de l'impulsion I, égale à $2\pi \cdot C / \lambda_0$ où C est la vitesse de propagation du rayonnement dans l'air. A(t) est l'amplitude complexe du champ électrique de l'impulsion I à l'instant t, de sorte que le champ électrique instantané de l'impulsion I est :

$$A(t) \cdot e^{-i\omega_0 t} \text{ Lorsque le dispositif de formation d'interférence 1 possède la}$$

constitution de [fig.1a] et [fig.1b], les retards τ_1 et τ_2 ont les expressions suivantes en fonction des déplacements selon les deux directions x et y :

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{2} \sin(\theta_R) \cdot x}{C} \text{ et } \tau_2 = \frac{\sqrt{2} \sin(\theta_R) \cdot y}{C}$$

[0037] Les signaux de détection $S(\tau_1, \tau_2)$ qui sont alors délivrés par les éléments photosensibles du capteur d'images matriciel 3 comprennent vingt-cinq termes qui peuvent être identifiés chacun par deux valeurs d'entiers relatifs n et m, n étant égal à -2, -1, 0, +1 ou +2 et m étant indépendamment aussi égal à -2, -1, 0, +1 ou +2. Le terme du couple (n, m) est proportionnel à $\exp[-i(n \cdot \omega_0 \cdot \tau_1 + m \cdot \omega_0 \cdot \tau_2)]$, où $\exp[.]$ désigne la fonction exponentielle.

[0038] L'unité de traitement 4 est notée CPU dans [fig.2]. Elle est connectée pour recevoir en entrée les signaux de détection $S(\tau_1, \tau_2)$ qui sont délivrés par les éléments photosensibles du capteur d'images matriciel 3, et pour fournir en sortie une caractérisation de la forme de l'impulsion I, sous forme de valeurs complexes de A(t). Les étapes qui sont exécutées par l'unité de traitement 4 sont décrites maintenant en référence à [fig.3].

[0039] L'unité de traitement 4 numérise les signaux de détection $S(\tau_1, \tau_2)$ à l'étape notée NUM. Elle en calcule ensuite une transformation de Fourier bidimensionnelle par rapport aux deux variables τ_1 et τ_2 , à l'étape suivante notée FOURIER. Une fonction à deux variables $TF(S)(\omega_1, \omega_2)$ est ainsi obtenue, où ω_1 est la variable conjuguée à τ_1 , ω_2 est la variable conjuguée à τ_2 , et $TF(S)$ désigne la transformée de Fourier bidimensionnelle des signaux $S(\tau_1, \tau_2)$. La fonction $TF(S)(\omega_1, \omega_2)$ est constituée par vingt-cinq pics qui correspondent aux vingt-cinq termes indiqués plus haut pour la fonction $S(\tau_1, \tau_2)$. Un filtrage adaptatif est alors appliqué à l'un de ces pics, à l'étape notée FILT., pour isoler au moins une des composantes, correspondant à une valeur de n et à une valeur de m . Par exemple, le filtrage isole le pic correspondant à $\omega_1=2 \cdot \omega_0$ et $\omega_2=\omega_0$, c'est-à-dire $n=2$ et $m=1$, avec une certaine largeur de fenêtre de filtrage bidimensionnelle autour de ce pic. Cette largeur de fenêtre de filtrage dans le plan des valeurs de pulsations ω_1, ω_2 est adaptée pour rester suffisamment à distance des autres pics. Une fonction filtrée dérivée de $TF(S)(\omega_1, \omega_2)$ est alors construite, en conservant dans la fenêtre de filtrage les valeurs de $TF(S)(\omega_1, \omega_2)$ sans les modifier, et en complétant par des valeurs nulles en dehors de la fenêtre de filtrage. Enfin, une transformation de Fourier bidimensionnelle inverse est appliquée à la fonction $TF(S)(\omega_1, \omega_2)$ filtrée. Ainsi, la composante de la fonction $S(\tau_1, \tau_2)$ qui correspond à $n=2$ et $m=1$ a été isolée. Elle est notée $F_{2,1}$ et est de nouveau une fonction des deux retards τ_1 et τ_2 . La méthode de filtrage qui vient d'être décrite est couramment appelée filtrage adaptatif par l'Homme du métier. Elle fournit un échantillonnage des valeurs de la fonction $F_{2,1}(\tau_1, \tau_2)$.

[0040] Par ailleurs, en reportant l'expression de $E_{tot}(t, \tau_1, \tau_2)$ dans $S(\tau_1, \tau_2)$ et en développant les termes nécessaires, il vient :

$$F_{2,1}(\tau_1, \tau_2) = 2 \left[\int A^2(t) A^*(t - \tau_1 - \tau_2) A^*(t - \tau_1) dt + \int A(t) A^{*2}(t - \tau_1 - \tau_2) A(t - \tau_2) dt \right] e^{-i(2 \cdot \omega_0 \cdot \tau_1 + \omega_0 \cdot \tau_2)}$$

En utilisant un algorithme d'optimisation connu de l'Homme du métier, il est alors possible de déduire la fonction $A(t)$ des valeurs de $F_{2,1}(\tau_1, \tau_2)$ telles que fournies par l'étape de filtrage des signaux de détection. Une telle obtention de la fonction $A(t)$ est possible grâce au fait que la donnée de départ $F_{2,1}$ soit une fonction de deux variables indépendantes, à savoir τ_1 et τ_2 . Cette étape est notée OPT. dans [fig.3]. Par exemple, des algorithmes d'optimisation utilisables sont les algorithmes dits de reconstruction, tels que les algorithmes à projections généralisés.

[0041] Pour l'étape OPT., les inventeurs ont utilisé un algorithme qui est couramment appelé algorithme d'évolution ou algorithme génétique. Un tel algorithme d'évolution met en œuvre des mécanismes qui sont inspirés de la sélection naturelle pour optimiser un jeu de valeurs, afin reproduire une cible. Pour l'invention, l'algorithme a pour but de déterminer les valeurs d'amplitude instantanée $A(t)$, en module noté $Mod[A(t)]$ et

en phase notée $\varphi(t)$, qui permettent de reproduire au mieux les valeurs de $F_{2,1}(\tau_1, \tau_2)$ fournies par l'étape FILT., qui constituent la cible. De façon équivalente, l'algorithme peut déterminer l'amplitude $A(\omega)$ des composantes spectrales de la fonction $A(t)$, par leur module $\text{Mod}[A(\omega)]$ et leur phase $\varphi(\omega)$. De même, il est aussi équivalent d'utiliser pour cible d'optimisation les valeurs de $\text{TF}(S)(\omega_1, \omega_2)$ filtrée qui ont été obtenues au cours de l'étape FILT. Des valeurs de départ sont adoptées pour $\text{Mod}[A(\omega)]$ et $\varphi(\omega)$, pour un ensemble de valeurs d'échantillonnage de la pulsation ω . Ces valeurs de départ déterminent une forme de départ pour l'impulsion I , à partir de laquelle une évaluation de $\text{TF}(F_{2,1})(\omega_1, \omega_2)$ est calculée, où $\text{TF}(F_{2,1})(\omega_1, \omega_2)$ est la transformée de Fourier bidimensionnelle de $F_{2,1}(\tau_1, \tau_2)$ déduite de l'expression donnée plus haut pour cette dernière. Pour l'algorithme d'évolution, chaque couple de valeurs de départ adoptées pour $\text{Mod}[A(\omega)]$ et $\varphi(\omega)$, pour une même des valeurs de ω , constitue un gène, et l'ensemble des valeurs de $\text{Mod}[A(\omega)]$ et $\varphi(\omega)$ qui sont associées à toutes les valeurs d'échantillonnage de ω constitue un individu. L'algorithme d'évolution démarre avec un ensemble d'individus qui sont sélectionnés aléatoirement, et qui constituent une population initiale. La fonction $\text{TF}(F_{2,1})(\omega_1, \omega_2)$ est calculée pour chaque individu de la population initiale, et le résultat obtenu pour chaque individu est comparé à $\text{TF}(S)(\omega_1, \omega_2)$ filtrée telle qu'obtenue à l'issue de l'étape FILT. à partir des signaux de détection $S(\tau_1, \tau_2)$. Un score est alors attribué à chaque individu, qui quantifie le niveau de coïncidence entre son évaluation pour la fonction $\text{TF}(F_{2,1})(\omega_1, \omega_2)$ et les valeurs de $\text{TF}(S)(\omega_1, \omega_2)$ filtrée. Cette coïncidence est recherchée entre les deux fonctions $\text{TF}(F_{2,1})$ et $\text{TF}(S)$ filtrée lorsque les deux variables ω_1 et ω_2 varient indépendamment l'une de l'autre. Les individus aux scores les plus bas sont éliminés, et ceux aux scores les plus hauts sont sélectionnés pour devenir parents d'une nouvelle génération d'individus. Les gènes de chaque individu de la nouvelle génération sont obtenus par mélange de ceux de deux parents sélectionnés, et en introduisant des mutations aléatoires d'un ou plusieurs des gènes. La comparaison des individus aux valeurs de $\text{TF}(S)(\omega_1, \omega_2)$ filtrée déduites des signaux de détection est alors répétée avec les individus de la nouvelle génération, et l'ensemble du procédé est répété de façon récurrente pour chaque génération successive. Ces répétitions sont enchaînées ainsi jusqu'à obtenir une convergence, c'est-à-dire obtenir une situation où les individus d'une génération à la suivante n'améliorent plus ou presque plus les scores de coïncidence. L'individu au meilleur score constitue le résultat pour la forme de l'impulsion I .

[0042] Le diagramme de [fig.4] montre le résultat qui a été obtenu ainsi à partir de la composante $F_{2,1}$. L'axe horizontal du diagramme repère le temps, noté t et exprimé en femtosecondes (fs). L'axe vertical à gauche du diagramme repère les valeurs de $\varphi(t)$, exprimées en radians, et l'axe vertical à droite du diagramme repère les valeurs de $\text{Mod}^2[A(t)]$ exprimées en unité arbitraire (a.u.). L'impulsion I qui a été caractérisée

possède donc une durée d'environ 40 fs.

[0043] Alternativement, la forme de l'impulsion I peut être obtenue selon l'invention en utilisant la composante $F_{2,0}$ de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la fonction $S(\tau_1, \tau_2)$, correspondant à $n=2$ et $m=0$, à la place de la composante $F_{2,1}$. Cette composante $F_{2,0}$ est la suivante, d'après les expressions de $E_{\text{tot}}(t, \tau_1, \tau_2)$ et $S(\tau_1, \tau_2)$:

$$F_{2,0}(\tau_1, \tau_2) = \left[2 \cdot \int A^2(t) A^{*2}(t - \tau_1) dt + 4 \cdot \int A(t) A^*(t - \tau_1) A(t - \tau_2) A^*(t - \tau_1 - \tau_2) dt \right] e^{-i(2 \cdot \omega_0 \cdot \tau_1)}$$

[0044] Toutefois, contrairement à la composante $F_{2,1}$, la composante $F_{2,0}$ n'est pas nulle à l'extérieur du volume d'interférence V. Afin de retrouver une telle annulation pour des valeurs qui sont issues des signaux de détection et sont utilisées à l'étape OPT., il est possible d'utiliser les résultats de $TF_1(F_{2,0})(\omega_1, \tau_2) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})(\omega_1, \tau_2)]$, où $F_{2,2}$ désigne la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la fonction $S(\tau_1, \tau_2)$ qui correspond à $n=2$ et $m=2$, et $TF_1(.)$ désigne l'opération de transformation de Fourier unidimensionnelle qui est effectuée par rapport à la variable de retard τ_1 . La composante $F_{2,2}$ a pour expression :

$$F_{2,2}(\tau_1, \tau_2) = \int A^2(t) A^{*2}(t - \tau_1 - \tau_2) dt \cdot e^{-i(2 \cdot \omega_0 \cdot \tau_1 + 2 \cdot \omega_0 \cdot \tau_2)} \text{ et alors :}$$

$$TF_1(F_{2,0})(\omega_1, \tau_2) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})(\omega_1, \tau_2)] = \text{Mod}^2 \left[\int A(t) A(t - \tau_2) e^{i(\omega_1 - 2 \cdot \omega_0)t} dt \right]$$

La fonction $TF_1(F_{2,0})(\omega_1, \tau_2) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})(\omega_1, \tau_2)]$ qui est ainsi obtenue est identique à celle mentionnée pour les méthodes SHG-FROG décrites dans l'article intitulé «Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating», de R. Trebino et al., Rev. Sci. Instrum. 68 (9), septembre 1997, American Institute of Physics, pp. 3277-3295.

[0045] Il est entendu que l'invention peut être reproduite en modifiant des aspects secondaires des modes de réalisation qui ont été décrits en détail ci-dessus, tout en conservant certains au moins des avantages cités. Notamment, les modifications suivantes sont énumérées de façon non-limitative :

- le dispositif de formation d'interférence 1 peut être différent de celui de [fig.1a] et [fig.1b]. Par exemple, [fig.1c] montre un autre dispositif de formation d'interférence à quatre ondes, qui comprend deux biprismes disposés l'un derrière l'autre sur le chemin de propagation du rayonnement initial R_0 , destiné à être constitué par l'impulsion I à caractériser. Les références 1a et 1b qui sont indiquées dans [fig.1c] désignent ces deux biprismes, respectivement. Les arêtes respectives des deux biprismes 1a et 1b sont de préférence perpendiculaires entre elles en projection dans un plan qui est perpendiculaire à l'axe A-A ;

- une composante filtrée de la figure d'interférence, autre que $F_{2,1}$ et $F_{2,0}$, ou une combinaison de plusieurs composantes filtrées de la figure d'interférence, autre que $TF_1(F_{2,0}) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})]$, peut être utilisée pour en déduire la forme de l'impulsion I à ca-

racteriser. Notamment, des composantes $F_{1,2}$ et $F_{0,2}$ peuvent être utilisées à la place de $F_{2,1}$ et $F_{2,0}$ en permutant les rôles de τ_1 et τ_2 dans les équations et en calculant une transformation de Fourier unidimensionnelle non pas sur la première variable mais sur la seconde ;

- un algorithme de reconstruction peut être utilisé, qui est différent de celui du type génétique qui a été décrit ; et

- toutes les valeurs numériques qui ont été citées ne l'ont été qu'à titre d'illustration, et peuvent être changées en fonction de l'application considérée.

Revendications

[Revendication 1]

Système (10) de caractérisation d'une impulsion (I) de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps, comprenant :

- un dispositif (1) de formation d'une interférence, adapté pour superposer dans un volume d'interférence (V), plusieurs parties d'un rayonnement initial (R_0) qui est incident sur ledit dispositif ;
- un chemin optique d'entrée (2), agencé pour diriger l'impulsion (I) à caractériser sur le dispositif (1) de formation de l'interférence, de sorte que l'impulsion constitue le rayonnement initial (R_0) qui est incident sur ledit dispositif ;
- un capteur d'images matriciel (3), qui est disposé pour saisir sélectivement à partir d'absorptions à deux photons, une figure d'interférence formée par l'impulsion (I) dans le volume d'interférence (V) ; et
- une unité de traitement (4), configurée pour déduire des caractéristiques de forme de l'impulsion (I) à partir de signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel (3), et correspondant à la figure d'interférence formée par l'impulsion,

le système (10) étant caractérisé en ce que le dispositif (1) de formation d'interférence est adapté pour superposer dans le volume d'interférence (V), quatre parties du rayonnement initial (R_0), de façon à former une interférence à quatre ondes et à ce que les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel (3) varient en fonction de deux paramètres indépendants associés à deux directions différentes qui sont contenues dans une surface photosensible dudit capteur d'images matriciel,

et en ce que les caractéristiques de l'impulsion (I) qui sont déduites par l'unité de traitement (4) à partir d'une partie au moins des signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel (3), comprennent des valeurs instantanées de module et de phase d'une amplitude complexe ($A(t)$) de champ de l'impulsion.

[Revendication 2]

Système (10) selon la revendication 1, dans lequel le dispositif (1) de formation d'interférence comprend une portion d'un matériau réfringent limitée par une face d'entrée optique (S_0) qui est plane et par quatre faces de sortie optique (S_1 - S_4) qui sont aussi planes, les quatre faces de sortie étant des images les unes des autres par des rotations de 90° autour d'un axe optique (A-A) qui est perpendiculaire à la face d'entrée, et chaque face de sortie formant un prisme avec la face d'entrée qui

possède un angle au sommet non-nul, et étant orientée de façon à ce qu'une partie de faisceau du rayonnement initial (R_0) qui est incidente sur la face d'entrée parallèlement à l'axe optique et qui émerge à travers ladite face de sortie, soit déviée par la portion de matériau réfringent en direction dudit axe optique en aval du dispositif de formation d'interférence,

ou le dispositif (1) de formation d'interférence comprend deux biprismes (1a, 1b) chacun en matériau réfringent, et qui sont disposés l'un suivant l'autre sur un chemin de propagation du rayonnement initial (R_0), des arêtes respectives des deux biprismes ayant des orientations différentes en projection sur un plan perpendiculaire audit chemin de propagation du rayonnement initial.

[Revendication 3]

Système (10) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel l'unité de traitement (4) est configurée pour :

- sélectionner au moins une composante d'une décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence telle que saisie par le capteur d'images matriciel (3) sélectivement à partir des absorptions à deux photons, et
- déduire les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe ($A(t)$) du champ de l'impulsion (I), à partir de l'au moins une composante sélectionnée.

[Revendication 4]

Système (10) selon la revendication 3, dans lequel la composante sélectionnée possède des valeurs nulles en dehors du volume d'interférence (V).

[Revendication 5]

Système (10) selon la revendication 4, dans lequel la composante sélectionnée, appelée $F_{2,1}$, est associée au double d'une fréquence nominale de l'impulsion (I) à caractériser selon une des directions (x, y) du capteur d'images matriciel (3), et est associée à une seule fois ladite fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon une autre (y) desdites directions du capteur d'images matriciel, lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction de contributions de retard créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel, et les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe ($A(t)$) du champ de l'impulsion (I) sont déduites de la composante $F_{2,1}$ par l'unité de traitement (4).

[Revendication 6]

Système (10) selon la revendication 3, dans lequel la composante sélectionnée, appelée $F_{2,0}$, est associée au double d'une fréquence

nominale de l'impulsion (I) à caractériser selon une (x) des directions du capteur d'images matriciel (3), mais sans être associée à aucune variation selon une autre (y) desdites directions dudit capteur d'images matriciel, lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction de contributions de retard créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel, et les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe (A(t)) du champ de l'impulsion (I) sont déduites de la composante $F_{2,0}$ par l'unité de traitement (4).

[Revendication 7]

Système (10) selon la revendication 3, dans lequel l'unité de traitement (4) est configurée pour sélectionner la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, appelée $F_{2,0}$, qui est associée au double d'une fréquence nominale de l'impulsion (I) à caractériser selon une première (x) des directions du capteur d'images matriciel (3), mais sans être associée à aucune variation selon une seconde (y) desdites directions du capteur d'images matriciel, lorsque les signaux de détection délivrés par le capteur d'images matriciel sont exprimés en fonction de contributions de retard créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel, et pour sélectionner par ailleurs la composante de la décomposition par transformation de Fourier bidimensionnelle de la figure d'interférence, appelée $F_{2,2}$, qui est associée au double de la fréquence nominale de l'impulsion (I) à caractériser selon la première (x) des directions du capteur d'images matriciel (3), et qui est aussi associée au double de la fréquence nominale de l'impulsion à caractériser selon la seconde (y) desdites directions du capteur d'images matriciel, encore lorsque les signaux de détection délivrés sont exprimés en fonction des contributions de retard créées par des déplacements respectifs selon les deux directions du capteur d'images matriciel, et l'unité de traitement (4) est configurée en outre pour calculer des transformées de Fourier unidimensionnelles respectives des composantes $F_{2,0}$ et $F_{2,2}$ par rapport aux contributions de retard qui sont créées par les déplacements selon la première (x) des directions du capteur d'images matriciel (3), lesdites transformées de Fourier unidimensionnelles étant notées $TF_1(F_{2,0})$ pour la composante $F_{2,0}$, et $TF_1(F_{2,2})$ pour la composante $F_{2,2}$,

et pour déduire les valeurs instantanées du module et de la phase de l'amplitude complexe ($A(t)$) du champ de l'impulsion (I), à partir d'un résultat de $TF_1(F_{2,0}) - 2 \cdot \text{Mod}[TF_1(F_{2,2})]$, où $\text{Mod}[\cdot]$ désigne un module de nombre complexe.

[Revendication 8] Procédé de caractérisation d'une impulsion (I) de rayonnement électromagnétique par fenêtrage optique résolu en temps, exécuté en utilisant un système (10) conforme à l'une quelconque des revendications précédentes, et suivant lequel l'impulsion (I) à caractériser possède un spectre tel que toutes les valeurs de longueur d'onde qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles soient en dehors d'un intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel (3), et tel que des résultats de divisions par deux desdites valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles, soient à l'intérieur dudit intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel.

[Revendication 9] Procédé selon la revendication 8, suivant lequel l'intervalle spectral de détection du capteur d'images matriciel (3) est un intervalle spectral de sensibilité dudit capteur d'images matriciel, ledit intervalle spectral de sensibilité excluant toutes les valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion (I) qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles, et contenant les résultats des divisions par deux desdites valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles.

[Revendication 10] Procédé selon la revendication 9, suivant lequel le capteur d'images matriciel (3) est d'un type à base de silicium, et toutes les valeurs de longueur d'onde du spectre de l'impulsion (I) à caractériser qui correspondent à des amplitudes spectrales non-nulles, sont comprises entre 1200 nm et 2400 nm.

[Fig. 1c]

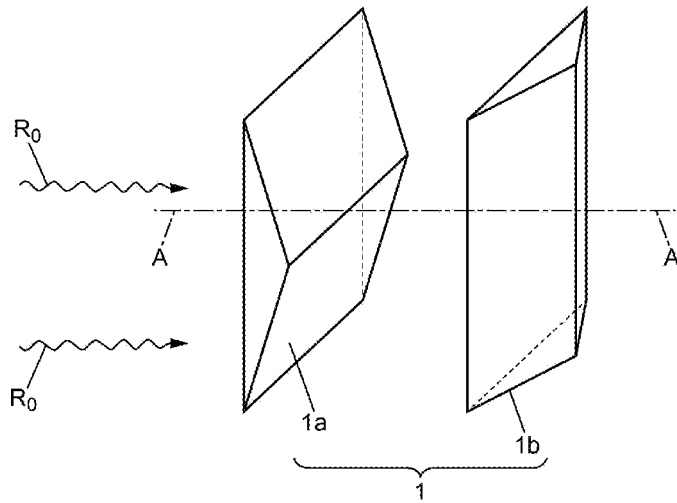


FIG. 1c

[Fig. 2]

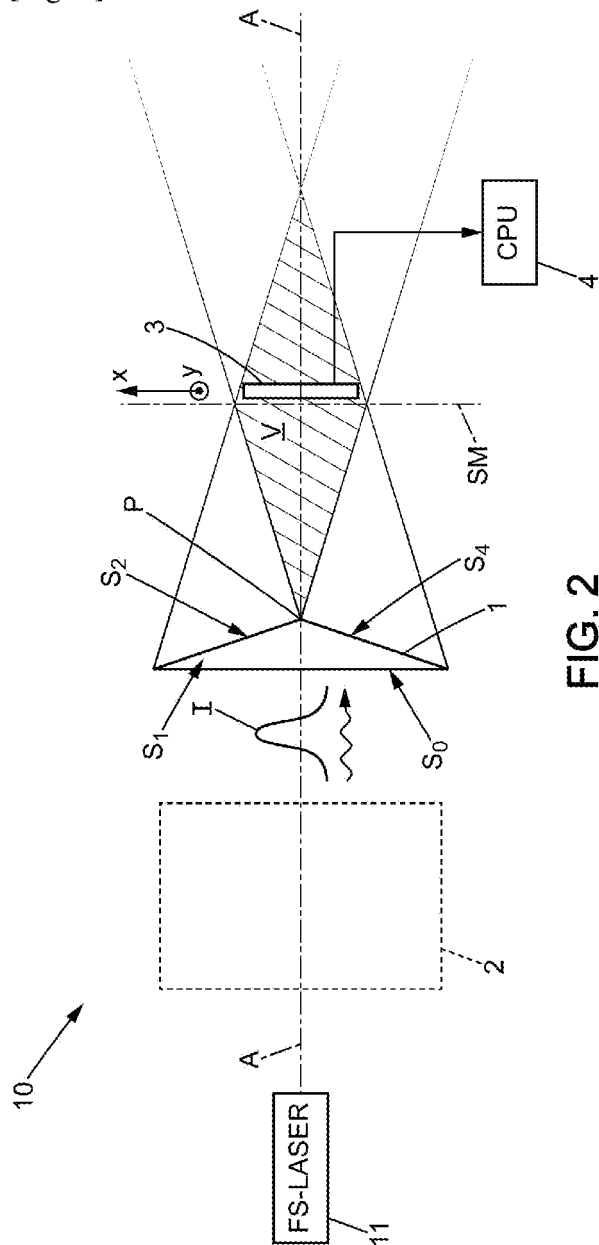
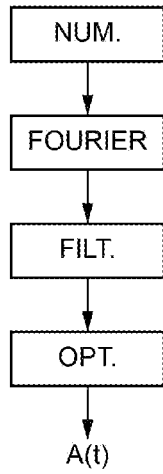


FIG. 2

[Fig. 3]

FIG. 3



[Fig. 4]

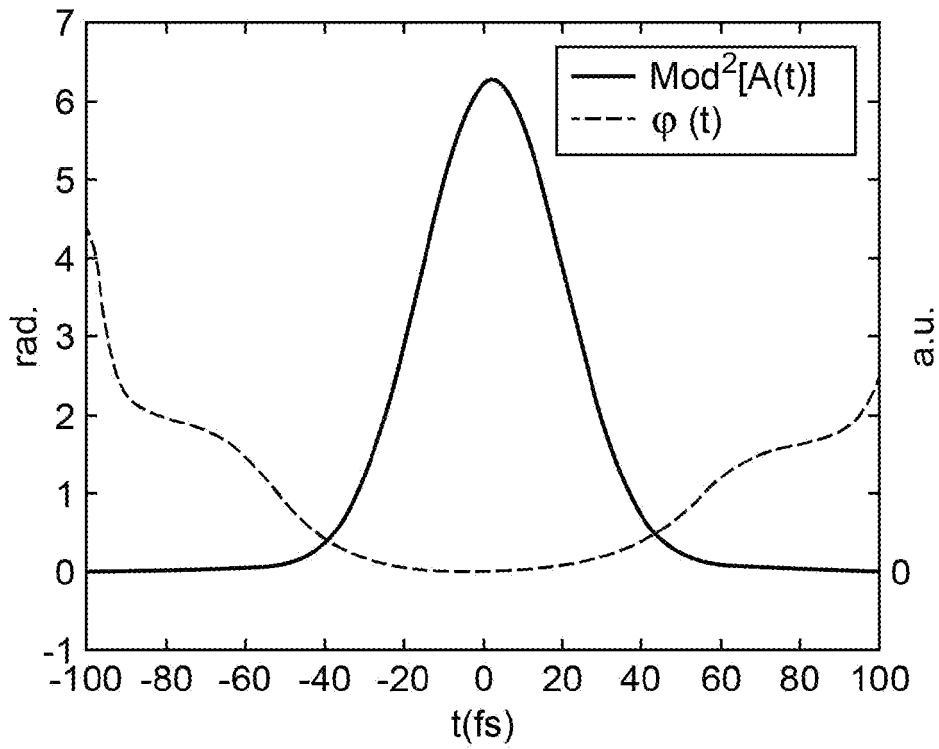


FIG. 4



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

FA 888201
FR 2012605

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS | | Revendication(s) concernée(s) | Classement attribué à l'invention par l'INPI |
|---|--|--|--|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | | |
| A | FR 3 034 577 A1 (UNIV BOURGOGNE [FR]; CENTRE NAT DE LA RECH SCIENTIFIQUE(CNRS) [FR]) 7 octobre 2016 (2016-10-07) * figure 1 * * page 9, ligne 9 - page 12, ligne 9 * ----- | 1-10 | G01B9/02 H01S3/00 G01J11/00 |
| A | US 2002/057435 A1 (TREBINO RICK P [US]) 16 mai 2002 (2002-05-16) * figure 2 * * alinéas [0025] - [0046] * ----- | 1,8 | |
| A | DE 100 28 756 A1 (FORSCHUNGSVERBUND BERLIN EV [DE]; BREMER INST FUER ANGEWANDTE ST [DE]) 10 janvier 2002 (2002-01-10) * figure 1 * * alinéas [0033] - [0039] * ----- | 1,8 | |
| A | WO 2010/089511 A1 (ECOLE POLYTECH [FR]; SIMON FRANCOIS ETIENNE LOUIS [FR] ET AL.) 12 août 2010 (2010-08-12) * figure 1 * ----- | 1,8 | |
| | | | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) |
| | | | G01J |
| Date d'achèvement de la recherche | | Examineur | |
| 9 août 2021 | | Jacquin, Jérôme | |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS | | T : théorie ou principe à la base de l'invention | |
| X : particulièrement pertinent à lui seul | | E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. | |
| Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie | | D : cité dans la demande | |
| A : arrière-plan technologique | | L : cité pour d'autres raisons | |
| O : divulgation non-écrite | | | |
| P : document intercalaire | | & : membre de la même famille, document correspondant | |

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2012605 FA 888201**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **09-08-2021**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité au rapport de recherche | | Date de publication | Membre(s) de la famille de brevet(s) | Date de publication |
|---|----|------------------------|---|------------------------|
| FR 3034577 | A1 | 07-10-2016 | EP 3278407 A1 | 07-02-2018 |
| | | | FR 3034577 A1 | 07-10-2016 |
| | | | WO 2016156391 A1 | 06-10-2016 |
| ----- | | | | |
| US 2002057435 | A1 | 16-05-2002 | AUCUN | |
| ----- | | | | |
| DE 10028756 | A1 | 10-01-2002 | DE 10028756 A1 | 10-01-2002 |
| | | | EP 1197736 A2 | 17-04-2002 |
| | | | US 2002033947 A1 | 21-03-2002 |
| ----- | | | | |
| WO 2010089511 | A1 | 12-08-2010 | FR 2942036 A1 | 13-08-2010 |
| | | | WO 2010089511 A1 | 12-08-2010 |
| ----- | | | | |