

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 145 976

21 N° d'enregistrement national : 23 01471

51 Int Cl⁸ : G 01 B 9/020 (2023.01), G 02 B 26/10

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 16.02.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 23.08.24 Bulletin 24/34.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : PARIS SCIENCES ET LETTRES Fondation — FR, ECOLE SUPERIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS Etablissement public — FR, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) — FR et OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES Etablissement public à caractère industriel et commercial — FR.

72 Inventeur(s) : MEIMON Serge, BARACAL DE MECÉ Pedro, THOUVENIN Olivier et KRAFFT Léa.

73 Titulaire(s) : PARIS SCIENCES ET LETTRES Fondation, ECOLE SUPERIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS Etablissement public, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES Etablissement public à caractère industriel et commercial.

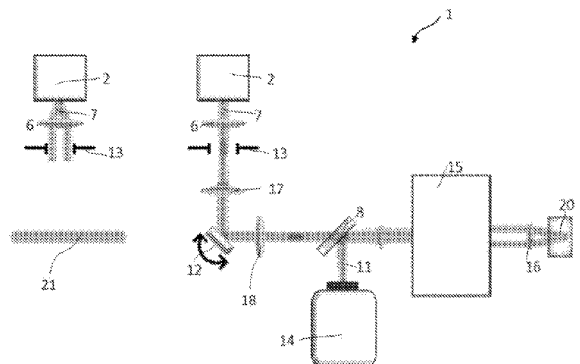
74 Mandataire(s) : IPAZ.

54 Dispositif et procédé pour l'imagerie d'un objet diffusant.

57 L'invention concerne un dispositif (1) d'imagerie comprenant :

un module d'illumination linéaire (2) produisant une ligne lumineuse sur un objet (20) ; des moyens de balayage pour déplacer la ligne lumineuse sur l'objet ; un capteur bidimensionnel (14) comprenant un obturateur déroulant ; un module de synchronisation ayant un premier mode avec un décalage temporel nul entre l'obturateur déroulant et les moyens de balayage, dans lequel le capteur (14) capte un signal en champ clair, et un deuxième mode avec un décalage temporel non nul entre l'obturateur et les moyens de balayage, dans lequel le capteur capte un signal en champ sombre ; et un module de traitement d'images pour produire une image en champ clair à partir des signaux en champ clair et pour produire une image en champ sombre à partir des signaux en champ sombre.

L'invention concerne également un procédé d'imagerie.
Figure pour abrégé : [Fig. 1]



FR 3 145 976 - A1



Description

Titre de l'invention : Dispositif et procédé pour l'imagerie d'un objet diffusant

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne un dispositif pour l'imagerie d'un objet diffusant. Elle concerne également un procédé pour imager un tel objet.
- [0002] Le domaine de l'invention est, de manière non limitative, celui de l'imagerie de milieux ou objets diffusants, tels que des tissus biologiques.

Etat de la technique

- [0003] De nombreuses techniques d'imagerie sont mises en œuvre dans tous les domaines scientifiques et notamment en médecine.
- [0004] Pour l'imagerie des tissus biologiques complexes, et notamment l'œil in vivo, on peut distinguer des techniques incohérentes et des techniques cohérentes.
- [0005] Les techniques incohérentes peuvent être basées sur une imagerie de réflectance directe ou sur une imagerie de phase et d'absorption.
- [0006] On appellera imagerie de réflectance, tout type d'imagerie reposant sur un contraste d'intensité, à partir de la quantité de lumière, soit réfléchi, soit rétrodiffusé par une ou plusieurs structures de l'échantillon.
- [0007] Les techniques cohérentes sont basées sur des mesures interférométriques.
- [0008] Les techniques d'imagerie incohérentes sont généralement basées sur la mesure directe de la réflectance.
- [0009] Pour des mesures en plein champ, les photons rétrodiffusés par l'œil sont mesurés avec une caméra. Il s'agit d'une technique rapide permettant d'enregistrer tous les photons en parallèle. En effet, le champ de vue entier est illuminé en parallèle, et l'enregistrement de photons provenant de ce champ de vue peut être effectué en parallèle ou par un obturateur déroulant de la caméra. Dans ces deux cas, le contraste de l'image obtenue est le même et la mesure est peu sensible. En tout cas, et de façon plus générale, dans le plein champ les photons sont enregistrés par une caméra 2D.
- [0010] Cependant, l'exploitation des images est difficile, voire impossible, car non seulement les photons rétrodiffusés par une couche d'intérêt sont captés, mais également des photons diffusés par d'autres couches ou des photons multi-diffusés. Ceci diminue le contraste de l'image et apporte du bruit, ce qui par conséquent diminue le rapport signal sur bruit.
- [0011] Dans les techniques d'imagerie confocales, les mesures sont réalisées point par point avec un système à balayage pour obtenir une image bidimensionnelle. Un filtrage confocal est réalisé pour filtrer les photons provenant d'autres profondeurs que celle de

l'objet mesuré et les photons multiples diffusés, ce qui permet donc d'imager avec un meilleur contraste et un meilleur rapport signal sur bruit.

- [0012] En décalant le filtre confocal de détection par rapport à l'illumination, il est aussi possible de réaliser de l'imagerie de champ sombre, où l'on détecte des photons provenant de zones non éclairées. À partir des images de champ sombre il est possible d'extraire le contraste d'absorption et le contraste de phase.
- [0013] Cependant, la technique de balayage mono-point souffre d'une faible vitesse d'acquisition due au balayage. En conséquence de la faible vitesse, des artefacts de distorsion peuvent notamment être présents dans un tel système de balayage lorsque l'objet imagé est en mouvement, tel que la rétine imagée *in vivo*.
- [0014] La résolution axiale de ces techniques dépend de l'ouverture numérique du système de mesure.
- [0015] Les techniques d'imagerie cohérentes sont généralement basées sur la mesure interférométrique de la lumière rétrodiffusée. Une technique cohérente importante est la tomographie en optique cohérente (*Optical Coherence Tomography, OCT*). L'OCT permet d'imager, entre autres, des tissus biologiques complexes diffusants en sélectionnant une profondeur d'imagerie par interférométrie à faible cohérence. Dans ce cas, la résolution axiale dépend de la largeur du spectre et non plus de l'ouverture numérique.

Exposé de l'invention

- [0016] L'invention vise à résoudre les inconvénients de l'art antérieur décrits.
- [0017] Il est notamment un but de l'invention de proposer un dispositif et un procédé pour l'imagerie d'un objet diffusant permettant de réaliser de l'imagerie en plein champ à une vitesse, un contraste et un rapport signal sur bruit élevés.
- [0018] Il est un autre but de la présente invention de proposer un dispositif et un procédé pour l'imagerie d'un objet diffusant permettant de réaliser de l'imagerie en champ clair et en champ sombre.
- [0019] Il est encore un but de la présente invention de proposer un dispositif pour l'imagerie d'un objet diffusant dont la configuration est simple et compacte.
- [0020] Au moins un de ces buts est atteint avec un dispositif pour l'imagerie d'un objet diffusant, comprenant :
- un module d'illumination linéaire configuré pour produire une illumination en forme de ligne lumineuse de l'objet dans un champ de vue ;
 - des moyens de balayage configurés pour déplacer la ligne lumineuse sur l'objet dans le champ de vue ;
 - un capteur bidimensionnel comprenant un obturateur déroulant ;
 - un module de synchronisation configuré pour fonctionner dans un premier

- mode synchronisé avec un décalage temporel nul entre l'obturateur déroulant et les moyens de balayage, dans lequel le capteur est configuré pour capter un signal en champ clair, et dans un deuxième mode synchronisé avec un décalage temporel non nul déterminé entre l'obturateur déroulant et les moyens de balayage, dans lequel le capteur est configuré pour capter un signal en champ sombre ; et
- un module de traitement d'images configuré pour produire une image en champ clair à partir des signaux en champ clair et pour produire une image en champ sombre à partir des signaux en champ sombre.
- [0021] Le dispositif d'imagerie selon la présente invention permet d'allier les avantages d'une configuration en champ clair et d'une configuration en champ sombre d'un dispositif d'imagerie.
- [0022] En champ clair, l'obturateur déroulant du capteur, et donc l'exposition successive de lignes de pixels du capteur, agit comme un filtrage spatial en temps réel, permettant de limiter le taux de photons multi-diffusés et s'étendant sur l'ensemble du champ de vue, et par conséquent, d'augmenter le contraste de structures imagées dans la région illuminée par rapport au contraste obtenu dans la même région lors d'une illumination complète du champ de vue. Illuminer séquentiellement les différentes parties du champ de vue en filtrant pour chaque zone les photons provenant des zones non illuminées permet ainsi de reconstruire des images du champ de vue avec un contraste amélioré. En diminuant de la sorte le bruit de fond, la sensibilité de détection est considérablement augmentée par rapport à une configuration en plein champ sans filtrage. Aucun filtrage numérique supplémentaire pendant le traitement d'images n'est nécessaire. Une image à haut contraste et rapport signal sur bruit peut donc être affichée en temps réel.
- [0023] Pour un temps d'exposition donné, une partie seulement du champ de vue est détectée, les autres pixels du capteur étant rendus insensibles à la lumière par l'obturateur déroulant. Pour former une image de l'ensemble du champ de vue, la ligne lumineuse est balayée sur l'ensemble du champ de vue, et une image complète est formée à partir de l'ensemble des lignes captées et filtrées. Pour obtenir le meilleur compromis entre contraste et vitesse d'acquisition, le dispositif selon la présente invention dispose d'une ligne d'illumination d'une épaisseur prenant en compte les caractéristiques de diffusion de l'objet et les contraintes temporelles de l'acquisition (par exemple, mouvements oculaires). Il s'agit soit seulement de la zone illuminée afin de capter les photons rétrodiffusés par l'objet (détection en champ clair), soit d'une zone à côté de la zone illuminée permettant de détecter des photons multi-diffusés et réfractés par des structures faiblement réfléchissantes (détection en champ sombre).
- [0024] Le dispositif selon l'invention permet ainsi de réaliser de l'imagerie en champ clair.

Dans la configuration du premier mode de synchronisation, l'illumination est synchronisée avec l'obturateur déroulant (ou diaphragme numérique dynamique) de sorte que seuls les pixels exposés à chaque pas de temps soient illuminés par de la lumière rétrodiffusée par l'objet, c'est-à-dire, seulement les pixels correspondant à la zone illuminée soient effectivement lus. Il est possible de réaliser de l'imagerie d'un objet diffusant et obtenir des images de contraste de réflectance. La vitesse d'imagerie dans cette configuration est la même que dans une configuration plein champ, tout en augmentant la sensibilité de détection grâce au filtrage spatial. Dans le premier mode de synchronisation, des images de contraste de réflectance peuvent être obtenues.

[0025] Le dispositif selon l'invention permet également de réaliser de l'imagerie en champ sombre. Dans la configuration du deuxième mode de synchronisation, l'illumination est synchronisée avec l'obturateur déroulant de sorte que les pixels exposés à chaque pas de temps ne soient pas illuminés par la lumière rétrodiffusée par l'objet, mais par de la lumière multi-diffusée. Les pixels effectivement lus à chaque pas de temps correspondent donc à des zones non illuminées. Le capteur ne capte ainsi que de la lumière diffusée plusieurs fois. Cette configuration permet de relever des gradients de phase, et donc l'observation de structures quasi transparentes, invisibles en imagerie directe (champ clair). Dans ce deuxième mode de synchronisation, des images de contraste d'absorption et/ou de phase peuvent être obtenues.

[0026] Selon un aspect important de l'invention, le dispositif est configuré pour imager un objet ou échantillon à la fois en champ clair et en champ sombre, et d'exploiter les mesures obtenues selon les deux modes de synchronisation. La transition d'un mode de synchronisation vers l'autre est réalisée par un simple ajustement du décalage temporel entre l'obturateur déroulant du capteur et les moyens de balayage, sans qu'aucune manipulation mécanique par un opérateur soit nécessaire. Ainsi, à partir d'un même dispositif pouvant fonctionner selon différentes configurations en champ clair et en champ sombre, différents types d'images en plein champ peuvent être obtenus du même objet ou de la même zone de l'objet.

[0027] La synchronisation de l'illumination en forme de ligne, balayée sur l'objet, avec l'obturateur déroulant du capteur permet la détection sélective ligne par ligne du capteur sans aucune perte de cadence.

[0028] Grâce au dispositif selon l'invention, il est possible de passer aisément d'une configuration en champ clair, permettant de mesures de contraste de réflectance de structures à haut contraste, à une configuration en champ sombre, à détection décalée, permettant des mesures de contraste de phase et/ou d'absorption.

[0029] Le dispositif selon l'invention permet ainsi, par rapport aux systèmes de l'état de l'art, de maintenir la cadence d'imagerie d'un système plein champ, sans filtrage spatial, tout en augmentant la sensibilité de la détection.

- [0030] Dans le dispositif selon l'invention, l'illumination et la détection sont découplées, ou indépendantes, l'une de l'autre. Grâce à la présence d'un capteur bidimensionnel avec l'obturateur déroulant, la ligne de détection sur le capteur n'est pas dans une position fixe, il n'est pas nécessaire de « dé-balayer » la ligne en détection, c'est-à-dire de repasser par les moyens de balayage pour annuler l'angle introduit comme c'est le cas pour un détecteur unidimensionnel. Il est alors aisé, moyennant un simple délai temporel, de détecter un signal en dehors de la zone illuminée de l'objet pour obtenir les contrastes de phase et d'absorption. Ceci permet de passer rapidement d'un mode de synchronisation à l'autre.
- [0031] Grâce à la présence d'un capteur optique bidimensionnel (et non un capteur unidimensionnel), le dispositif selon l'invention est robuste par rapport à la non-linéarité des moyens de balayage, pouvant résulter des contraintes mécaniques de ces moyens, et aux aberrations optiques introduites par ceux-ci, pouvant provoquer respectivement des artefacts et une perte de résolution spatiale. Du fait du découplage entre l'illumination et la détection, les non-linéarités des moyens de balayage du faisceau lumineux peut entraîner un délai temporel entre l'illumination et la détection et ainsi la perte du signal. Lorsqu'il n'y a pas de signal, il est alors possible de constater directement la non-linéarité du système de balayage, ce qui n'est pas possible en imagerie confocale ou ligne. En effet, dans les systèmes confocales et ligne, l'illumination et la détection étant couplées, les non-linéarités du système de balayage provoquent un artefact de distorsion de la structure de l'objet imagé.
- [0032] Le délai temporel pour passer d'un mode à l'autre est typiquement de quelques microsecondes.
- [0033] Une cadence d'imagerie élevée est notamment importante dans le cas de l'imagerie de l'œil, pour s'affranchir des artefacts de distorsion induits par les mouvements de ce dernier.
- [0034] Une sensibilité élevée permet de détecter des structures moins réfléchissantes, comme des cellules individuelles et leurs organelles.
- [0035] Le capteur bidimensionnel peut être, par exemple, une caméra CMOS (semi-conducteur à oxyde de métal complémentaire, *complementary metal oxide semiconductor* selon la terminologie anglo-saxonne).
- [0036] Selon un mode de réalisation, le module de synchronisation peut être configuré pour fonctionner dans le premier mode synchronisé et le deuxième mode synchronisé pour l'ensemble du champ de vue.
- [0037] Avantageusement, le module de traitement d'images peut être configuré pour produire une image de contraste de phase à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [0038] En effet, il est possible d'obtenir une image de contraste de phase augmenté en

soustrayant deux images prises en champ sombre, représentant également des images de contraste de phase, avec un décalage temporel entre l'obturateur et les moyens de balayage positif ou négatif, respectivement.

- [0039] Alternativement ou en plus, le module de traitement d'images peut être configuré pour produire une image de contraste d'absorption à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [0040] En effet, il est possible d'obtenir une image de contraste d'absorption en additionnant deux images prises en champ sombre avec un décalage temporel entre l'obturateur et les moyens de balayage positif ou négatif, respectivement.
- [0041] Selon un mode de réalisation, le dispositif selon l'invention peut comprendre en outre un module d'optique adaptative configuré pour corriger des défauts statiques et/ou dynamiques subis par le front d'onde de l'illumination traversant l'objet.
- [0042] Grâce au module d'optique adaptative, des défauts statiques et/ou dynamiques imposés au front d'onde par l'objet ou l'échantillon et/ou par les surfaces optiques du dispositif, peuvent être efficacement corrigés. Cette correction est particulièrement importante lorsque l'objet à imager est en mouvement et le front d'onde subit des aberrations rapidement évolutives, comme par exemple l'œil humain. La correction permet de maintenir une résolution élevée pour le dispositif même en présence de défauts ou perturbations. L'optique adaptative permet également d'assurer que l'illumination reste bien en forme de ligne, afin de ne pas limiter le contraste pouvant être obtenu avec le dispositif.
- [0043] De manière avantageuse, le module d'illumination peut comprendre une source lumineuse ponctuelle couplée à une lentille génératrice de ligne.
- [0044] Alternativement, le module d'illumination peut comprendre une source lumineuse étendue couplée avec un filtre spatial en forme de ligne, ou avec une matrice de micro-miroirs (*digital micromirror device*, DMD).
- [0045] La source lumineuse peut être une source infrarouge.
- [0046] Les longueurs d'onde infrarouges n'étant que très peu absorbées par les tissus biologiques, elles sont particulièrement adaptées pour l'imagerie de tels tissus.
- [0047] Selon un exemple, la source lumineuse peut être une diode superluminescente (SLD). Les SLD ont l'avantage d'être relativement puissantes (quelques milliwatts) et d'avoir une directivité élevée. De plus, leur faible longueur de cohérence temporelle permet d'atténuer les tavelures, c'est-à-dire, des distributions granulaires d'intensité.
- [0048] La lentille génératrice de ligne peut être, par exemple, une lentille cylindrique ou une lentille de Powell.
- [0049] Une lentille de Powell garantit une distribution d'intensité homogène le long de la ligne lumineuse générée.
- [0050] Selon un autre aspect de la même invention, il est proposé un procédé pour imager un

objet diffusant. Le procédé est mis en œuvre par un dispositif d'imagerie comprenant un module d'illumination, des moyens de balayage, un capteur bidimensionnel comprenant un obturateur déroulant, un module de synchronisation et un module de traitement d'images, et notamment par un dispositif d'imagerie selon la présente invention.

- [0051] Le procédé selon l'invention comprend les étapes suivantes :
- [0052] - illumination, par le module d'illumination linéaire, de l'objet avec une ligne lumineuse dans le champ de vue ;
- [0053] - balayage, par les moyens de balayage, de la ligne lumineuse sur l'objet dans le champ de vue ;
- [0054] - synchronisation, par le module de synchronisation, des moyens de balayage et de l'obturateur déroulant avec un décalage temporel nul dans un premier mode synchronisé, dans lequel le capteur est configuré pour capter un signal en champ clair, et avec un décalage temporel non nul déterminé dans un deuxième mode synchronisé, dans lequel le capteur est configuré pour capter un signal en champ sombre ;
- [0055] - détection, par le capteur, d'un signal en champ clair et/ou d'un signal en champ sombre ; et
- [0056] - production, par le module de traitement d'images, d'une image en champ clair à partir des signaux en champ clair et d'une image en champ sombre à partir des signaux en champ sombre.
- [0057] De manière avantageuse, les étapes de synchronisation et de détection peuvent être réalisées alternativement pour produire une image en champ clair et pour produire une image en champ sombre successivement.
- [0058] Il est en effet aisé de passer du premier mode synchronisé au deuxième mode synchronisé en ajustant le décalage temporel entre l'obturateur déroulant du capteur et les moyens de balayage. Des images en champ clair et en champ sombre peuvent ainsi être obtenues du même objet ou de la même partie de l'objet, permettant de combiner les avantages des deux modes pour obtenir d'avantage d'informations de l'objet imagé.
- [0059] Selon un mode de réalisation avantageux, le procédé selon l'invention peut comprendre en outre une étape de production d'une image de contraste de phase à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [0060] Alternativement ou en plus, le procédé selon l'invention peut comprendre en outre une étape de production d'une image de contraste d'absorption à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [0061] Le procédé selon l'invention peut également comprendre une étape de correction de défauts statiques et/ou dynamiques subis par le front d'onde de l'illumination traversant l'objet.
- [0062] Pour cela, un module d'optique adaptative peut être mis en œuvre comme décrit ci-

dessus.

- [0063] Le dispositif et le procédé selon l'invention peuvent être mis en œuvre dans de nombreuses applications nécessitant l'imagerie de structures, objets ou échantillons diffusants, telles que l'imagerie biologique ou médicale, l'imagerie subaquatique, à travers la brume ou le brouillard, sur fond de nuages, ou encore le contrôle non destructif de matériaux (par exemple, des fibres de verre).
- [0064] Plus particulièrement pour l'imagerie de la rétine, le dispositif et le procédé selon l'invention permettent d'observer la plupart des structures d'intérêt dans une rétine, qu'elles soient hautement rétro-diffusantes comme par exemple des cônes, bâtonnets, ou faiblement diffusants, comme par exemple des cellules ganglionnaires et capillaires sanguins. Les hautes cadences atteignables et le large de champ de vue imagé permettent de répondre à un besoin médical de scanner la zone la plus large possible tout en limitant le temps d'imagerie pour le patient. La haute cadence permet également d'imager le flux sanguin dans des capillaires présents dans la rétine.

Description des figures et modes de réalisation

- [0065] D'autres avantages et caractéristiques apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'exemples nullement limitatifs, et des dessins annexés sur lesquels :
- [Fig.1] la [Fig.1] est une représentation schématique d'un exemple de réalisation non limitatif d'un dispositif d'imagerie selon l'invention ;
 - [Fig.2] la [Fig.2] est une représentation schématique d'un exemple d'un module d'illumination du dispositif selon l'invention ;
 - [Fig.3] la [Fig.3] montre une représentation schématique d'un premier mode de synchronisation mis en œuvre par le dispositif selon l'invention ;
 - [Fig.4] la [Fig.4] montre une représentation schématique d'un deuxième mode de synchronisation mis en œuvre par le dispositif selon l'invention ; et
 - [Fig.5] la [Fig.5] montre des exemples d'images acquises avec un dispositif selon l'invention.
- [0066] Il est bien entendu que les modes de réalisation qui seront décrits dans la suite ne sont nullement limitatifs. En particulier toutes les variantes et tous les modes de réalisation décrits sont combinables entre eux si rien ne s'oppose à cette combinaison sur le plan technique.
- [0067] Sur les figures, les éléments communs à plusieurs figures peuvent conserver la même référence.
- [0068] La [Fig.1] est une représentation schématique d'un mode de réalisation non limitatif d'un dispositif d'imagerie selon la présente invention.
- [0069] Le dispositif 1, tel que représenté sur la [Fig.1], peut être mis en œuvre pour réaliser les étapes d'un procédé d'imagerie selon la présente invention. Des exemples de réalisation du dispositif et du procédé selon l'invention seront décrits par la suite.

- [0070] Le dispositif 1 comprend un module d'illumination linéaire 2, des moyens de balayage 12 et un capteur d'images bidimensionnel 14.
- [0071] Le module d'illumination linéaire 2 permet de produire un éclairage en forme de ligne de l'objet 20 ou de l'échantillon à imager. Un exemple d'un tel module d'illumination est illustré sur la [Fig.2].
- [0072] Le module d'illumination 2, tel que représenté sur la [Fig.2], comprend une source lumineuse 3 ponctuelle collimatée et une lentille génératrice de ligne 5. La lentille 5 génératrice de ligne est de préférence une lentille de Powell. La lentille 5 peut également être une lentille cylindrique. La source lumineuse 3 est une source bidimensionnelle. De préférence, la source a une émission large bande et une faible longueur de cohérence temporelle. Elle peut par exemple émettre à une longueur d'onde de 850 nm avec une bande passante spectrale de 55 nm.
- [0073] La sortie de la source lumineuse 3 peut être fibrée, couplée à un collimateur (non représenté). La sortie de la source 3 peut également être non fibrée, auquel cas le collimateur n'est pas nécessaire.
- [0074] La source lumineuse 3 peut être, par exemple, une diode superluminescente (SLD).
- [0075] Le faisceau 7 de la source 3 traverse la lentille de Powell 5 qui convertit le faisceau collimaté en faisceau divergent de section linéaire. Le faisceau converti présente un angle d'ouverture dans une direction mais reste collimaté dans la direction orthogonale.
- [0076] La [Fig.1] illustre la forme du faisceau lumineux 7 sortant du module d'illumination 2 dans les deux plans (x, z) et (y, z) , ainsi que sa section linéaire 21 dans le plan (x, y) .
- [0077] Toujours en référence à la [Fig.1], un doublet achromatique 6 positionné en sortie du module d'illumination 2 permet de limiter le champ d'illumination dans la direction dans laquelle le faisceau 7 est divergent, afin de minimiser les pertes de puissance. En superposant les plans focaux de la lentille de Powell 5 et du doublet 6, une ligne lumineuse est formée sur le plan focal image de la lentille.
- [0078] Afin de garantir une illumination homogène sur les bords de la ligne lumineuse, et comme illustré sur la [Fig.1], une fente 13 peut être placée dans le plan focal image du doublet achromatique 6, ce plan focal étant conjugué au plan de l'objet ou échantillon à imager.
- [0079] Le faisceau d'illumination 7, issu du module d'illumination 2, est dirigé vers l'objet 20 au moyen d'un miroir semi-transparent 8 de façon à ce que l'objet soit illuminé avec la ligne lumineuse générée. Le faisceau d'illumination 7 est focalisé, dans la direction de la largeur de la ligne lumineuse, dans ou sur l'objet 20 à l'aide d'une lentille 16. La lumière diffusée 11 par l'objet 20 repasse par le miroir semi-transparent 8 pour être détectée par le capteur 14.
- [0080] Dans le cas de la mise en œuvre du dispositif 1 pour l'imagerie de la rétine, l'œil joue

le rôle de la lentille 16.

- [0081] La ligne lumineuse est balayée sur l'objet 20 à imager, dans le champ de vue, à l'aide des moyens de balayage. Pour cela, le faisceau d'illumination 7 est dirigé vers un miroir galvanométrique 12. Celui-ci dirige le faisceau lumineux 7 vers l'objet 20 selon un angle variable (indiqué par une flèche à double sens dans la [Fig.1]), permettant de balayer l'ensemble du champ de vue avec la ligne lumineuse formée par le module d'illumination 2.
- [0082] L'amplitude du balayage peut être ajustée pour fournir un champ de vue déterminé. La fréquence de balayage du miroir galvanométrique est identique à la fréquence d'acquisition d'images plein champ sur le champ de vue. Par exemple, des images sur le champ de vue entier peuvent être acquises avec une fréquence de 200 Hz pour typiquement 1000 rangées de pixels.
- [0083] L'illumination de l'objet 20 doit être en forme de ligne dans le plan focal image, et le miroir galvanométrique 12 doit se trouver dans le plan pupille pour que l'angle du miroir 12 permet un changement de position seul de la ligne lumineuse sur l'objet. Deux lentilles 17, 18 agencées de part et d'autre du miroir galvanométrique 12 permettent de passer d'un plan image à un plan pupille.
- [0084] Le capteur bidimensionnel 14 du dispositif 1 selon l'invention est configuré pour détecter la lumière diffusée 11 par l'objet 20. Le capteur 14 comprend un obturateur déroulant. Cet obturateur est un obturateur contrôlable électroniquement. Il est notamment possible d'ajuster la largeur de l'obturateur afin de définir le nombre de rangées ou lignes de pixels du capteur 14 qui sont exposés. Le temps de pose par rangée de pixels du capteur 14 est constant. La vitesse de l'obturateur déroulant est notamment définie par la fréquence d'images du capteur 14.
- [0085] Le capteur 14 est par exemple une caméra CMOS.
- [0086] Le dispositif 1 selon l'invention comprend un module de synchronisation (non représenté) pour gérer le mode de synchronisation entre les moyens de balayage et l'obturateur déroulant du capteur 14.
- [0087] Un premier et un deuxième mode de synchronisation sont illustrés schématiquement sur les figures 3 et 4, respectivement. Dans les figures 3 et 4, le champ de vue du capteur est représenté par une matrice de 15 x 9 pixels 31. La ligne lumineuse rétro-diffusée 32 sur le capteur est illustrée par un fond grisé. L'obturateur déroulant exposant les trois rangées de pixels est illustré par un rectangle 33 au trait épais.
- [0088] Dans un premier mode de synchronisation, le décalage temporel entre les moyens de balayage et l'obturateur déroulant est nul. Dans ce cas, le capteur capte la zone de l'objet illuminée par la ligne lumineuse, il détecte alors la lumière rétrodiffusée par l'objet. Il s'agit d'une détection en champ clair.
- [0089] Le principe de fonctionnement du premier mode de synchronisation est illustré dans

la [Fig.3].

- [0090] Dans le premier mode de synchronisation, la lumière rétrodiffusée directement, en forme de ligne, par l'objet est détectée par les rangées de pixels 31 du capteur exposés par l'obturateur déroulant. Pour synchroniser l'obturateur déroulant avec les moyens de balayage, et notamment le miroir galvanométrique, un signal électronique déclencheur de type TTL (*transistor-transistor logic*) peut être généré et envoyé au capteur, de manière synchrone à un signal de tension linéaire, de type dent de scie généré et envoyé au miroir galvanométrique, par exemple avec une carte de sortie analogique.
- [0091] Pour filtrer la lumière multi-diffusée et/ou non focalisée et capter la lumière rétro-diffusée, l'obturateur a une largeur correspondant à la largeur de la ligne lumineuse et le centre de cette ligne doit coïncider avec le centre des rangées de pixels exposés par l'obturateur.
- [0092] Dans l'exemple illustré sur la [Fig.3], la ligne lumineuse rétrodiffusée 32 éclaire trois rangées de pixels 31 sur le capteur. La vitesse de l'obturateur déroulant est de t_i par rangée. L'exposition de la première rangée de pixels commence au moment t_0 , qui correspond par exemple à la montée du signal déclencheur. L'exposition de la rangée de pixels suivant commence après t_i , et ainsi de suite jusqu'à la dernière rangée de pixels de l'image.
- [0093] Le temps d'exposition est, par exemple, 50 μ s, pour une fréquence d'acquisition de 200 Hz. Cela correspond à laisser chaque ligne exposée pendant l'équivalent de 10 rangées de pixel. Pour une largeur de la ligne d'illumination de 10 rangées de pixels sur le capteur 14, choisir un temps d'exposition de 50 μ s est optimal. Pour un champ de vue de 1000 rangées de pixels, cela correspond à un temps d'acquisition de 5,05 ms par image.
- [0094] Une image complète est acquise lorsque l'ensemble des pixels correspondant au champ de vue, soit les 1000 rangées, ont été exposés, c'est-à-dire, en 5,05 ms.
- [0095] Le miroir galvanométrique revient à sa position initiale avant l'acquisition d'une nouvelle image, ou à une position permettant d'ajouter une avance ou un retard donné entre la ligne lumineuse et l'obturateur déroulant.
- [0096] Les images obtenues selon ce premier mode de synchronisation sont des images de contraste de réflectance.
- [0097] Un exemple d'une image de contraste de réflectance est montré sur la [Fig.5](a) (« Brightfield »).
- [0098] Dans un deuxième mode de synchronisation, le décalage temporel entre les moyens de balayage et l'obturateur déroulant est non nul. Dans ce cas, le capteur capte un signal lumineux provenant d'une zone non illuminée de l'objet. Il s'agit de la lumière multi-diffusée par l'objet, et donc d'une détection en champ sombre.

- [0099] Le principe de fonctionnement du deuxième mode de synchronisation est illustré dans la [Fig.4].
- [0100] Dans le deuxième mode de synchronisation, la lumière rétrodiffusée directement, en forme de ligne, par l'objet n'est pas détectée par le capteur.
- [0101] Ici, l'obturateur déroulant du capteur est temporellement décalé par rapport au miroir galvanométrique (et donc la ligne lumineuse 32 sur le capteur) d'un temps de $3t_i$. Dans l'exemple représenté dans la [Fig.4], l'obturateur déroulant 33 est en avance par rapport à l'illumination. Dans le plan de la figure, les pixels exposés se trouvent alors en dessous des pixels éclairés.
- [0102] La ligne lumineuse rétrodiffusée 34 éclaire deux rangées 32 de pixels 31 sur le capteur, et la vitesse de l'obturateur déroulant est de t_i par rangée. L'exposition de la première rangée de pixels commence au moment t_0 , qui correspond par exemple à la montée du signal déclencheur. L'exposition de la rangée de pixels suivant commence après t_i , et ainsi de suite jusqu'à la dernière rangée de pixels de l'image. L'obturateur déroulant expose également deux rangées 35 de pixels, décalés de trois rangées par rapport aux rangées 32 éclairés.
- [0103] Bien entendu, l'obturateur déroulant peut également être retardé par rapport à l'illumination.
- [0104] Les images obtenues selon ce deuxième mode de synchronisation sont des images de champ sombre, à partir desquelles on peut générer des images de contraste de phase et d'absorption.
- [0105] Deux exemples d'images prises en champ sombre sont montrés sur les figures 5(b) et 5(c). Les deux images correspondent à deux décalages temporels différents entre la détection et l'illumination (« Offset 1 » et « Offset 2 »). En particulier, il s'agit de décalages temporels opposés.
- [0106] Dans le dispositif selon l'invention, le module de synchronisation est configuré pour fonctionner dans le premier et le deuxième mode de synchronisation, en combinant l'imagerie en champ clair et en champ sombre pour améliorer la qualité de l'imagerie par le dispositif.
- [0107] Pour obtenir une image de contraste de phase augmenté, deux images prises en champ sombre, représentant également des images de contraste de phase, peuvent être soustraites. L'une des deux images d'origine est captée avec un décalage temporel entre l'obturateur et les moyens de balayage positif, et l'autre image d'origine avec un décalage temporel négatif. Les décalages temporels ont de préférence la même valeur, mais changent uniquement de signe.
- [0108] Pour obtenir une image de contraste d'absorption, deux images prises en champ sombre peuvent être additionnées. L'une des deux images d'origine est captée avec un décalage temporel entre l'obturateur et les moyens de balayage positif, et l'autre image

d'origine avec un décalage temporel négatif.

- [0109] Deux exemples d'images obtenues en combinant deux images de contraste de phase, respectivement, sont montrés sur les figures 5(d) et 5(e).
- [0110] Sur la [Fig.5](d) (« Phase contrast ») est représentée une image de contraste de phase, correspondant à deux images de contraste de phase soustraites. En particulier, l'image 5(d) correspond à la soustraction de l'image 5(b) à l'image 5(c).
- [0111] Sur la [Fig.5](e) (Absorption contrast ») est représentée une image de contraste d'absorption, correspondant à deux images de contraste de phase additionnées. En particulier, l'image 5(e) correspond à l'addition des images 5(b) et 5(c).
- [0112] Les paramètres du balayage et de la synchronisation, tels que le signal électronique déclencheur, la largeur et la vitesse de l'obturateur déroulant ou les différents décalages temporels mis en œuvre, peuvent être contrôlés via une interface utilisateur.
- [0113] Dans le mode de réalisation représenté sur la [Fig.1], le dispositif 1 selon l'invention comprend également un module d'optique adaptative 15. Le faisceau d'illumination 7 traverse le module d'optique adaptative 15 avant d'arriver sur l'objet 20.
- [0114] Le module d'optique adaptative 15 permet de mesurer et corriger un front d'onde aberré, par exemple dû à des déformations du front d'onde induites par l'objet observé, et donc d'améliorer la résolution des images.
- [0115] Le module d'optique adaptative 15 comprend une source lumineuse (dite source d'analyse) telle qu'une diode super lumineuse fibrée, un capteur de front d'onde, par exemple de type Shack-Hartmann, et un miroir déformable. La longueur d'onde ou la bande spectrale de la source d'analyse est de préférence différente de celle de la source 3 utilisée pour l'imagerie ; sinon, des filtres spectraux peuvent être utilisés pour séparer les sources. Le faisceau de la source lumineuse est dirigé vers l'objet. Le front d'onde déformé de la lumière rétrodiffusée par l'objet est dirigé vers le miroir déformable et réfléchi vers le capteur de front d'onde qui mesure la déformation du front d'onde. Le miroir déformable, qui fonctionne en tant que correcteur de front d'onde, est contrôlé en temps réel pour corriger le front d'onde détecté par le capteur de front d'onde.
- [0116] Le front d'onde est corrigé à la fois pour le faisceau d'illumination allant vers l'objet et le faisceau diffusé de l'objet, le correcteur de front d'onde étant placé dans un chemin commun à l'illumination et à l'imagerie.
- [0117] Le dispositif d'imagerie selon l'invention comprend également un module de traitement d'images.
- [0118] Le module de traitement d'images permet de produire une image en champ clair à partir de l'image captée par la caméra, c'est-à-dire, à partir des lignes captées couvrant l'ensemble du champ de vue.
- [0119] Le module de traitement d'images permet également de produire une image en champ sombre à partir des signaux de photons multi-diffusés pour l'ensemble du

champ de vue.

- [0120] Dans ces deux cas précités, le module de traitement d'images correspond, en pratique, au mode lecture du capteur d'images.
- [0121] Enfin, le module de traitement d'images permet de calculer ou obtenir des images de contraste de phase augmenté ou de contraste d'absorption telles que décrites ci-dessus.
- [0122] Le module de traitement d'images comprend au moins un ordinateur, une unité centrale ou de calcul, un microprocesseur, et/ou des moyens logiciels adaptés.
- [0123] 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

- [Revendication 1] Dispositif (1) pour l'imagerie d'un objet diffusant (20), comprenant :
- un module d'illumination linéaire (2) configuré pour produire une illumination en forme de ligne lumineuse de l'objet (20) dans un champ de vue ;
 - des moyens de balayage (12) configurés pour déplacer la ligne lumineuse sur l'objet (20) dans le champ de vue ;
 - un capteur bidimensionnel (14) comprenant un obturateur déroulant ;
 - un module de synchronisation configuré pour fonctionner dans un premier mode synchronisé avec un décalage temporel nul entre l'obturateur déroulant et les moyens de balayage, dans lequel le capteur (14) est configuré pour capter un signal en champ clair, et dans un deuxième mode synchronisé avec un décalage temporel non nul déterminé entre l'obturateur et les moyens de balayage, dans lequel le capteur (14) est configuré pour capter un signal en champ sombre ; et
 - un module de traitement d'images configuré pour produire une image en champ clair à partir des signaux en champ clair et pour produire une image en champ sombre à partir des signaux en champ sombre.
- [Revendication 2] Dispositif (1) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le module de traitement d'images est configuré pour produire une image de contraste de phase à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [Revendication 3] Dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le module de traitement d'images est configuré pour produire une image de contraste d'absorption à partir d'au moins deux images en champ sombre.
- [Revendication 4] Dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un module d'optique adaptative (15) configuré pour corriger des défauts statiques et/ou dynamiques subis par le front d'onde de l'illumination traversant l'objet (20).
- [Revendication 5] Dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le module d'illumination (2) comprend une source

- lumineuse infrarouge (3).
- [Revendication 6] Dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le module d'illumination (2) comprend une source lumineuse ponctuelle (3) couplée à une lentille génératrice de ligne (5).
- [Revendication 7] Dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le capteur (14) est un capteur à semi-conducteur à oxyde de métal complémentaire.
- [Revendication 8] Procédé pour imager un objet diffusant (20), le procédé étant mis en œuvre par un dispositif d'imagerie comprenant un module d'illumination linéaire (2), des moyens de balayage, un capteur bidimensionnel (14) comprenant un obturateur déroulant, un module de synchronisation et un module de traitement d'images, le procédé comprenant les étapes suivantes :
- illumination, par le module d'illumination (2), de l'objet (20) avec une ligne lumineuse dans le champ de vue ;
 - balayage, par les moyens de balayage, de la ligne lumineuse sur l'objet (20) dans le champ de vue ;
 - synchronisation, par le module de synchronisation, des moyens de balayage et de l'obturateur déroulant avec un décalage temporel nul dans un premier mode synchronisé, dans lequel le capteur (14) est configuré pour capter un signal en champ clair, et avec un décalage temporel non nul déterminé dans un deuxième mode synchronisé, dans lequel le capteur (14) est configuré pour capter un signal en champ sombre ;
 - détection, par le capteur (14), d'un signal en champ clair et/ou d'un signal en champ sombre ; et
 - production, par le module de traitement d'images, d'une image en champ clair à partir des signaux en champ clair et d'une image en champ sombre à partir des signaux en champ sombre.
- [Revendication 9] Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que les étapes de synchronisation et de détection sont réalisées alternativement pour produire une image en champ clair et pour produire une image en champ sombre successivement.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 8 ou 9, caractérisé en ce qu'il comprend

en outre une étape de production d'une image de contraste de phase à partir d'au moins deux images en champ sombre.

[Revendication 11] Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de production d'une image de contraste d'absorption à partir d'au moins deux images en champ sombre.

[Revendication 12] Procédé selon l'une quelconque des revendications 8 à 11, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de correction de défauts statiques et/ou dynamiques subis par le front d'onde de l'illumination traversant l'objet (20).

[Fig. 1]

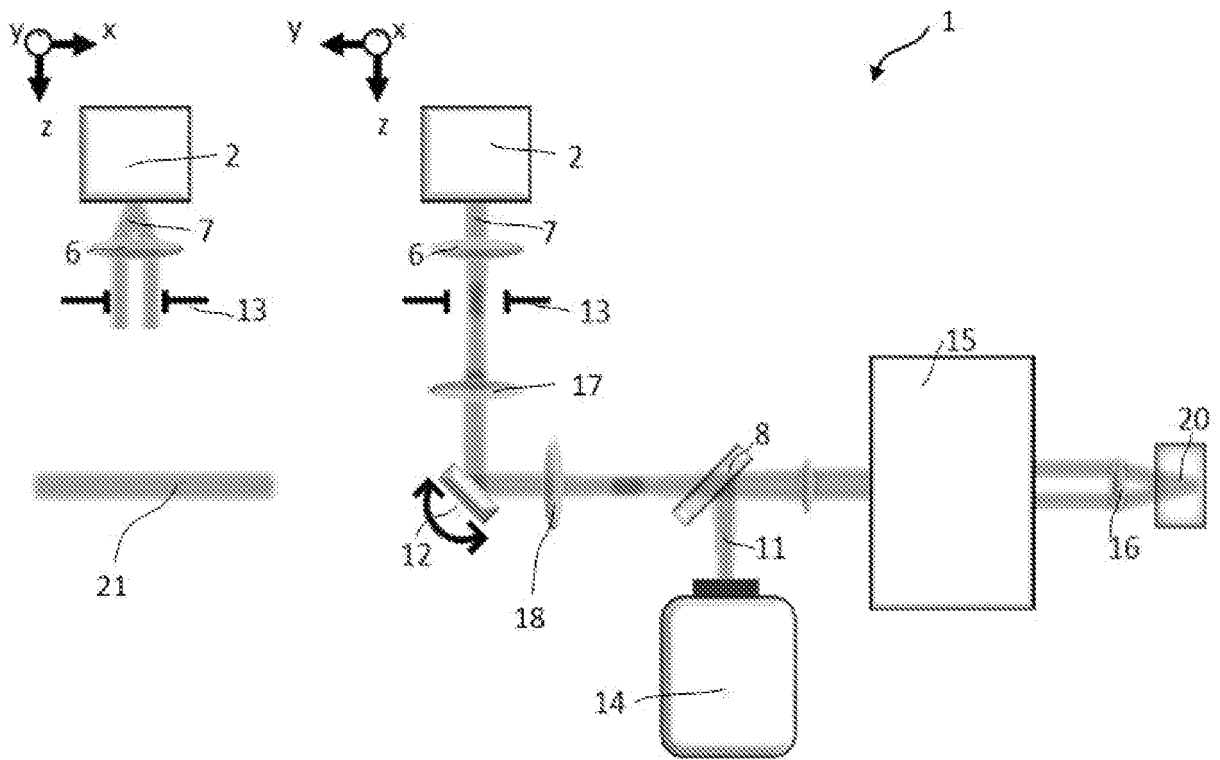


Fig. 1

[Fig. 2]

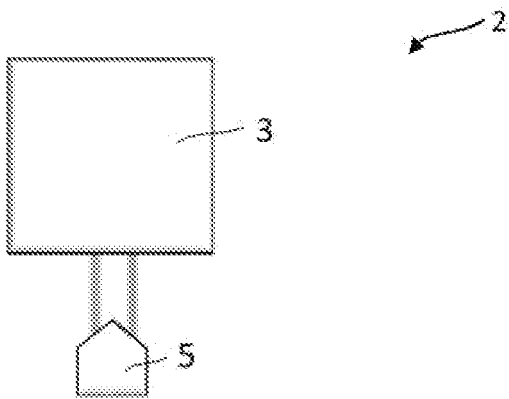


Fig. 2

[Fig. 3]

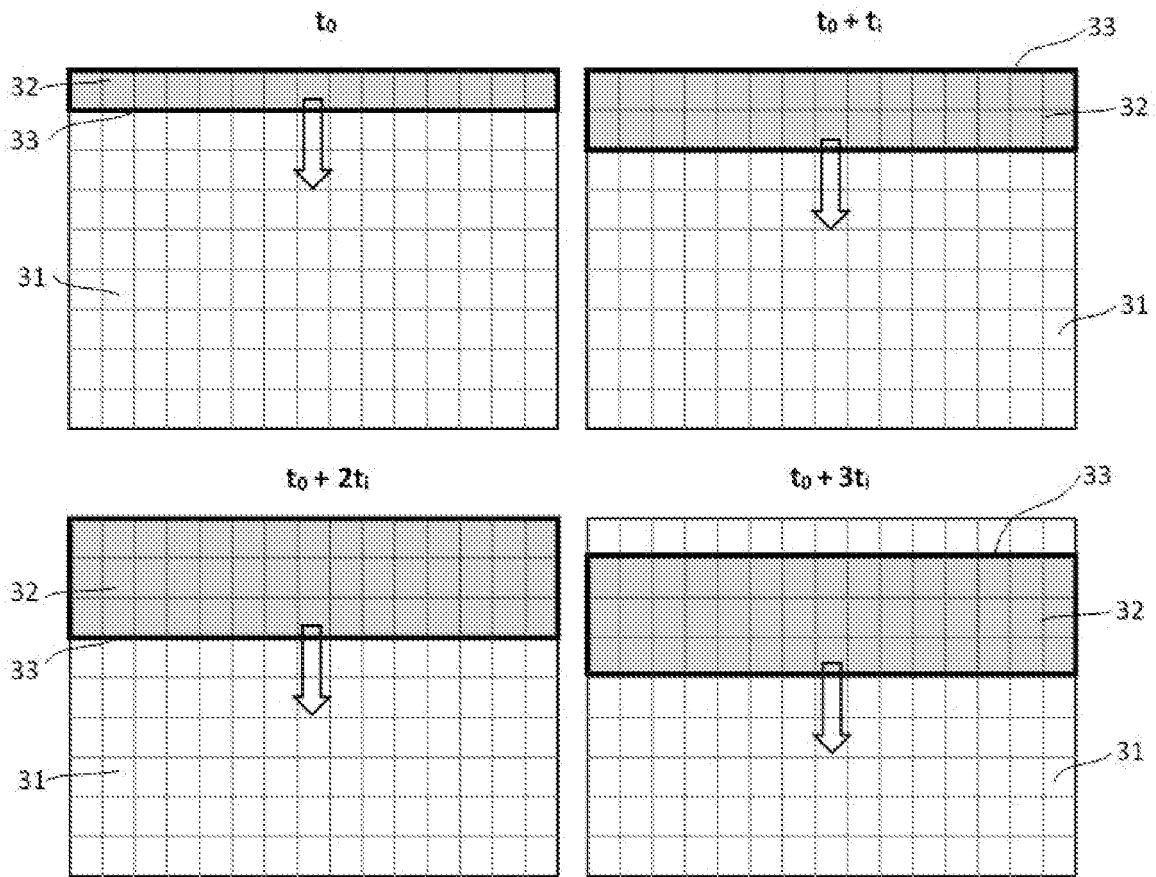


Fig. 3

[Fig. 4]

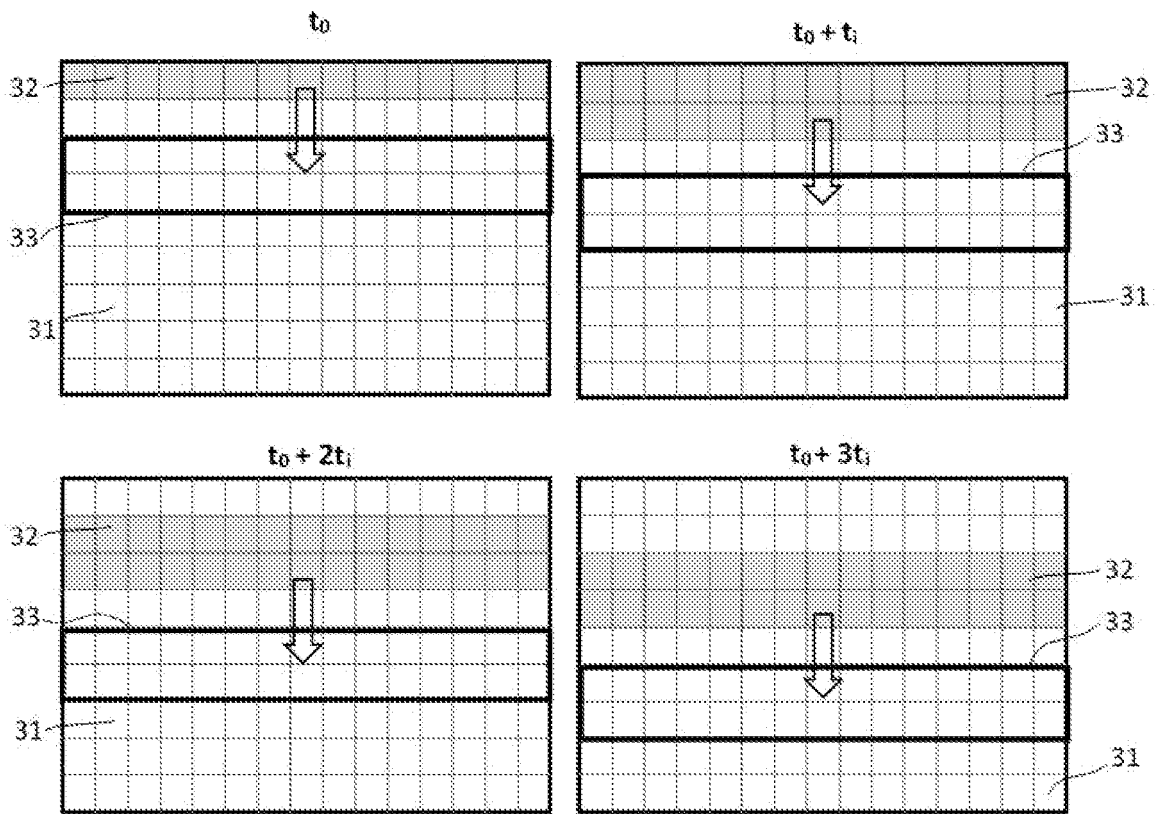
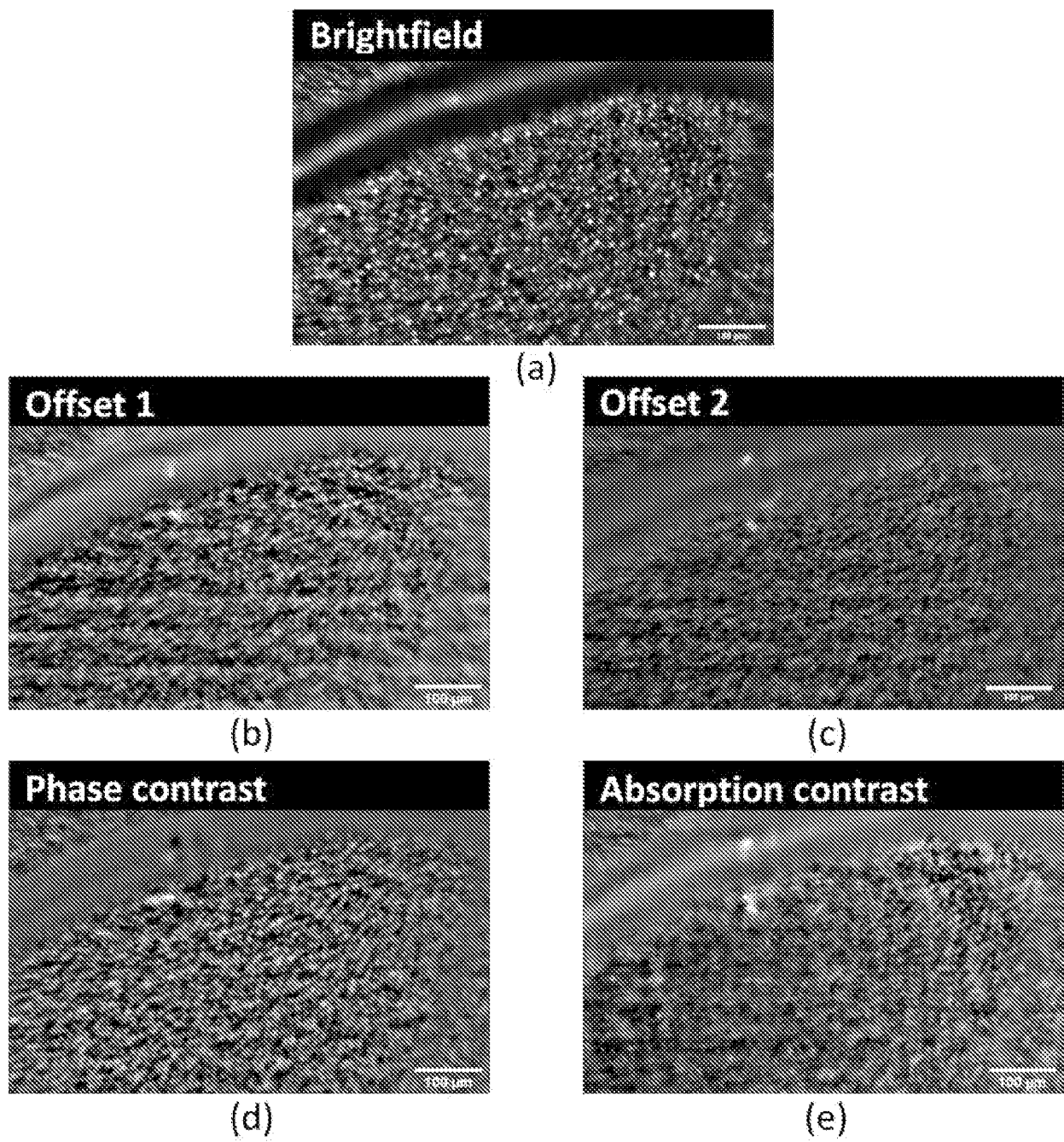


Fig. 4

[Fig. 5]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

**FA 918229
FR 2301471**

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			
X	US 2022/175246 A1 (MORIGUCHI YOSHIKIYO [JP]) 9 juin 2022 (2022-06-09)	1, 8	G01B 9/02001 G02B 26/10	
Y	* abrégé * * alinéas [0067], [0079], [0089] - [0240] * * revendications 1-27; figures 1-6 * -----	2-7, 9-12		
Y	FR 3 112 866 A1 (DAMAE MEDICAL [FR]) 28 janvier 2022 (2022-01-28) * abrégé * * alinéa [0076] - alinéa [0089] * * figure 1B * -----	2-7, 9-12		
Y	US 8 237 835 B1 (MULLER MATTHEW STEFAN [US]) 7 août 2012 (2012-08-07) * abrégé * * figure 12 * * colonne 21, ligne 16 - ligne 42 * -----	2-7, 9-12		
A	FR 3 034 858 A1 (LLTECH MAN [FR]) 14 octobre 2016 (2016-10-14) * le document en entier * -----	1-12		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	JP 4 597744 B2 (TOPCON CORP) 15 décembre 2010 (2010-12-15) * le document en entier * -----	1-12		A61B
A	WO 2017/046225 A1 (ZEISS CARL MEDITEC INC [US]; ZEISS CARL MEDITEC AG [DE]) 23 mars 2017 (2017-03-23) * abrégé * -----	1-12		
A	US 8 488 895 B2 (MULLER MATTHEW S [US]; ELSNER ANN E [US] ET AL.) 16 juillet 2013 (2013-07-16) * abrégé * -----	1-12		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur		
26 septembre 2023		Tommaseo, Giovanni		
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS				
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention 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. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant		

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2301471 FA 918229**

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 **26-09-2023**
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
US 2022175246 A1	09-06-2022	CN 114364303 A	15-04-2022
		EP 4029428 A1	20-07-2022
		JP 7216218 B2	31-01-2023
		JP WO2021049243 A1	18-03-2021
		US 2022175246 A1	09-06-2022
		WO 2021049243 A1	18-03-2021
FR 3112866 A1	28-01-2022	AU 2021314471 A1	23-02-2023
		BR 112023001071 A2	04-04-2023
		CA 3189741 A1	27-01-2022
		CN 116134361 A	16-05-2023
		EP 4185914 A1	31-05-2023
		FR 3112866 A1	28-01-2022
		IL 299821 A	01-03-2023
		JP 2023530196 A	13-07-2023
		WO 2022017784 A1	27-01-2022
US 8237835 B1	07-08-2012	AU 2012202900 B1	30-08-2012
		CA 2777315 A1	19-11-2012
		DK 2527901 T3	23-02-2015
		EP 2527901 A2	28-11-2012
		ES 2530742 T3	05-03-2015
		US 8237835 B1	07-08-2012
FR 3034858 A1	14-10-2016	CA 2982211 A1	13-10-2016
		CN 107743582 A	27-02-2018
		EP 3281053 A1	14-02-2018
		FR 3034858 A1	14-10-2016
		JP 6948311 B2	13-10-2021
		JP 2018517149 A	28-06-2018
		US 2018120550 A1	03-05-2018
		US 2020233198 A1	23-07-2020
		WO 2016162521 A1	13-10-2016
JP 4597744 B2	15-12-2010	JP 4597744 B2	15-12-2010
		JP 2006153838 A	15-06-2006
		US 2006100528 A1	11-05-2006
WO 2017046225 A1	23-03-2017	CN 108027229 A	11-05-2018
		EP 3350540 A1	25-07-2018
		EP 4155661 A2	29-03-2023
		US 2018259316 A1	13-09-2018
		US 2020064117 A1	27-02-2020
		US 2021018311 A1	21-01-2021
		US 2022268565 A1	25-08-2022
		WO 2017046225 A1	23-03-2017

EPO FORM P0465

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2301471 FA 918229**

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 **26-09-2023**
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
US 8488895	B2	16-07-2013	AUCUN