

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 août 2010 (12.08.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/089511 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G01J 11/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2010/050184

(22) Date de dépôt international :
4 février 2010 (04.02.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0950769 6 février 2009 (06.02.2009) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
ECOLE POLYTECHNIQUE [FR/FR]; Route de
Saclay, F-91120 Palaiseau (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : SIMON,
François, Etienne, Louis [FR/FR]; 25 Boulevard
Pasteur, F-75015 Paris (FR). ZOU, Ji-Ping [FR/FR]; 16
Impasse Elisée Reclus, F-91120 Palaiseau (FR).

(74) Mandataire : PONTET ALLANO & ASSOCIES
SELARL; 25 rue Jean Rostand, Parc Orsay Université,
F-91893 Orsay (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, 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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM,
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : DOUBLE PRISM AUTOCORRELATION DEVICE FOR THE TIME MEASUREMENT OF ULTRA-SHORT
LIGHT PULSES

(54) Titre : DISPOSITIF AUTOCORRELATEUR A BIPRISME POUR LA MESURE TEMPORELLE D'IMPULSIONS DE
LUMIERE ULTRABREVES

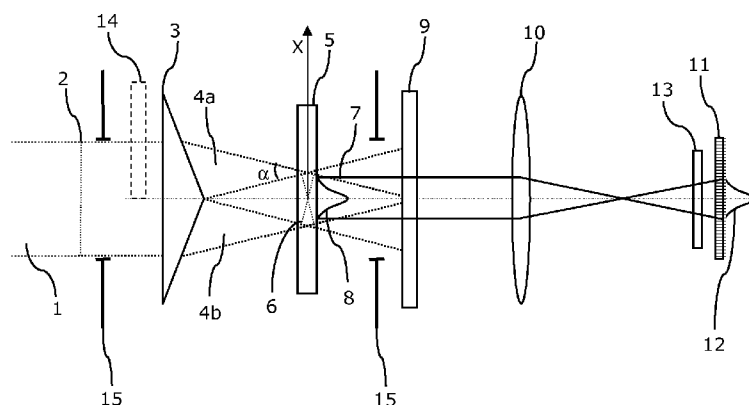


Figure 1

(57) Abstract : The present invention relates to a single-shot optical autocorrelation device for the time measurement of ultra-short light pulses, including: means for dividing an incident light beam at a fundamental optical frequency into two replicated beams; means for recombining said replicated beams, arranged so that the replicated beams cross each other and define an angle other than zero therebetween; a nonlinear optical element placed substantially at the crossing of said replicated beams so as to generate a dual light beam with an optical frequency equal to the sum of the optical frequencies of the two replicated beams; characterised in that the device further comprises, as division means and recombination means, a unitary optical splitter having a shape which is symmetrical to that of the a plane.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2010/089511 A1



Publiée :

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

La présente invention concerne un dispositif autocorrélateur optique monocoup pour la mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves, comprenant : - Des moyens de division d'un faisceau de lumière incident à une fréquence optique fondamentale en deux faisceaux répliqués, - Des moyens de recombinaison desdits faisceaux répliqués, agencés de telle sorte que les faisceaux répliqués se croisent en formant un angle non nul entre eux, - Un élément optique non linéaire placé sensiblement au point de croisement desdits faisceaux répliqués, de telle sorte à générer un faisceau de lumière doublé, avec une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques des deux faisceaux répliqués, Caractérisé en ce qu'il comprend en outre, au titre des moyens de division et des moyens de recombinaison, un diviseur optique monobloc présentant une symétrie de forme par rapport à un plan.

« Dispositif autocorrélateur à biprisme pour la mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves »

Domaine technique

5 La présente invention concerne un dispositif autocorrélateur pour la mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves. Elle concerne également un procédé de mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves.

10 Le domaine de l'invention est plus particulièrement mais de manière non limitative celui de la caractérisation temporelle des impulsions de lumière ultrabrèves, picosecondes, femtosecondes et attosecondes.

Etat de la technique antérieure

15 La caractérisation temporelle des impulsions de lumière ultrabrèves, et en particulier leur forme et leur durée, est d'importance croissante à mesure que les applications industrielles des lasers femtosecondes se développent. Dans certaines de ces applications, telles que par exemple la chirurgie oculaire, il est crucial de maîtriser à la fois la quantité d'énergie et la puissance instantanée délivrée par chaque impulsion de lumière, et donc de maîtriser à la fois leur forme et leur stabilité.

20 Il devient donc également indispensable de pouvoir disposer d'appareils simples à mettre en œuvre et efficaces pour effectuer ces mesures.

25 Dans toute la suite, nous appelons « impulsions de lumière ultrabrèves » des impulsions de lumière dont la durée temporelle est de l'ordre de la picoseconde ou plus courte (femtoseconde voire attoseconde). Ce sont des impulsions dont les mesures de forme ne peuvent pas être effectuées directement avec des dispositifs optoélectroniques classiques tels que des photodétecteurs, caméras à fente, etc., du fait de la bande passante fréquentielle qui serait nécessaire.

30 On connaît de longue date les corrélateurs optiques, qui permettent de mesurer la fonction de corrélation en intensité de deux impulsions lumineuses en les combinant dans un milieu optique non linéaire de telle sorte à générer un signal dont la fréquence correspond à la somme des fréquences optiques des deux impulsions. Lorsque l'on combine une
35 impulsion avec sa propre réplique, on aboutit à un autocorrélateur qui

permet justement de contrôler les caractéristiques de forme et de largeur temporelle de cette impulsion lumineuse. Comme la fréquence optique du signal généré dans le milieu optique non linéaire est égale au double de la fréquence optique de l'impulsion, les mécanismes non linéaires employés dans ces systèmes sont appelés « génération de seconde harmonique » ou en anglais « second harmonic generation, SHG » et ces systèmes sont appelés des autocorrélateurs en intensité du second ordre.

Afin de pouvoir décrire la totalité de la fonction d'autocorrélation de l'impulsion, il est nécessaire d'introduire un retard variable entre cette impulsion lumineuse et sa réplique. Cela peut se réaliser de deux manières :

- Avec une ligne à retard optique, dans un montage de type interféromètre de Michelson par exemple. On sépare les deux répliques de l'impulsion lumineuse incidente entre les deux bras de l'interféromètre, on fait varier leur retard relatif en faisant varier la longueur de l'un des bras de l'interféromètre, on recombine les deux impulsions en les faisant se croiser dans un cristal non-linéaire et on mesure la fonction d'autocorrélation avec un détecteur ponctuel situé dans l'axe du montage. De tels montages sont appelés autocorrélateurs multicoups parce qu'ils nécessitent une impulsion lumineuse par mesure de la fonction d'autocorrélation, pour chaque valeur de retard. Ils ont l'inconvénient notable d'être tributaires de la fréquence de répétition du laser ou de l'amplificateur.

- Il est également possible de générer le retard optique en faisant se croiser dans le cristal non-linéaire deux faisceaux optiques suffisamment larges et spatialement homogènes, et en enregistrant la fonction d'autocorrélation instantanément avec un détecteur matriciel (CCD, barrette de photodiodes etc.) placé dans le plan d'incidence des deux faisceaux. Dans ce cas, chaque pixel du détecteur enregistre la fonction d'autocorrélation de l'impulsion lumineuse correspondant à une valeur différente du retard optique. De tels montages sont appelés autocorrélateurs monocoups parce qu'ils permettent d'enregistrer la fonction d'autocorrélation avec une seule impulsion lumineuse. Il faut noter toutefois que le montage optique en amont du cristal non-linéaire est substantiellement le même que pour les autocorrélateurs multicoups car il

faut également séparer et recombinaer deux répliques de l'impulsion lumineuse.

On connaît le document WO 02 091116 de Q. Fu, S.P. Nikitin et A.V. Masalov, intitulé « Appartus and method for measuring intensity and phase of a light pulse with an interferometric asymmetric single-shot autocorrelator » qui décrit un dispositif basé sur un montage autocorrélateur monocoup. Ce dispositif permet en outre de lever l'ambiguïté de signe de l'axe des temps, et également de déterminer le signe de la modulation de phase. Ce résultat est obtenu en combinant tout ou partie des faisceaux issus du cristal non-linéaire et captés par le détecteur CCD, et en appliquant des algorithmes complexes pour en extraire le signal analytique. Au niveau optique, la séparation de l'impulsion lumineuse en deux répliques se fait toujours de manière classique avec un séparateur de faisceaux (« beam splitter »).

On connaît le document WO 02 31456 de N.D. Whitbread et A.C. Carter, intitulé « Optical autocorrelator » qui s'affranchi du montage optique interférométrique classique en réalisant le dédoublement temporel de l'impulsion lumineuse par génération de deux ondes contrapropagatives dans un guide d'onde. La non-linéarité est dans ce cas introduite par un phénomène d'absorption à deux photons dans le matériau constituant le guide d'onde.

On connaît le document WO 04 109345 de G. Ramos-Or-Tiz, M. Cha, S.R. Marder, B. Kippelen intitulé « Third order optical autocorrelator for time domain operation at the telecommunication wavelength » qui utilise une non-linéarité du troisième ordre afin d'obtenir notamment une meilleure sensibilité. Cette technique nécessite l'introduction d'un retard variable entre les deux répliques de l'impulsion lumineuse, réalisé grâce à un montage interférométrique optique classique à deux bras avant l'élément non-linéaire. Elle fait également appel à une algorithmique assez complexe pour obtenir la forme de l'impulsion.

Ces dispositifs permettent d'effectuer des caractérisations très complètes des impulsions optiques ultracourtes, mais ils ont par contre l'inconvénient de nécessiter la mise en œuvre de moyens optiques et algorithmiques complexes, donc potentiellement chers et délicates.

Le but de la présente invention est au contraire de proposer un dispositif de mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves adapté à des applications de routine qui soit instantané, simple à mettre en œuvre, compact, robuste et d'un coût modéré.

- 5 La présente invention propose aussi un procédé de mesure temporelle d'impulsions de lumière ultrabrèves satisfaisant aux mêmes critères

Exposé de l'invention

Cet objectif est atteint avec un dispositif autocorrélateur optique monocoup comprenant :

- 10 - des moyens de division d'un faisceau de lumière incident à une fréquence optique fondamentale en deux faisceaux répliqués,
- des moyens de recombinaison desdits deux faisceaux répliqués, agencés de telle sorte que les deux faisceaux répliqués se croisent en formant un angle non nul entre eux,
15 - un élément optique non linéaire placé sensiblement au point de croisement desdits faisceaux répliqués, de telle sorte à générer un faisceau de lumière doublé, avec une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques des deux faisceaux répliqués,

Caractérisé en ce qu'il comprend en outre, au titre des moyens de
20 division et des moyens de recombinaison, un diviseur optique monobloc présentant une symétrie de forme par rapport à un plan.

Par diviseur optique monobloc, on comprend un élément rigide, donc sans pièces mobiles ni ajustables, dans lequel le faisceau incident est séparé en deux faisceaux répliqués au moyen de réfractions et/ou de
25 réflexions, lesquelles faisceaux répliqués étant orientés de telle sorte qu'ils se croisent avec un angle non nul.

De manière préférentielle, les deux faisceaux répliqués sont générés par division du front d'onde du faisceau incident.

Le diviseur optique monobloc peut avantageusement comprendre un
30 biprisme en matériau transparent à une longueur d'onde d'intérêt, de section triangulaire.

L'utilisation de ce diviseur optique monobloc en lieu et place des montages interférométriques à base de cubes ou lame séparatrices, rétroreflecteurs et miroirs décrits dans l'art antérieur ne constitue pas une

simple variante mais introduit une simplification drastique de l'autocorrélateur optique monocoup. En effet :

- Les contraintes d'alignement et les besoins de stabilité mécanique du dispositif, qui peut être réalisé avec tous les composants simplement centrés sur l'axe optique du faisceau incident, sont considérablement réduits ;

- La nécessité d'ajuster précisément par réglage les longueurs des trajets optiques des deux faisceaux répliqués disparaît. Dans la mesure où le diviseur optique monobloc est placé perpendiculairement au faisceau incident et centré sur son axe optique, il engendre deux répliques d'intensité sensiblement égale, lesquelles deux répliques se croisent sur l'axe optique du faisceau incident en ayant parcouru sensiblement la même distance optique.

Ces dispositions rendent la construction et le réglage du dispositif particulièrement aisés.

L'élément optique non linéaire peut comprendre un cristal non linéaire quadratique taillé de telle sorte à obtenir un accord de phase à la fréquence double de la fréquence optique du faisceau incident. Le cristal non linéaire peut être constitué de l'un parmi les matériaux suivants : BBO, LiO₃, KDP, KTP, ou de tout autre matériau permettant d'obtenir l'effet voulu à la longueur d'onde d'intérêt.

L'élément optique non linéaire est de préférence de faible épaisseur, par exemple une épaisseur comprise entre 1mm et 50µm, avantageusement entre 100µm et 500µm.

Le dispositif selon l'invention peut comprendre en outre des moyens de filtrage optique placés après l'élément optique non linéaire et bloquant la lumière à la fréquence optique fondamentale.

Il peut également comprendre des moyens de détection permettant la mesure de l'intensité lumineuse du faisceau de lumière doublé en fréquence selon une ligne, une pluralité de lignes ou un plan. Ces moyens de détection peuvent avantageusement comprendre un détecteur matriciel CCD.

Les moyens de filtrage optique peuvent être réalisés par une différence de sensibilité des moyens de détection aux fréquences optiques respectivement fondamentale et doublée, lesdits moyens de détection étant

dans ce cas significativement moins sensibles à la fréquence optique fondamentale qu'à la fréquence doublée.

Les moyens de détection peuvent être directement accolés à la face de sortie de l'élément non-linéaire.

- 5 Le dispositif peut comprendre également des moyens optiques d'imagerie du faisceau de lumière doublé en fréquence, à grandissement fixe ou ajustable.

10 Le dispositif selon l'invention peut comprendre en outre des moyens d'accroissement de la dynamique de détection, insérés dans le trajet du faisceau de lumière doublée en fréquence.

Les moyens d'accroissement de la dynamique de détection peuvent comprendre une lame d'atténuation variable insérée dans le trajet du faisceau de lumière doublée en fréquence,

- 15 - ladite lame d'atténuation présentant des coefficients de transmission différents de part et d'autre de sa ligne médiane,

- ladite lame d'atténuation étant positionnée de telle sorte que le faisceau de lumière doublé, en la traversant, est partagé en deux demi-faisceaux d'intensité différente.

20 Les deux demi-faisceaux représentent la même fonction d'autocorrélation avec des intensités différentes. On tire ainsi profit des propriétés de symétrie du signal généré pour exploiter au mieux la dynamique de détection et en particulier pouvoir analyser en même temps la forme globale de l'impulsion et la forme des pieds de courbe qui serait sinon noyée dans le bruit.

- 25 Il est important de noter que ce moyen d'accroissement de la dynamique de détection n'est nullement limité au dispositif selon l'invention mais peut être avantageusement mis en œuvre dans tous les cas où on a à détecter des signaux présentant des propriétés de symétrie comparables.

30 Le dispositif selon l'invention peut en outre comprendre des moyens pour remplacer en cours d'opération le diviseur optique monobloc par un diaphragme. Plusieurs diviseurs optiques monoblocs et diaphragmes peuvent être montés dans une pièce mobile. Cette pièce peut être par exemple une tourelle, une roue, une platine de translation, motorisée ou manuelle, se déplaçant en rotation ou en translation, qui positionne les

éléments à la demande dans le faisceau de lumière incident, à une distance correcte de l'élément optique non-linéaire, et alignés sur l'axe optique.

Le dispositif peut en outre comprendre des moyens d'alignement comportant au moins deux repères d'axe disposés sensiblement le long de l'axe optique du faisceau de lumière incident de telle sorte à matérialiser le trajet du faisceau de lumière dans ledit dispositif lorsque le diviseur optique monobloc est retiré. Les repères d'axe peuvent notamment comprendre au moins deux diaphragmes, ou au moins un diaphragme et un repère numérique sur la caméra.

De cette manière, le dispositif peut être aisément aligné en le positionnant relativement au faisceau de lumière incident de telle sorte à optimiser le faisceau de lumière doublé.

Le dispositif selon l'invention peut en outre comprendre des moyens de calibration de la fonction de transfert temporelle. Ces moyens de calibration peuvent comprendre une lame introduisant un retard optique de valeur connue, pouvant être insérée dans le faisceau de lumière incident avant le diviseur optique monobloc, de telle sorte à retarder l'un des deux faisceaux répliqués par rapport à l'autre d'une quantité déterminée.

Cette calibration consiste à :

- relever la position, sur les moyens de détection par exemple, de la fonction d'autocorrélation en présence et en l'absence de la lame respectivement, et
- connaissant le retard introduit, calculer la fonction de transfert temporelle du dispositif à partir de cette différence de position de la fonction d'autocorrélation.

La présente invention concerne également un procédé de mesure monocoup d'une fonction d'autocorrélation optique selon lequel :

- un faisceau de lumière incident à une fréquence optique fondamentale est divisé en deux faisceaux répliqués,
- lesdits deux faisceaux répliqués sont recombinaés de telle sorte qu'ils se croisent en formant un angle non nul entre eux,
- un faisceau de lumière doublé, avec une fréquence optique sensiblement égale à la somme des fréquences optiques des deux faisceaux répliqués, est généré dans un élément optique non linéaire placé sensiblement au point de croisement desdits faisceaux répliqués,

caractérisé en ce que la division et la recombinaison des faisceaux est effectuée par un diviseur optique monobloc présentant une symétrie de forme par rapport à un plan.

La résolution temporelle de la mesure peut être modifiée en changeant
5 l'angle d'intersection des deux faisceaux répliqués, et donc la taille de leur zone d'interaction dans l'élément optique non linéaire. Ce changement d'angle d'intersection des deux faisceaux peut être effectué en changeant le diviseur optique monobloc inséré dans le faisceau incident.

Ce procédé confère au dispositif selon l'invention une grande souplesse
10 d'utilisation, en permettant la mesure de largeurs d'impulsions dans une gamme très large, allant des picosecondes aux attosecondes, tout en conservant une mise en œuvre simple.

Description des figures et modes de réalisation

D'autres avantages et particularités de l'invention apparaîtront à la
15 lecture de la description détaillée de mises en œuvre et de modes de réalisation nullement limitatifs, et des dessins annexés suivants :

- la figure 1 illustre un mode de réalisation du dispositif selon l'invention,
- la figure 2 est un exemple de mesure effectuée avec le dispositif selon la figure 1,
- 20 - la figure 3 illustre la procédure de calibrage du dispositif selon la figure 1,
- la figure 4 est un exemple de mesures effectuées au cours de la procédure de calibrage du dispositif selon la figure 1,
- la figure 5 est un schéma d'une lame traitée de telle sorte à présenter
25 une atténuation variable en fonction de la position, permettant d'étendre la dynamique de détection,
- la figure 6 est un exemple de réalisation d'un diviseur optique monobloc autre qu'un biprisme.

On va décrire, en référence à la figure 1, un mode de réalisation
30 préférentiel du dispositif selon l'invention.

Le faisceau incident 1 à la longueur d'onde fondamentale est issu typiquement d'un laser pulsé. On peut raisonnablement considérer ce faisceau comme sensiblement collimaté et spatialement homogène, ce qui correspond aux conditions optimales d'utilisation du dispositif selon
35 l'invention. Un front d'onde de ce faisceau est représenté en 2.

Dans un autocorrélateur optique monocoup de l'art antérieur, le faisceau incident est divisé en deux répliques et ces répliques sont recombinaisonnées au moyen d'un montage de type interférométrique à base de séparateurs de faisceaux et de moyens de réflexion séparés, dont il faut
5 ajuster la position et l'alignement avec précision.

Dans le dispositif selon l'invention, ces opérations de séparation et de recombinaisons sont effectuées par une pièce unique, le diviseur optique monobloc 3. Ce diviseur optique monobloc présente une symétrie de forme par rapport à un plan. Il est placé perpendiculairement au faisceau de
10 lumière incident 1, de telle sorte que l'axe optique dudit faisceau soit contenu dans son plan de symétrie. De cette manière, le diviseur optique monobloc 3 sépare le faisceau de lumière incident 1 en deux faisceaux répliqués 4a et 4b qui se croisent sur l'axe optique du faisceau incident en formant un angle non nul α entre eux. Selon une caractéristique
15 avantageuse, le trajet optique effectué par les deux demi faisceaux est sensiblement identique. Par trajet optique nous entendons la distance géométrique multipliée par l'indice de réfraction des matériaux traversés.

Selon un mode de réalisation préférentiel du dispositif selon l'invention, ce diviseur optique monobloc est un biprisme de section
20 triangulaire 3 dont la base est de dimensions sensiblement supérieures au diamètre du faisceau de lumière incident. Ce biprisme est disposé de telle sorte que le faisceau de lumière incident pénètre par sa base perpendiculairement à cette dernière, et que l'axe optique dudit faisceau de lumière incidente passe par son sommet. Il est avantageusement réalisé
25 par usinage d'un bloc de N-BK7, sa base a des dimensions de 15 mm x 15 mm et les faces forment un angle de 14 degrés avec la base. Selon une autre réalisation également mise en œuvre dans un dispositif suivant l'invention, les faces forment un angle de 24 degrés avec la base.

Il est à noter que d'autres modes de réalisation du diviseur optique
30 monobloc sont possibles sans sortir du champ de l'invention. Un exemple en est montré à la figure 6, dans lequel le faisceau de lumière incident 1 est divisé en deux faisceaux répliqués 4a et 4b au moyen d'un élément prismatique 41 comportant des traitements réfléchissants 42 sur certaines parties de ses faces.

Un élément optique non linéaire 5 est placé à l'intersection des deux faisceaux répliqués, de telle sorte à engendrer une interaction non linéaire entre ces deux faisceaux. Cette interaction peut être obtenue, par exemple, par génération de seconde harmonique, autodiffraction, ou génération de
 5 seconde harmonique activée par polarisation (« polarization gating » en Anglais). L'élément optique non-linéaire 5 peut par exemple être constitué de l'un parmi les matériaux suivants : BBO, LiO3, KDP, KTP.

Avantageusement, cet élément optique non linéaire 5 est un cristal de BBO permettant de mettre en œuvre le phénomène de génération de
 10 seconde harmonique, taillé et positionné de telle sorte à obtenir un accord de phase à la fréquence double de la fréquence optique du faisceau incident à 1057 nm. Ses dimensions sont de l'ordre de 15 mm x 15 mm avec une épaisseur de 1 mm. Selon une autre réalisation, ses dimensions sont de l'ordre de 5 mm x 5 mm avec une épaisseur de 100 µm, ou 500 µm, ou 50
 15 µm. La tolérance angulaire permise avec ce cristal de BBO sur l'orientation de la polarisation du faisceau de lumière incidente est de 22.8 degrés.

Les deux répliques du faisceau incident, en se croisant dans le cristal non linéaire, donnent naissance en chaque point de leur zone de recouvrement à un faisceau somme 7, de fréquence optique égale au
 20 double de la fréquence optique du faisceau incident, dont le vecteur de propagation correspond à la somme vectorielle des vecteurs de propagation des répliques du faisceau incident. Ce faisceau somme est appelé dans la suite le faisceau de lumière doublé. Ce faisceau doublé 7 se propage donc parallèlement à l'axe optique du dispositif, qui peut être assimilé dans le
 25 mode de réalisation préférentiel à l'axe optique du faisceau incident.

On définit l'axe X comme étant lequel l'axe est situé dans le plan d'incidence des répliques, perpendiculairement à l'axe optique du système. L'intensité 8 $S(x)$ de ce faisceau doublé 7 le long de l'axe X est proportionnelle à la valeur de la fonction de corrélation en intensité des
 30 deux répliques pour un décalage temporel 2τ , qui est proportionnel à la distance x à l'axe optique. Ce décalage est illustré par la représentation de leurs fronts d'ondes respectifs 6. Avec c la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice de réfraction du matériau non-linéaire on a :

$$\tau = \frac{1}{c} n x \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right);$$

Et en supposant une intensité de l'impulsion lumineuse $I(t)$ identique dans les deux faisceaux répliqués,

$$S(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t + \tau) I(t - \tau) dt.$$

On peut ajuster la largeur spatiale de la fonction d'autocorrélation, et
5 donc la résolution et l'étendue de mesure du dispositif en faisant varier l'angle d'incidence α des faisceaux répliqués. Et comme cet angle est entièrement déterminé par le diviseur optique monobloc, il suffit de changer ce dernier.

Selon un mode de réalisation préférentiel du dispositif selon
10 l'invention, plusieurs diviseurs optiques monoblocs 3 sont montés dans une roue, de préférence motorisée, qui permet par rotation de changer celui qui est inséré dans le faisceau. Ces diviseurs optiques monoblocs sont positionnés dans la roue (non représentée) de telle sorte que chacun d'entre eux soit placé à la distance correcte de d'élément non linéaire afin
15 que les faisceaux répliqués se croisent dans ce dernier. Tout autre moyen de remplacement des diviseurs optiques monoblocs, motorisé ou non, peut bien entendu être envisagé sans sortir du champ de l'invention.

De cette manière, le dispositif selon l'invention offre une grande souplesse d'adaptation de la résolution et de l'étendue de mesure, de telle
20 sorte à pouvoir mesurer des impulsions picosecondes, femtosecondes voire attosecondes dans des conditions optimales.

Selon le mode de réalisation préférentiel, le dispositif comprend en outre :

- des moyens de filtrage optique 9,
- 25 - des moyens d'imagerie du faisceau doublé 10,
- des moyens de détection 11.

Les moyens de filtrage optique sont de préférence constitués par une lame optique de filtrage comportant un traitement de surface, de telle sorte à bloquer la lumière à la fréquence fondamentale et laisser passer la
30 lumière à la fréquence double, ladite lame de filtrage étant insérée après l'élément non-linéaire.

Les moyens de filtrage optique 9 peuvent également, sans sortir du champ de l'invention, consister en :

- des moyens de filtrage spatial tels que par exemple un diaphragme ou une fente, la lumière à la fréquence optique fondamentale et la lumière à la fréquence double étant séparées spatialement,

- des traitements de surface appliqués sur tout ou partie des éléments
5 suivants : face de sortie de l'élément non-linéaire, moyens d'imagerie, moyens de détection,

- des moyens de détection sensibles à la fréquence optique doublée mais significativement moins sensibles à la fréquence optique fondamentale.

10 Les moyens d'imagerie 10 sont préférentiellement mais de manière non limitative constitués d'une ou plusieurs lentilles en LASN9 notamment avec des distances focales de l'ordre de 25 mm. Ils permettent d'imager avec un grandissement fixe ou variable la fonction d'autocorrélation de l'impulsion 12 sur les moyens de détection 11. Dans le mode de réalisation
15 préférentiel, ces moyens d'imagerie permettent deux grandissements fixes, x1 et x2, sélectionnables par l'opérateur.

Les moyens de détection consistent de préférence en une matrice CCD, avantageusement intégrée dans une caméra numérique à 12 bits. Mais ce peut être aussi de manière non limitative une ou plusieurs barrettes CCD ou
20 de photodiodes, voire un dispositif de balayage devant un photodétecteur ponctuel.

Selon un autre mode de réalisation, le dispositif selon l'invention ne comporte pas de moyens de filtrage 9, d'imagerie du faisceau doublé 10 et de détection 11. Le faisceau doublé comportant la fonction d'autocorrélation
25 de l'impulsion lumineuse est directement visible sur la face de sortie de l'élément non linéaire 5.

Selon un autre mode de réalisation enfin, le dispositif selon l'invention ne comporte pas de moyens d'imagerie du faisceau doublé 10. Les moyens de filtrage 9 et de détection 11 sont directement accolés à la face de sortie
30 de l'élément non-linéaire 5.

Le dispositif selon l'invention peut comporter en outre des moyens d'accroissement de la dynamique de détection consistant en une lame d'atténuation variable 13 insérée dans le trajet du faisceau de lumière doublée. Cette lame d'atténuation 13 présente des coefficients de
35 transmission différents de part et d'autre de sa ligne médiane, et elle est

positionnée dans le dispositif de telle sorte que le faisceau de lumière doublé, en la traversant, est partagé en deux demi-faisceaux d'intensité différente qui représentent la même fonction d'autocorrélation avec des intensités différentes.

5 Il est possible de cette manière de mesurer la forme des impulsions lumineuses avec une dynamique en intensité très supérieure à la dynamique intrinsèque du détecteur, afin par exemple de mesurer à la fois la hauteur totale et la forme du pied de courbe de l'impulsion.

10 On tire parti de la propriété remarquable du dispositif selon laquelle, comme illustré dans les figures 2 et 4, l'image de la fonction d'autocorrélation est visible sur une grande partie de la hauteur du faisceau. Ainsi, les profils affichés dans les figures 2 et 4 ne sont qu'une ligne horizontale prise dans l'image du capteur CCD.

15 La figure 5 montre un exemple, non limitatif, de réalisation d'une lame d'atténuation 13. Cette lame, en N-BK7, de forme rectangulaire, est séparée dans le sens de sa largeur en deux parties 30 et 31. La partie 31 ne comporte aucun traitement de surface tandis que la partie 30 comporte un échelon de densités optiques obtenu, selon un mode de réalisation préférentiel, par un dépôt métallique de chrome. Cet échelon de densités
20 optiques est constitué de plages rectangulaires de densité optique uniforme, de dimensions supérieures au diamètre du faisceau doublé 7, et dont les valeurs de densité sont croissantes selon la direction 32.

Selon un exemple typique mais non limitatif de mise en œuvre, on place la lame d'atténuation 13 devant le détecteur 11 en positionnant dans
25 l'axe du faisceau une densité 30 adaptée. On obtient ainsi simultanément sur le détecteur deux demi-images de la fonction d'autocorrélation avec des amplitudes très différentes, dont par exemple :

- une demi-image où le corps de l'impulsion est saturé mais le pied de courbe bien représenté,
- 30 - et une autre demi-image où l'impulsion est complète et pas saturée.

Il est possible en déplaçant la lame d'atténuation, horizontalement dans le cas représenté, d'ajuster l'atténuation 30 aux besoins. Le ratio des atténuations étant connu puisqu'il est fonction de la position de la lame, un profil avec une dynamique supérieure à celle du détecteur peut être obtenu
35 numériquement en combinant les profils d'impulsions extraits des deux

demi-images. Il est par exemple possible d'obtenir avec ce procédé des profils d'impulsion avec une dynamique totale de 10^6 avec un capteur CCD dont la dynamique est typiquement de quelques 10^3 .

5 Afin de constituer un appareil autonome, facile à mettre en œuvre, le dispositif selon l'invention peut comporter des moyens d'alignement avec le faisceau de lumière incident : au moins deux diaphragmes 15 sont disposés de part et d'autre du diviseur optique monobloc, de telle sorte à matérialiser le trajet du faisceau de lumière dans le dispositif. Selon le mode de réalisation préférentiel, ces diaphragmes sont largement ouverts lors des
10 mesures d'impulsions pour ne pas perturber le faisceau et peuvent être resserrés lors de la procédure d'alignement.

Lors de l'alignement, le diviseur optique monobloc 3 est retiré du trajet du faisceau de lumière incident. Selon le mode de réalisation préférentiel, cela se fait en faisant tourner la roue portant les diviseurs
15 optiques monoblocs de sorte à placer un emplacement vide devant le faisceau. Il est également possible de placer l'un des diaphragmes 15 en position resserrée dans l'un des emplacements de cette roue. Le dispositif ou le faisceau de lumière incident sont alors positionnés de telle sorte à optimiser le faisceau de lumière doublé sur le détecteur.

20 De même, le dispositif selon l'invention peut comporter des moyens de calibration. Cette calibration consiste à calculer la fonction de transfert du dispositif, ou en d'autres termes, à faire correspondre une échelle de temps (la durée de l'impulsion) à la surface du détecteur (le nombre de pixels dans le cas d'un CCD). Cette fonction de transfert dépend :

- 25 - De l'angle de convergence α des deux répliques, déterminé par le diviseur optique monobloc inséré dans le faisceau, lequel diviseur optique monobloc pouvant être changé dans le mode de réalisation préférentiel ;
- Du grandissement des moyens d'imagerie. Selon le mode de réalisation préférentiel, des grandissements de x_1 et x_2 sont possibles ;
- 30 - De la taille et du nombre de points ou pixels du détecteur.

Selon le mode de réalisation préférentiel, les moyens de calibration sont constitués par une lame 14 d'épaisseur e et d'indice de réfraction n_e connus, tel qu'illustré à la figure 3. On insère cette lame devant le diviseur optique monobloc 3 de telle sorte que seule la lumière qui constitue un des

demi-faisceaux répliqués 4a et 4b la traverse. On introduit ainsi un retard entre les répliques 20 et 21 de l'impulsion de lumière initiale,

$$t_e = \frac{1}{c} (n_e - 1) e,$$

5 de valeur connue et qui permet d'étalonner la chaîne d'acquisition complète.

La figure 4 est un exemple de signaux obtenus lors de la calibration. La figure 4b est une mesure sans la lame 14 tandis que la figure 4a est une mesure avec la lame 14 insérée dans le faisceau incident. Dans l'exemple de la figure 4, la lame introduisant un retard $t_e = 1,66 \text{ ps}$ engendre un écart en position sur le détecteur de $465-188 = 277$ pixels, ce qui donne une fonction de transfert de $1,66 \text{ ps} / 277 = 6,01 \text{ fs}$ par pixel.

La figure 2 est un exemple de mesure de la largeur d'une impulsion lumineuse avec un dispositif selon l'invention. L'algorithme utilisé n'est bien entendu qu'un exemple non limitatif pour en illustrer le fonctionnement, mais bien que très simple il n'en reste pas moins tout à fait exploitable :

- on détecte le niveau de la ligne de base $Y_{\min} = 55,6$ et le sommet de l'impulsion $Y_{\max} = 111$;
- on en déduit la largeur à mi-hauteur de la fonction d'autocorrélation $\Delta\tau_c$ de l'impulsion : $X_2 - X_1 = 64$ pixels ce qui correspond à $\Delta\tau_c = 384,64 \text{ fs}$;
- 20 - la relation entre la largeur à mi-hauteur de la fonction d'autocorrélation $\Delta\tau_c$ et celle de l'impulsion $\Delta\tau_p$ dépend de sa forme, qui est connue pour un laser donné. Pour une impulsion de forme gaussienne, telle que présentée dans l'exemple de la figure 2, on a $\Delta\tau_p \approx \Delta\tau_c / 1,55 = 248,15 \text{ fs}$.

25 Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Dispositif autocorrélateur optique monocoup comprenant :

- Des moyens de division d'un faisceau de lumière incident (1) à une
5 fréquence optique fondamentale en deux faisceaux répliqués (4a) et (4b),
- Des moyens de recombinaison desdits faisceaux répliqués, agencés de
telle sorte que les faisceaux répliqués se croisent en formant un angle non
nul entre eux,
- Un élément optique non linéaire (5) placé sensiblement au point de
10 croisement desdits faisceaux répliqués, de telle sorte à générer un faisceau
de lumière doublé (7), avec une fréquence optique égale à la somme des
fréquences optiques des deux faisceaux répliqués,

Caractérisé en ce qu'il comprend en outre, au titre des moyens de
division et des moyens de recombinaison, un diviseur optique monobloc (3)
15 présentant une symétrie de forme par rapport à un plan.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que le diviseur
optique monobloc (3) comprend un biprisme en matériau transparent à une
longueur d'onde d'intérêt, de section triangulaire.

20

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'élément
optique non linéaire (5) comprend un cristal non linéaire quadratique taillé
de telle sorte à obtenir un accord de phase à la fréquence double de la
fréquence optique du faisceau incident.

25

4. Dispositif selon la revendication 3, caractérisé en ce que le cristal non
linéaire (5) est constitué de l'un parmi les matériaux suivants : BBO, LiO₃,
KDP, KTP.

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes,
30 caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de filtrage optique
placés après l'élément optique non linéaire (5) et bloquant la lumière à la
fréquence optique fondamentale.

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de détection (11) permettant la mesure de l'intensité lumineuse du faisceau de lumière doublé en fréquence (7) selon une ligne, une pluralité de lignes ou un plan.

5

7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que les moyens de filtrage optique sont réalisés par une différence de sensibilité des moyens de détection (11) aux fréquences optiques respectivement fondamentale et doublée, lesdits moyens de détection (11) étant significativement moins sensibles à la fréquence optique fondamentale qu'à la fréquence doublée.

10

8. Dispositif selon la revendication 6 ou 7, caractérisé en ce que les moyens de détection (11) comprennent un détecteur matriciel CCD.

15

9. Dispositif selon la revendication 6, 7 ou 8, caractérisé en ce que les moyens de détection (11) sont directement accolés à la face de sortie de l'élément non-linéaire (5).

20

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens optiques d'imagerie (10) du faisceau de lumière doublé en fréquence.

25

11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens d'accroissement de la dynamique de détection, insérés dans le trajet du faisceau de lumière doublée en fréquence.

30

12. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que les moyens d'accroissement de la dynamique de détection comprennent une lame d'atténuation variable (13) insérée dans le trajet du faisceau de lumière doublée en fréquence,

- ladite lame d'atténuation présentant des coefficients de transmission différents de part et d'autre de sa ligne médiane, et

35

- étant positionnée de telle sorte que le faisceau de lumière doublé, en la traversant, est partagé en deux demi-faisceaux d'intensité différente.

13. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens pour remplacer en cours d'opération le diviseur optique monobloc (3) par un diaphragme.

5

14. Dispositif selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il comprend en outre plusieurs diviseurs optiques monoblocs et diaphragmes pouvant être montés dans une pièce mobile.

10 **15.** Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens d'alignement comportant au moins deux repères d'axes (15) disposés sensiblement le long de l'axe optique du faisceau de lumière incident de telle sorte à matérialiser le trajet du faisceau de lumière dans ledit dispositif lorsque le
15 diviseur optique monobloc (3) est retiré.

16. Dispositif selon la revendication 15, caractérisé en ce que les repères d'axes (15) comprennent au moins deux diaphragmes.

20 **17.** Dispositif selon la revendication 15, caractérisé en ce que les repères d'axes (15) comprennent au moins un diaphragme et un repère numérique sur la caméra.

18. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes,
25 caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens de calibration de la fonction de transfert temporelle.

19. Dispositif selon la revendication 18, caractérisé en ce que les moyens de calibration comprennent une lame (14) introduisant un retard optique de
30 valeur connue, pouvant être insérée dans le faisceau de lumière incident avant le diviseur optique monobloc (3), de telle sorte à retarder l'un des deux faisceaux répliqués (4a) par rapport à l'autre (4b) d'une quantité déterminée.

20. Procédé de mesure monocoup d'une fonction d'autocorrélation optique selon lequel :

- un faisceau de lumière incident à une fréquence optique fondamentale est divisé en deux faisceaux répliqués (4a) et (4b),

5 - lesdits deux faisceaux répliqués sont recombinaison de telle sorte qu'ils se croisent en formant un angle non nul entre eux,

- un faisceau de lumière doublé (7), avec une fréquence optique sensiblement égale à la somme des fréquences optiques des deux faisceaux répliqués, est généré dans un élément optique non linéaire (5) placé

10 sensiblement au point de croisement desdits faisceaux répliqués, caractérisé en ce que la division et la recombinaison des faisceaux est effectuée par un diviseur optique monobloc (3) présentant une symétrie de forme par rapport à un plan.

15 **21.** Procédé selon la revendication 20, caractérisé en ce que la résolution temporelle de la mesure est modifiée en changeant l'angle d'intersection des deux faisceaux répliqués (4a) et (4b).

20 **22.** Procédé selon la revendication 21, caractérisé en ce que le changement d'angle d'intersection des deux faisceaux est effectué en changeant le diviseur optique monobloc (3) inséré dans le faisceau incident.

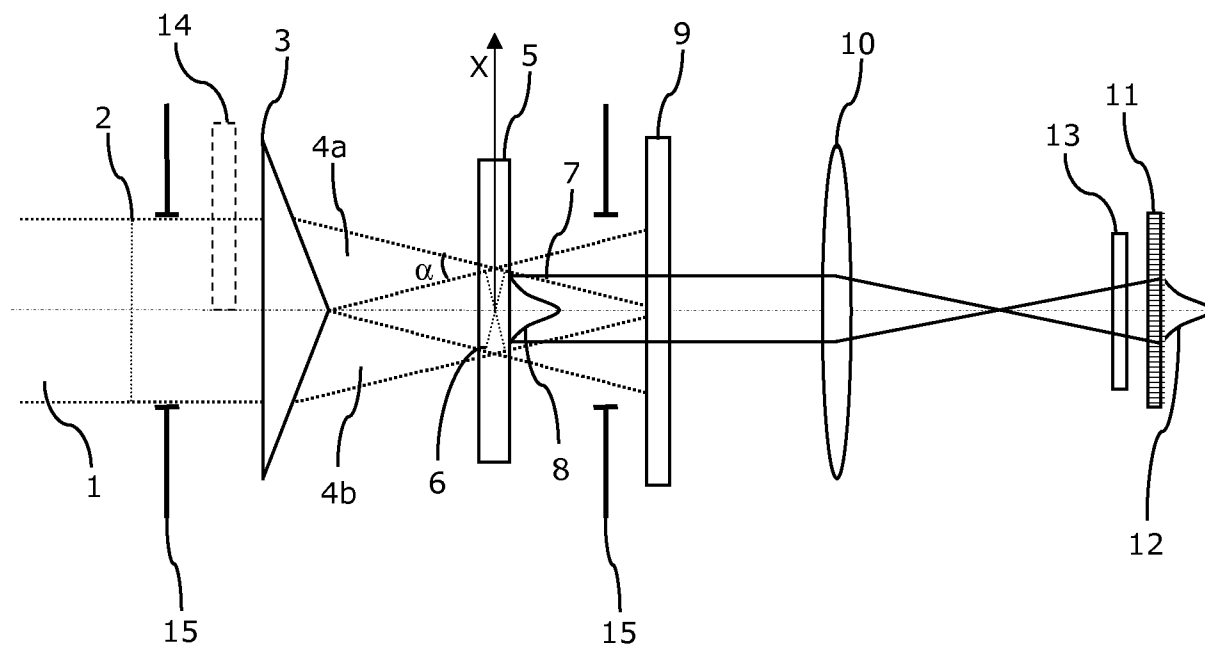


Figure 1

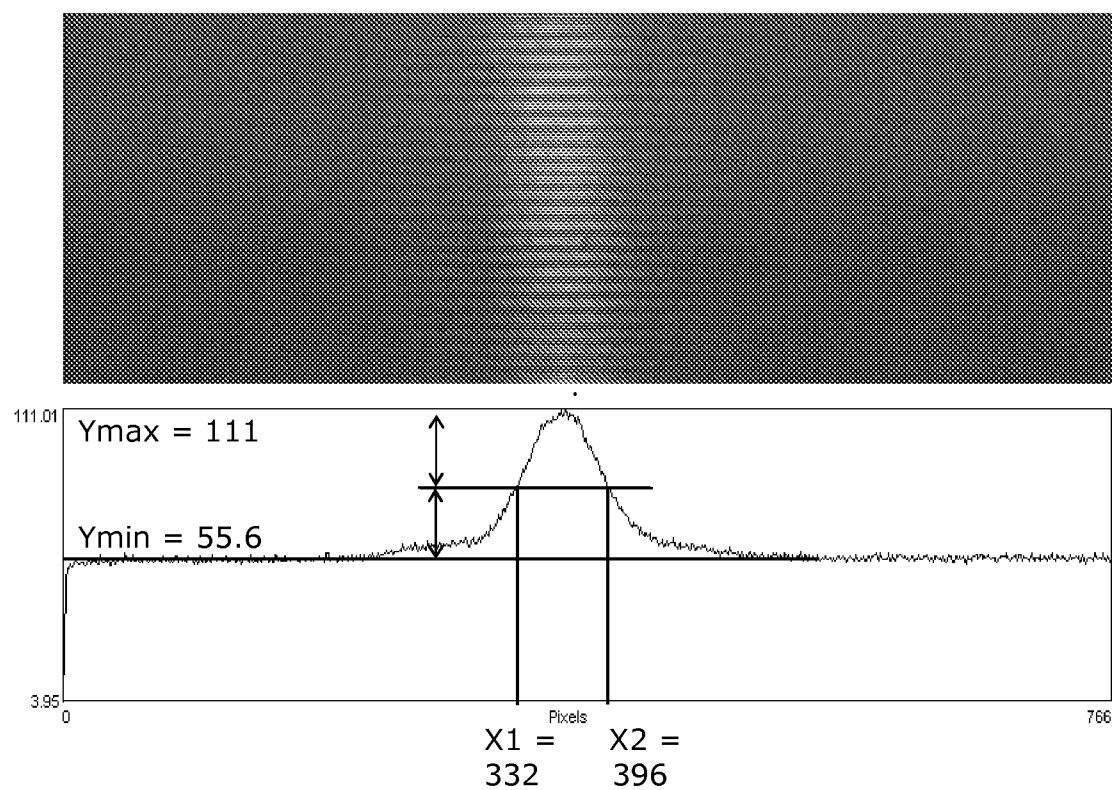


Figure 2

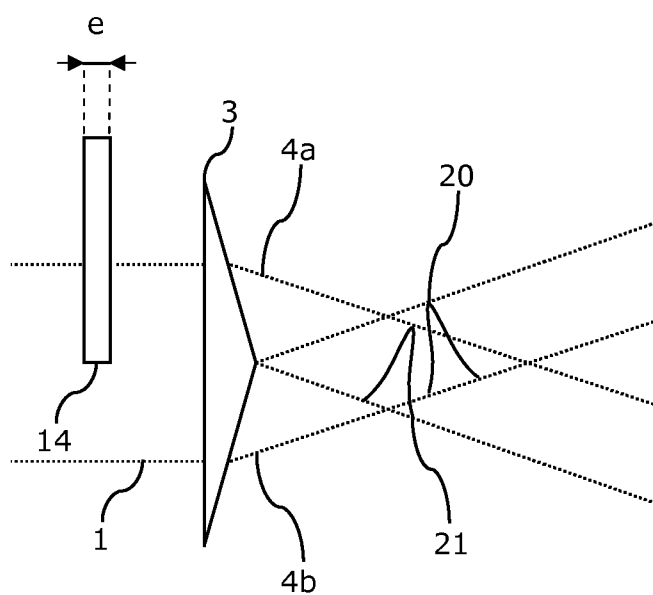


Figure 3

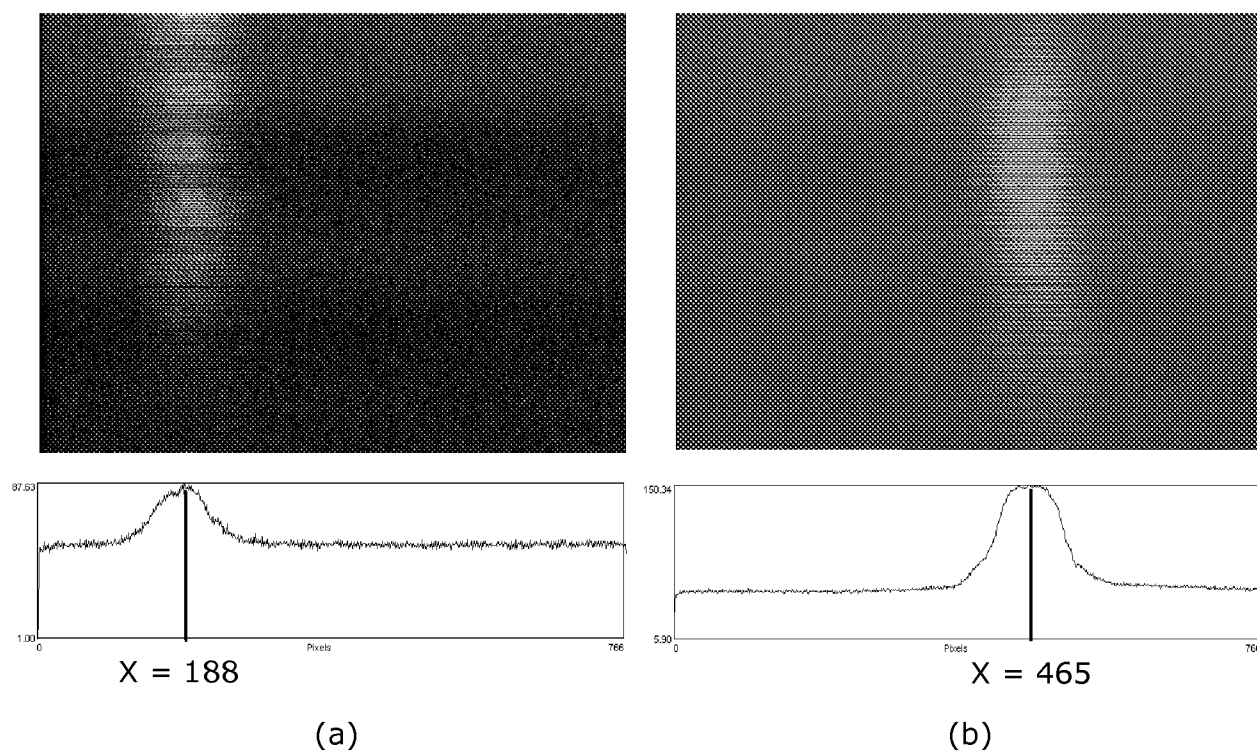


Figure 4

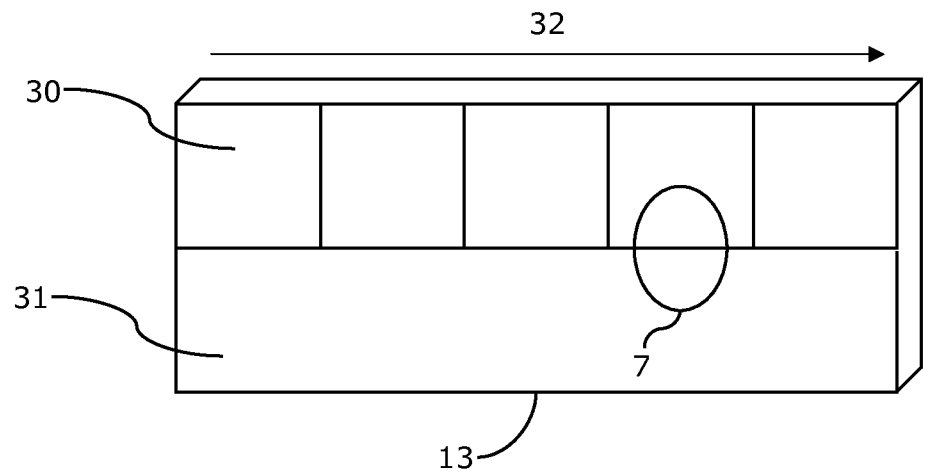


Figure 5

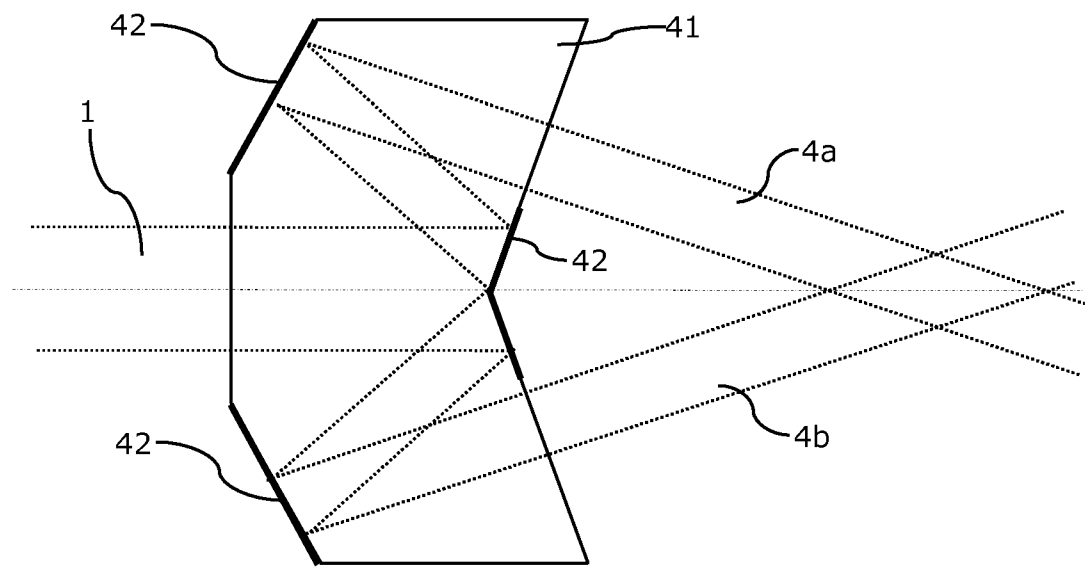


Figure 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2010/050184

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. 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

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

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

EP0-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2002/057435 A1 (TREBINO RICK P [US]) 16 May 2002 (2002-05-16) abstract; figures 2-4 paragraphs [0014], [0 15], [0 25] - [0028], [0 41] - [0046] -----	1-22
X	US 2004/141180 A1 (WAN CHAOZHI [US]) 22 July 2004 (2004-07-22) abstract; figures 5-8 paragraphs [0006], [0 36] - [0040] -----	1-22

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 April 2010

Date of mailing of the international search report

23/04/2010

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Varelas, Dimitrios

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2010/050184

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2002057435	A1	16-05-2002	NONE
US 2004141180	A1	22-07-2004	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2010/050184

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. 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

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

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 2002/057435 A1 (TREBINO RICK P [US]) 16 mai 2002 (2002-05-16) abrégé; figures 2-4 alinéas [0014], [0 15], [0 25] - [0028], [0 41] - [0046]	1-22
X	US 2004/141180 A1 (WAN CHAOZHI [US]) 22 juillet 2004 (2004-07-22) abrégé; figures 5-8 alinéas [0006], [0 36] - [0040]	1-22

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

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

14 avril 2010

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

23/04/2010

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

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

Fonctionnaire autorisé

Varelas, Dimitrios

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2010/050184

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2002057435 A1	16-05-2002	AUCUN	
US 2004141180 A1	22-07-2004	AUCUN	