

⑤④ Dispositif d'imagerie multi-spectrale infrarouge sans lentille et procédé de fabrication.

②② Date de dépôt : 19.12.19.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
*Etablissement public à caractère industriel et
commercial — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 25.06.21 Bulletin 21/25.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 22.04.22 Bulletin 22/16.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : DUPOY Mathieu et LORENT Emerick.

⑦③ Titulaire(s) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
*Etablissement public à caractère industriel et
commercial.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET HAUTIER.



Description

Titre de l'invention : Dispositif d'imagerie multi-spectrale infrarouge sans lentille et procédé de fabrication

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne le domaine de l'imagerie optique infrarouge sans lentille. Elle trouvera pour application particulièrement avantageuse, mais non limitative, l'imagerie de tissus biologiques.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Dans de nombreux domaines d'application comme l'agro-alimentaire, la médecine et le contrôle sanitaire, la détection et l'identification de composés chimiques ou bio-chimiques sont nécessaires dans le but de détecter une contamination ou encore de réaliser un diagnostic. La spectrométrie infrarouge (IR) est une technique analytique extrêmement répandue pour détecter et identifier de tels composés chimiques ou bio-chimiques.

[0003] Afin de réaliser une image d'un échantillon à analyser, une solution connue consiste à cartographier l'échantillon via un microscope associé à une source IR polychromatique et un spectromètre IR à transformée de Fourier (FTIR). Un tel système permet de scanner l'échantillon et d'obtenir des images multi-spectrales de résolution spatiale d'environ 10 μm . Un inconvénient de ce type de solution est que l'analyse d'une surface d'échantillon de quelques mm^2 ou quelques cm^2 est longue. Le champ de vue de l'échantillon à imager est dès lors limité. Un tel système est en outre complexe, cher et encombrant.

[0004] L'émergence des lasers à cascade quantique QCL (acronyme de « Quantum Cascade Laser » selon la terminologie anglo-saxonne) permet de réaliser une pluralité de sources IR monochromatiques, couvrant le domaine spectral des sources IR polychromatiques. Dès lors, il n'est plus nécessaire d'utiliser un spectromètre FTIR pour analyser spectralement la lumière ayant interagi avec l'échantillon. Un détecteur sensible dans l'infrarouge suffit à quantifier l'intensité de la lumière transmise ou diffusée par l'échantillon, pour chacune des longueurs d'onde des QCL.

[0005] Par ailleurs, en utilisant une pluralité de détecteurs formant une matrice de pixels, typiquement un imageur IR comprenant des bolomètres, il devient possible de réaliser de l'imagerie multi-spectrale sans spectromètre FTIR. Une telle solution permet de réaliser des images à grand champ de vue et résolues spatialement, sans scanner l'objet. L'imagerie multi-spectrale dans le moyen infrarouge est dès lors plus rapide. En outre, une telle instrumentation comprenant des lasers QCL et un imageur IR peut être relativement compacte. Cela permet de concevoir des dispositifs d'imagerie multi-

spectrale IR portatifs.

- [0006] Le document « Biomedical applications of mid-infrared quantum cascade lasers – a review, K. Isensee et al., The Analyst, vol. 143, no. 24, pp. 5888–5911, 2018 » divulgue des dispositifs d'imagerie IR pour l'observation d'échantillons, en particulier des échantillons biologiques. La section 5 de ce document, intitulée « 5. Microspectroscopy of tissue thin sections » mentionne notamment l'association de QCL et de bolomètres au sein d'un système d'imagerie multi-spectrale IR. Cela permet d'observer un échantillon, sous forme de fine lamelle, en le disposant entre la source de lumière basée sur les QCL et le capteur d'image à base de bolomètres. Une image grand champ peut ainsi être obtenue sans scanner l'objet. Cela permet de réduire le temps d'acquisition de l'image. Le débit d'analyses par imagerie multi-spectrale IR est donc considérablement augmenté.
- [0007] Un tel dispositif permet donc d'obtenir des informations spectrales résolues spatialement sans scanner l'échantillon. Il permet d'obtenir sur un large champ de vue une pluralité d'images de l'échantillon, chaque image étant fonction de la réponse spectrale de l'échantillon à la lumière émise par les différents lasers QCL. Un tel dispositif permet par exemple de réaliser un diagnostic sur des tissus biologiques afin de déterminer des zones cancéreuses et des zones saines.
- [0008] Un inconvénient de ce dispositif est qu'il nécessite une préparation de l'échantillon sous forme de lamelle mince. Un prélèvement d'échantillon sur un objet à imager est donc nécessaire. Ce prélèvement est invasif. Cela ne permet pas de réaliser des mesures médicales in-vivo ou des contrôles qualité in-situ, c'est-à-dire directement sur l'objet.
- [0009] Il existe donc un besoin consistant à fournir un dispositif d'imagerie multi-spectrale IR non invasif, compact, et permettant de réaliser des images grand champ avec un temps d'acquisition réduit.
- [0010] La présente invention a pour objectifs de proposer un tel dispositif, palliant au moins en partie les inconvénients des solutions existantes mentionnées ci-dessus.
- [0011] Un autre objet de la présente invention concerne un procédé de fabrication d'un dispositif d'imagerie multi-spectrale IR non invasif.
- [0012] Les autres objets, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à l'examen de la description suivante et des dessins d'accompagnement. Il est entendu que d'autres avantages peuvent être incorporés. En particulier, certaines caractéristiques et certains avantages du dispositif peuvent s'appliquer *mutatis mutandis* au procédé, et réciproquement.
- [0013] **RÉSUMÉ**
- [0014] Pour atteindre ces objectifs, la présente invention propose un dispositif d'imagerie infra-rouge sans lentilles destiné à imager un échantillon ou un objet, ledit dispositif

comprenant au moins une source de lumière configurée pour émettre une lumière selon plusieurs longueurs d'onde du domaine infra-rouge, et au moins un capteur configuré pour détecter une partie de la lumière émise ayant interagi avec l'échantillon ou l'objet, ledit capteur comprenant une pluralité de pixels.

- [0015] Avantageusement, le capteur est configuré pour détecter une partie réfléchie de la lumière émise, en particulier selon des directions de détection présentant des sens opposés aux directions d'émission de la lumière émise par la source de lumière.
- [0016] De cette manière, il n'est pas nécessaire de mettre en forme l'échantillon à imager. Le dispositif permet avantageusement d'imager un échantillon ou au moins une partie d'un objet sans prélèvement, de manière non-invasive. Il suffit par exemple de placer le dispositif à proximité immédiate de l'échantillon à imager, pour obtenir une pluralité d'images selon plusieurs longueurs d'onde du domaine IR.
- [0017] Ce dispositif permet également de réaliser ces images avec un temps d'acquisition réduit. Chaque image est en effet acquise directement en une seule acquisition, contrairement à un système basé sur le principe de la cartographie, nécessitant une acquisition en chaque point de l'image à réaliser.
- [0018] Ce dispositif est en outre avantageusement dépourvu de lentilles optiques pour former l'image sur le capteur. Cela permet de simplifier considérablement l'instrumentation. Le coût du dispositif est diminué. Cela permet en outre de réduire l'encombrement du dispositif. La compacité du dispositif est améliorée.
- [0019] Il n'est en outre plus nécessaire de prévoir un espace entre la source de lumière IR et l'imageur IR pour introduire l'échantillon. L'encombrement d'un tel dispositif est encore réduit.
- [0020] La présente invention concerne aussi un procédé d'utilisation d'un tel dispositif d'imagerie multi-spectrale IR en réflexion, dans lequel le dispositif est au contact ou à proximité immédiate d'une zone à imager de l'échantillon, de façon à ce que la distance séparant ladite zone à imager et le capteur soit inférieure à 200 μm . Cela permet de maximiser le flux de lumière réfléchie collectée par le capteur. Une telle utilisation est particulièrement avantageuse pour des applications de diagnostic des tissus biologiques, par exemple dans le domaine de l'histopathologie pour différencier des tissus sains de tissus tumoraux.
- [0021] La présente invention concerne encore un procédé de fabrication d'un tel dispositif, dans lequel la source de lumière est une source secondaire formée par une puce photonique comprenant une pluralité d'émetteurs de lumière sous forme de structures d'extraction passives, lesdites structures d'extraction passives étant couplées à une source de lumière primaire configurée pour émettre une lumière selon plusieurs longueurs d'onde du domaine IR. Ce procédé comprend au moins les étapes suivantes :
 - Fournir la source de lumière primaire,

- Former la puce photonique destinée à réémettre, au niveau d’une face d’émission, la lumière émise par la source primaire,
- Fournir un capteur comprenant une pluralité de pixels aptes à détecter, sur une face de détection, une partie de la lumière émise par la source de lumière primaire,
- Assembler la puce photonique au capteur de manière à ce que les faces d’émission et de réception soient tournées d’un même côté,
- Coupler la source de lumière primaire aux structures d’extractions passives de la puce photonique.

BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

- [0022] Les buts, objets, ainsi que les caractéristiques et avantages de l’invention ressortiront mieux de la description détaillée de modes de réalisation de cette dernière qui sont illustrés par les dessins d’accompagnement suivants dans lesquels :
- [0023] [fig.1A] La [fig.1A] illustre schématiquement en vue de perspective un dispositif d’imagerie IR multi-spectrale selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0024] [fig.1B] La [fig.1B] est un agrandissement d’une partie du dispositif illustré à la [fig.1A].
- [0025] [fig.2] La [fig.2] illustre schématiquement en coupe un dispositif d’imagerie IR multi-spectrale selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0026] [fig.3] La [fig.3] présente un calcul du flux de lumière réfléchi par un échantillon et reçu par un pixel d’un imageur IR, en fonction de la distance entre le pixel et l’échantillon.
- [0027] [fig.4] La [fig.4] illustre schématiquement en vue de perspective une puce photonique selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0028] [fig.5] La [fig.5] illustre schématiquement en vue de dessus un arrangement relatif des pixels d’une matrice de détection et des émetteurs d’une matrice d’émission, selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0029] [fig.6A] La [fig.6A] illustre schématiquement en coupe une structure d’extraction passive en regard d’un guide d’onde, formés sur une puce photonique, selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0030] [fig.6B] La [fig.6B] illustre schématiquement en coupe une structure d’extraction passive en regard d’un guide d’onde, formés sur une puce photonique, selon un autre mode de réalisation de la présente invention.
- [0031] [fig.7] La [fig.7] illustre schématiquement en coupe un capteur IR matriciel et une puce photonique, empilés l’un sur l’autre selon un mode de réalisation de la présente invention.
- [0032] [fig.8A] La [fig.8A] illustre schématiquement en vue de dessus une matrice de

détection selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0033] [fig.8B] La [fig.8B] illustre schématiquement en vue de dessus une matrice d'émission selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0034] [fig.8C] La [fig.8C] illustre schématiquement en vue de dessus une superposition d'une matrice d'émission et d'une matrice de détection selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0035] [fig.9A] La [fig.9A] illustre schématiquement en coupe un assemblage d'un premier substrat comprenant des structures d'extraction passives avec un deuxième substrat comprenant des guides d'onde, de manière à former une puce photonique selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0036] [fig.9B] La [fig.9B] illustre schématiquement en coupe la puce photonique obtenue après assemblage, tel qu'illustré à la [fig.9A].

[0037] [fig.10A] Les FIGURES 10A à 10H illustrent schématiquement des étapes de fabrication de structures d'extraction passives selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0038] [fig.10B]

[0039] [fig.10C]

[0040] [fig.10D]

[0041] [fig.10E]

[0042] [fig.10F]

[0043] [fig.10G]

[0044] [fig.10H]

[0045] [fig.11A] Les FIGURES 11A à 11D illustrent schématiquement des étapes de fabrication de guides d'onde selon un mode de réalisation de la présente invention.

[0046] [fig.11B]

[0047] [fig.11C]

[0048] [fig.11D]

[0049] Les dessins sont donnés à titre d'exemples et ne sont pas limitatifs de l'invention. Ils constituent des représentations schématiques de principe destinées à faciliter la compréhension de l'invention et ne sont pas nécessairement à l'échelle des applications pratiques. En particulier les dimensions des différentes structures (extraction, guide d'onde, pixel) ne sont pas représentatives de la réalité.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE

[0050] Avant d'entamer une revue détaillée de modes de réalisation de l'invention, il est rappelé que, de manière facultative, l'invention comprend au moins l'une quelconque des caractéristiques optionnelles suivantes qui peuvent être utilisées en association ou alternativement.

- [0051] Selon un exemple, la source de lumière présente une face d'émission destinée à émettre la lumière en direction de l'échantillon à imager et le capteur présente une face de détection destinée à recevoir la partie réfléchie par l'échantillon de la lumière émise par la source de lumière, lesdites faces d'émission et de détection étant tournées d'un même côté du dispositif.
- [0052] Selon un exemple, l'au moins une source de lumière comprend une source primaire configurée pour émettre une lumière selon plusieurs longueurs d'onde du domaine infra-rouge, couplée à une source secondaire, configurée pour réémettre ladite lumière selon une pluralité de directions d'émission, la face d'émission étant située au niveau de la source secondaire et la source primaire étant déportée en dehors d'une zone d'émission de la face d'émission.
- [0053] Selon un exemple, la source de lumière et le capteur sont empilés l'un sur l'autre.
- [0054] Selon un exemple, la source de lumière et le capteur sont disposés relativement l'un à l'autre de manière à ce que la source de lumière soit plus proche de l'échantillon que le capteur, en fonctionnement.
- [0055] Selon un exemple, la source de lumière et le capteur sont disposés relativement l'un à l'autre de manière à ce que le capteur soit plus proche de l'échantillon que la source de lumière, en fonctionnement.
- [0056] Selon un exemple, la source de lumière et le capteur sont disposés relativement l'un à l'autre de manière à ce que le capteur et la source de lumière soient situés à une distance sensiblement identique de l'échantillon, en fonctionnement.
- [0057] Selon un exemple, les pixels du capteur sont formés par des bolomètres.
- [0058] Selon un exemple, la source de lumière est formée au moins en partie par une puce photonique comprenant une pluralité d'émetteurs de lumière.
- [0059] Selon un exemple, les émetteurs de lumière sont agencés sous forme d'une matrice d'émission.
- [0060] Selon un exemple, les pixels du capteur sont agencés sous forme d'une matrice de détection.
- [0061] Selon un exemple, la puce photonique est superposée au capteur.
- [0062] Selon un exemple, les émetteurs de lumière sont alternés avec les pixels du capteur, en projection selon une direction d'empilement de la puce photonique et du capteur.
- [0063] Selon un exemple, les émetteurs de lumière entourent les pixels du capteur, en projection selon une direction d'empilement de la puce photonique et du capteur.
- [0064] Selon un exemple, la puce photonique forme au moins en partie la source secondaire.
- [0065] Selon un exemple, les émetteurs de lumière sont des structures d'extraction passives couplées à la source primaire.
- [0066] Selon un exemple, la puce photonique comprend des guides d'ondes configurés pour coupler les structures d'extraction passives à la source de lumière primaire.

- [0067] Selon un exemple, la puce photonique comprend des guides d'onde configurés pour guider la lumière émise par la source primaire jusqu'aux structures d'extraction passives.
- [0068] Selon un exemple, les structures d'extraction passives présentent chacune au moins une facette inclinée d'un angle compris entre 30° et 60° par rapport à la face d'émission.
- [0069] Selon un exemple, les facettes des structures d'extraction passives sont en regard des guides d'onde et sont configurées pour réfléchir la lumière sortant des guides d'onde selon la pluralité de directions d'émission, de façon à former des miroirs d'extraction.
- [0070] Selon un exemple, la source de lumière primaire comprend une pluralité de lasers à cascade quantique QCL.
- [0071] Selon un exemple, la formation de la puce photonique comprend :
- Former les structures d'extraction passives en saillie sur une première face d'un premier substrat à base de silicium, par gravure dudit substrat,
 - Former des guides d'onde en regard des structures d'extraction, lesdits guides d'onde étant configurés pour guider la lumière émise par la source de lumière primaire jusqu'aux structures d'extraction.
- [0072] Selon un exemple, les guides d'onde sont formés directement sur la première face du premier substrat à base de silicium, dans au moins une couche en un matériau différent du silicium, et les structures d'extraction passives sont formées dans ladite au moins une couche.
- [0073] Selon un exemple, les guides d'onde sont formés sur une deuxième face d'un deuxième substrat, et le deuxième substrat est assemblé au premier substrat de manière à ce que les guides d'ondes soient en regard des structures d'extraction du premier substrat.
- [0074] Selon un exemple, le procédé comprend en outre un amincissement du deuxième substrat à partir d'une face opposée à la deuxième face.
- [0075] Selon un exemple, les structures d'extraction passives sont gravées de manière à présenter chacune au moins une facette inclinée d'un angle compris entre 30° et 60° par rapport à la première face.
- [0076] Selon un exemple, un dépôt métallique est effectué sur chacune desdites au moins une facette, de façon à former des miroirs d'extraction.
- [0077] La présente invention trouve pour domaine préférentiel d'application une plateforme de diagnostic des tissus biologiques par analyse optique dans le domaine spectral du moyen infrarouge (MIR), non-invasive.
- [0078] Le dispositif selon la présente invention, combinant, dans un mode de réalisation, une série de QCLs et un détecteur IR sans lentilles intermédiaires, agencés de façon à permettre une imagerie IR multi-spectrale en réflexion, permet notamment de réaliser

de tels diagnostics de façon non-invasive.

- [0079] Le dispositif selon la présente invention peut avantageusement être fabriqué à l'aide des technologies classiques de micro-fabrication, en particulier les technologies silicium développées dans les filières microélectroniques.
- [0080] Dans ce qui suit, le terme « absorption » ou ses équivalents se réfère au phénomène par lequel l'énergie d'une onde électromagnétique est transformée en une autre forme d'énergie, par exemple sous forme de chaleur.
- [0081] Dans ce qui suit, le terme « diffusion » ou ses équivalents se réfère au phénomène par lequel un milieu de propagation produit une répartition, dans de nombreuses directions, de l'énergie d'une onde électromagnétique, lumineuse par exemple.
- [0082] Dans ce qui suit, le terme « réflexion » ou ses équivalents se réfère au phénomène de réémission depuis une surface d'un rayonnement lumineux incident, selon une ou plusieurs directions présentant des sens opposés à la direction incidente. Dans la présente description, une surface est considérée comme réfléchissante dès lors qu'elle réémet une partie au moins d'un rayonnement lumineux incident. La surface de réflexion peut être caractérisée par un facteur de réflexion compris entre 0 et 1. La réflexion peut être spéculaire (une direction de réflexion), ou diffuse (plusieurs directions de réflexion).
- [0083] On entend par un objet ou un matériau « transparent à une longueur d'onde donnée » ou simplement « transparent », un objet ou un matériau laissant passer au moins 90% de l'intensité lumineuse de la lumière présentant cette longueur d'onde. Par exemple, une plaque de silicium présentant une épaisseur inférieure ou égale à 1 mm est transparente à un rayonnement lumineux présentant une longueur d'onde comprise entre 6 μm et 10 μm . Les pertes optiques par absorption du silicium sont inférieures à 5 dB/cm sur cette gamme de longueurs d'onde.
- [0084] Le ou les rayonnement(s) lumineux incident(s) sont émis par une ou des source(s) primaire(s) correspondante(s). La lumière émise par ces sources appartient au domaine infrarouge et de préférence au domaine du moyen infrarouge, c'est-à-dire pour une gamme de longueur d'onde comprise entre 5 μm et 11 μm . Ces sources primaires comprennent typiquement une pluralité de lasers monochromatiques ou quasi-monochromatiques, présentant chacun une longueur d'onde principale. La longueur d'onde principale est l'unique longueur d'onde émise par un laser monochromatique, ou la longueur d'onde principalement émise par un laser quasi-monochromatique.
- [0085] Le dispositif selon l'invention comprend en outre un « capteur ». Ce capteur se présente typiquement sous forme d'une matrice de photodétecteurs IR formant des pixels. Les termes « capteur » et « imageur » sont donc ici employés en synonymes.
- [0086] On entend par un élément structurel, une couche, « à base » d'un matériau A, un élément structurel, une couche comprenant ce matériau A uniquement ou ce matériau

A et éventuellement d'autres matériaux, par exemple des éléments dopants ou des éléments d'alliage. Ainsi, si un substrat transparent est désigné comme étant « à base de silicium », cela signifie qu'il peut être formé uniquement de silicium ou de silicium et éventuellement d'autres matériaux, par exemple des impuretés ou du germanium.

- [0087] Dans la présente demande, le diamètre, la largeur et la longueur sont prises selon une direction transversale à l'axe d'empilement. L'épaisseur ou la profondeur sont prises selon l'axe d'empilement.
- [0088] Dans la présente description, l'expression « sans lentilles » signifie que le dispositif ne comprend pas d'éléments optiques sous forme de lentilles sur le trajet des rayons lumineux entre la face d'émission de la source de lumière et le capteur.
- [0089] La présente invention peut servir à l'imagerie d'échantillons, en particulier d'échantillons de nature biologique, et en particulier in vivo. Le dispositif d'imagerie IR multi-spectrale peut ainsi être appliqué directement contre la peau d'un patient pour des besoins de diagnostic. La face d'émission de la source est de préférence positionnée de façon à être sensiblement parallèle à la surface de l'échantillon. La direction principale d'émission de la source de lumière est ainsi sensiblement perpendiculaire à la surface de l'échantillon.
- [0090] De préférence, la source de lumière est configurée pour émettre, via chaque émetteur, de la lumière dans une portion de l'espace, autour d'une direction principale d'émission. Notamment, la portion de l'espace peut être une portion conique dont l'axe est la direction principale d'émission. La direction principale d'émission peut être perpendiculaire à la face d'émission de la source de lumière. D'une manière générale, la direction des rayons lumineux émis présente une composante majoritaire suivant la direction principale d'émission, et une composante minoritaire suivant une direction perpendiculaire à la direction principale d'émission.
- [0091] Avantageusement, les émetteurs de la source de lumière ont des directions principales d'émissions parallèles.
- [0092] De préférence, chaque pixel du capteur est configuré pour recevoir de la lumière depuis une portion de l'espace, autour d'une direction principale de détection. La direction principale de détection peut être perpendiculaire à la face de détection du capteur. D'une manière générale, la direction des rayons lumineux détectés, issus de la réflexion, présente une composante majoritaire suivant la direction principale de détection et une composante minoritaire suivant une direction perpendiculaire à la direction principale de détection.
- [0093] Avantageusement, les pixels du capteur ont des directions principales de détection parallèles.
- [0094] De préférence, les directions principales de détection et les directions principales d'émission sont parallèles. Avantageusement, les directions principales de détection et/

ou les directions principales d'émission sont perpendiculaires à la surface de l'échantillon.

- [0095] Suivant un aspect de l'invention, les directions de détection et les directions d'émission ont des sens opposés. Cela ne signifie pas que les directions sont parallèles, car la lumière, aussi bien émise que réfléchi, couvrira généralement une certaine portion de l'espace. Cependant, leurs composantes principales ont des sens opposés.
- [0096] Selon l'invention, le dispositif est configuré pour que la lumière sorte du dispositif en direction de l'échantillon et pour qu'une partie de cette lumière, réfléchi, entre à nouveau dans le dispositif après avoir interagi avec l'échantillon.
- [0097] Suivant des modes de réalisation, le capteur et la source de lumière sont superposés. Cela s'entend d'une disposition relative de ces deux composants, pour le moins en ce qui concerne les faces d'émission et de détection. Cependant, la superposition ne signifie pas forcément que, en projection selon un axe d'empilement, les émetteurs de lumière et les pixels sont superposés. Notamment, suivant cette projection, les émetteurs peuvent entourer les pixels, ou inversement.
- [0098] Il est précisé que dans le cadre de la présente invention, le terme « sur », « surmonte », « recouvre » ou « sous-jacent » ou leurs équivalents ne signifient pas « au contact de ». Ainsi par exemple, une puce photonique recouvrant un imageur ne signifie pas obligatoirement que ceux-ci sont directement au contact l'un de l'autre mais cela signifie que la puce photonique recouvre au moins partiellement l'imageur en étant soit directement à son contact, soit en étant séparé de celui-ci par au moins une autre couche ou au moins un autre élément.
- [0099] Sauf indication spécifique du contraire, des caractéristiques techniques décrites en détail pour un mode de réalisation donné peuvent être combinées aux caractéristiques techniques décrites dans le contexte d'autres modes de réalisation décrits à titre exemplaire et non limitatif. En particulier, le nombre d'émetteurs de lumière ou de structures d'extraction, les différents motifs des matrices d'émission ou de réception et/ou les différentes formes des éléments du dispositif illustrés sur les figures peuvent être combinés de manière à former un autre mode de réalisation qui n'est pas nécessairement illustré ou décrit. Un tel mode de réalisation n'est évidemment pas exclu de l'invention.
- [0100] Les termes « sensiblement », « environ », « de l'ordre de » signifient « à 10% près » ou, lorsqu'il s'agit d'une orientation angulaire, « à 10° près » et de préférence « à 5° près ». Ainsi, une direction sensiblement normale à un plan signifie une direction présentant un angle de $90 \pm 10^\circ$ par rapport au plan.
- [0101] Un premier exemple de dispositif selon l'invention va maintenant être décrit en référence aux figures 1A, 1B et 2.
- [0102] Comme illustré sur le schéma de la [fig.1A], le dispositif 1 d'imagerie IR en

réflexion est destiné à venir à proximité immédiate ou au contact de l'échantillon 2 à imager. L'échantillon 2 est par exemple un tissu biologique ou un produit agroalimentaire.

- [0103] Le dispositif 1 comprend typiquement un corps 5 abritant une source de lumière 3 et un imageur 4. Le corps 5 peut se présenter sous forme cylindrique, tel qu'illustré sur la [fig.1A], ou plus généralement sous toute forme présentant une bonne ergonomie, par exemple de façon à faciliter la prise en main du dispositif 1.
- [0104] Le corps 5 peut comprendre des composants périphériques, tels qu'une alimentation électrique ou une connexion 6 d'alimentation électrique, ou encore au moins une fibre optique 7. Une telle fibre optique 7 permet notamment de visualiser la zone de l'échantillon 2 à imager. Elle peut être reliée à une caméra. Cela permet de d'améliorer la précision de positionnement du dispositif contre l'échantillon, par exemple au niveau d'un potentiel carcinome directement sur un patient.
- [0105] Le corps 5 comprend à son extrémité distale la source de lumière 3 et l'imageur 4. La [fig.1B] montre une vue agrandie de l'extrémité distale du dispositif 1. La source de lumière 3 et l'imageur 4 peuvent typiquement être superposés. Par exemple, la source de lumière 3 et l'imageur 4 forment un empilement selon z, avec la source de lumière 3 située au plus près de l'extrémité distale du dispositif 1, et l'imageur 4 situé contre la source de lumière 3, en léger retrait de l'extrémité distale du dispositif 1. La source de lumière 3 présente une face d'émission 300 destinée à émettre la lumière. L'imageur 4 présente une face de détection 400 destinée à recevoir la lumière réfléchiée par l'échantillon 2. Pour permettre une telle imagerie en réflexion, les faces d'émission et de détection 300, 400 sont tournées d'un même côté, vers l'échantillon 2 à analyser.
- [0106] L'imageur 4 est configuré pour détecter une lumière dans le domaine IR ou MIR. Il comprend typiquement des bolomètres IR répartis de façon à former une matrice de pixels. L'imageur 4 peut être associé à une électronique de commande 42, et/ou un régulateur 43 destiné à thermaliser les bolomètres IR.
- [0107] La source de lumière 3 peut être une source de lumière primaire 3a, ou une source de lumière secondaire 3b. Tel qu'illustré à la [fig.2], le dispositif peut typiquement comprendre une source de lumière primaire 3a couplée à des émetteurs de lumière 31 formant la source de lumière secondaire 3b. Les émetteurs de lumière 31 sont dans ce cas des structures d'extraction passives. Selon une possibilité non illustrée, les émetteurs de lumière 31 sont des diodes électroluminescentes (LED) et forment directement une source de lumière primaire 3a.
- [0108] Tel qu'illustré à la [fig.2] et de façon préférée, le dispositif comprend une source de lumière primaire 3a couplée à une source de lumière secondaire 3b. Cela permet de déporter la source de lumière primaire 3a. Cela permet de réduire l'encombrement de la source de lumière 3 au niveau de l'extrémité distale du dispositif.

- [0109] La source de lumière primaire 3a peut typiquement comprendre des lasers à cascade quantique QCL 32 émettant selon des longueurs d'onde comprises entre 5 μm et 10 μm . Chacun des lasers QCL 32 peut être associé à une pluralité d'émetteurs de lumière 31 de la source de lumière secondaire 3b. La surface d'émission 300 est ainsi augmentée. Cela permet d'éclairer plus largement et/ou plus uniformément la zone de l'échantillon 2 à imager.
- [0110] Dans ce cas, les émetteurs de lumière 31 sont de préférence des structures d'extraction passives couplées aux lasers QCL 32 via des miroirs 321, des fibres optiques ou des guides d'ondes 312. Les émetteurs de lumière 31 et les guides d'ondes 312 sont typiquement regroupés au sein d'une puce photonique 30. Dans ce mode de réalisation, la puce photonique 30 est posée sur un imageur 4 formé par une matrice de bolomètres. La distance séparant la puce photonique 30 de la partie sensible des bolomètres, ou encore la distance séparant la face d'émission 300 de la face de détection 400, est de l'ordre de quelques dizaines de microns, par exemple comprise entre 10 μm et 200 μm . La lumière issue des lasers QCL 32 est guidée par les guides d'ondes 312 jusqu'aux structures d'extraction passives formant les émetteurs de lumière 31, puis dirigée vers l'échantillon 2 par les émetteurs de lumière 31. Les émetteurs de lumière 31 forment typiquement une matrice d'émission configurée pour éclairer de façon uniforme la zone de l'échantillon 2 à imager. L'échantillon 2 va typiquement absorber, réfléchir ou diffuser la lumière émise ou réémise par les émetteurs de lumière 31. La matrice de bolomètres placée derrière la puce photonique 30 est configurée pour recevoir la partie réfléchie de la lumière. Avantageusement, la puce photonique 30 est à base de silicium. Le silicium est transparent aux longueurs d'onde IR et MIR. Cela permet de placer la puce photonique 30 devant l'imageur 4, sans écranter les bolomètres. La puce photonique 30 peut être à base d'un autre matériau transparent aux longueurs d'onde IR et MIR, par exemple à base de germanium.
- [0111] La [fig.3] montre un résultat de flux collecté en réflexion par un pixel (bolomètre) de 25 μm de côté pour un éclairage de 10 mW/cm^2 d'un objet réfléchissant lambertien présentant un albédo égal à 1. Pour une distance de 250 μm entre le pixel et l'objet, le pixel reçoit un flux de lumière réfléchie présentant une puissance optique d'environ 3 nW . Une telle puissance est parfaitement détectable par un pixel d'imageur IR, en particulier de type bolomètre IR. Comme illustré à la [fig.3], plus la distance entre la zone d'échantillon 2 à imager et l'imageur 4 est faible, plus le flux de lumière réfléchie collecté par l'imageur 4 est important. Avantageusement, la puce photonique 30 présente une épaisseur selon z inférieure ou égale à 300 μm , de préférence inférieure ou égale à 250 μm , et de préférence inférieure ou égale à 200 μm .
- [0112] Le dispositif 1 est de préférence utilisé directement en contact ou à proximité immédiate de la zone d'échantillon 2 à imager. En particulier, la face d'émission 300

peut être placée contre la zone à imager. De cette façon, la distance séparant la zone à imager et le capteur peut être inférieure ou égale à 250 μm , de préférence inférieure à 200 μm . Cela permet de maximiser le flux de lumière réfléchi collectée par le capteur.

- [0113] La [fig.4] illustre un exemple de puce photonique 30. Dans cet exemple, les structures d'extraction passives 311 sont disposées en pourtour d'une ouverture 34 de la puce photonique 30. Cette ouverture 34 peut être configurée pour accueillir au moins en partie l'imageur 4. Ainsi, la matrice d'émission entoure la matrice de détection, en projection selon z. L'ouverture 34 permet de laisser passer les rayons réfléchis par l'échantillon, vers l'imageur 4 (non illustré). Ces rayons réfléchis présentent typiquement une direction principale de détection selon l'axe z, de sens +z.
- [0114] Les structures d'extraction passives 311 sont configurées pour réémettre des rayons incidents vers l'échantillon (non illustré). Ces rayons incidents présentent typiquement une direction principale d'émission selon l'axe z, de sens -z.
- [0115] Les structures d'extraction passives 311 sont de préférence couplées à des guides d'onde 312, 312a, 312b. Selon un exemple, la puce photonique 30 comprend une entrée optique 33 destinée à recevoir la lumière émise par la source primaire 3a. Cette entrée optique 33 dessert des guides d'ondes principaux 312a véhiculant la lumière vers l'ensemble des structures d'extraction passives 311. Des guides d'ondes secondaires 312b peuvent être associés chacun à une structure d'extraction passive 311 particulière. Les guides d'ondes secondaires 312b peuvent par exemple être couplés aux guides d'ondes principaux 312a par un couplage évanescent, tel qu'illustré sur la [fig.4]. Les structures d'extraction passives 311 présentées dans cet exemple peuvent être remplacées par des émetteurs de lumière 31, par exemple des LED. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'utiliser des guides d'onde 312. Des combinaisons de différents types d'émetteurs de lumière 31, par exemple des LED et des structures d'extraction passives 311, peuvent être envisagées. Selon une possibilité, une partie des émetteurs de lumière 31 sont par exemple des LED, et une autre partie des émetteurs de lumière 31 sont par exemple des structures d'extraction passives 311. Dans ce cas, des guides d'onde 312 peuvent être associés aux LED et aux structures d'extraction passives 311 de manière à véhiculer la lumière émise en chaque point de la matrice d'émission.
- [0116] La [fig.5] présente un autre exemple de répartition des émetteurs de lumière 31. Dans cet exemple, les matrices d'émission et de détection 310, 410 sont au moins en partie superposées, en projection selon z. Ainsi, les émetteurs de lumière 31 sont chacun entourés par des pixels 41 de l'imageur 4. Cela permet d'obtenir une surface d'émission, dans le plan de la feuille, relativement homogène et uniforme. La répartition des pixels 41 et des émetteurs de lumière 31 est de préférence effectuée de façon à obtenir un bon compromis entre la surface d'émission et la surface de détection. Des pixels 41 peuvent être masqués par des émetteurs de lumière 31. Cela

permet de simplifier la conception de la matrice de bolomètres tout en conservant une surface de détection acceptable.

- [0117] Les figures 6A et 6B illustrent deux modes de réalisation particuliers d'une structure d'extraction passive 311 et d'un guide d'onde 312. Les guides d'onde 312 sont configurés pour guider une lumière de longueur d'onde comprise entre 5 μm et 11 μm . Dans l'exemple de la [fig.6A], le guide d'onde 312 et la structure d'extraction 311 sont formés dans une couche 11 à base de germanium ou de silicium-germanium SiGe, sur un substrat 10 à base de silicium Si. La structuration du guide d'onde 312 et de la structure d'extraction 311 peut ainsi se faire selon une approche dite monolithique. Cela permet de former le guide d'onde 312 et la structure d'extraction 311 directement sur un même substrat 10.
- [0118] Le guide d'onde 312 comprend typiquement une gaine formée par la couche 11 et un cœur 13 formé au sein de la couche 11. La gaine est par exemple en SiGe présentant une teneur en germanium d'environ 20%. Le cœur 13 est par exemple en Ge ou en SiGe présentant une teneur en germanium d'environ 40%. Le guide d'onde 312 peut présenter une facette de sortie F_G inclinée par rapport au plan basal du substrat 10. Une telle facette inclinée peut typiquement être obtenue par gravure humide à base d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH). D'autres matériaux de guide d'onde peuvent être utilisés, par exemple et de façon non limitative : CaF_2 , BaF_2 , ZnS , ZnSe , CdSe , SiN , AlN , Ta_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 , carbone amorphe, chalcogénure.
- [0119] La structure d'extraction 311 est ici formée directement dans la couche 11, par exemple en SiGe présentant une teneur en germanium d'environ 20%. La structure d'extraction 311 présente typiquement une facette F_E inclinée par rapport au plan basal du substrat 10. L'angle d'inclinaison peut être compris entre 30° et 60° par rapport au plan basal, par exemple de l'ordre de 45° ou de 55° . La facette F_E est située en regard de la facette de sortie F_G du guide d'onde 312. La facette F_E est configurée pour réfléchir la lumière sortant du guide d'onde 312 selon des directions d'émission ou de réémission présentant une composante principale sensiblement normale au plan basal. La facette F_E est de préférence métallisée par une couche de métal 12. La facette F_E de la structure d'extraction 311 forme typiquement un miroir d'extraction.
- [0120] Dans l'exemple de la [fig.6B], la structure d'extraction 311 est formée dans le substrat 10 à base de silicium Si, et le guide d'onde 312 est formé dans une couche 11 à base de germanium ou de silicium-germanium SiGe. La structuration du guide d'onde 312 peut ainsi se faire sur un deuxième substrat indépendant du substrat 10 comprenant la structure d'extraction 311, selon une approche dite hétérogène. Dans cet exemple, le guide d'onde 312 comprend également une gaine formée par la couche 11 et un cœur 13 formé au sein de la couche 11, comme précédemment. Le guide d'onde

312 peut présenter une facette de sortie FG normale au plan basal du substrat 10. Une telle facette normale peut typiquement être obtenue par gravure sèche, par exemple par plasma. La structure d'extraction 311 est ici formée directement dans le substrat 10. Elle présente également une facette FE en regard de la facette de sortie FG du guide d'onde 312. Cette facette FE est inclinée et de préférence métallisée, comme précédemment.

- [0121] La [fig.7] présente un dispositif comprenant une puce photonique 30 présentant une face 301 destinée à venir à proximité ou au contact d'un échantillon 2, typiquement un échantillon biologique. Le dispositif comprend en outre un imageur 4 comprenant une pluralité de pixels 41, par exemple sous forme d'une matrice de microbolomètres. La puce photonique 30 présente une face 302 opposée à la face 301. Cette face 302 est ici destinée à venir à proximité ou au contact des pixels 41 de l'imageur 4.
- [0122] La puce photonique 30 est de préférence configurée pour éclairer l'échantillon 2 dans le moyen infrarouge de manière homogène selon des directions d'émission E. La puce photonique 30 est typiquement transparente dans le moyen infrarouge de manière à laisser passer la partie de la lumière rétrodiffusée ou réfléchie par l'échantillon 2 vers les pixels 41, selon des directions de détection D.
- [0123] La puce photonique 30 comprend par exemple des structures d'extraction 311 et des guides d'onde 312 agencés comme décrit précédemment en référence à la [fig.6B].
- [0124] Les figures 8A à 8C présentent des répartitions de pixels 41 et d'émetteurs de lumière 31 permettant d'éviter ou de limiter l'écrantage des pixels 41 par les émetteurs de lumière 31. La [fig.8A] présente une matrice de détection 410 où les pixels 41 sont séparés les uns des autres par des zones inter-pixels 411. La [fig.8B] présente une matrice d'émission 310 où les émetteurs de lumière 31, par exemple des structures d'extraction 311 formant des micro-miroirs, sont disposés de façon à coïncider avec les zones inter-pixels 411 de la matrice de détection 410, une fois superposés. La [fig.8C] illustre une superposition des matrices d'émission et de détection 310, 410. Les micro-miroirs sont de préférence situés aux intersections des zones inter-pixels 411. Cela permet de placer des guides d'onde entre les micro-miroirs et entre les intersections, en superposition des zones inter-pixels 411 (non illustré). Ainsi, les pixels 41 de l'imageur ne sont pas écrantés par les micro-miroirs et/ou les guides d'onde de la puce photonique.
- [0125] Les figures 9A, 9B illustrent un principe de formation de la puce photonique selon une approche hétérogène. Selon cette approche, les structures d'extraction 311 sont formées sur une première face 101 d'un premier substrat 10a à base de silicium, et les guides d'onde 312 sont formés sur une deuxième face 102 d'un deuxième substrat 10b à base de silicium. Dans la suite, le premier substrat 10a portant les structures d'extraction 311 sous forme de micro-miroirs est dénommé « plaquette miroirs ». Le

deuxième substrat 10b portant les guides d'onde 312 est dénommé « plaquette guides d'onde ». La puce photonique 30 est ensuite formée par assemblage des plaquettes guides d'onde et miroirs au niveau de leurs faces 102, 101.

[0126] Les technologies de la microélectronique permettent de réaliser ces plaquettes et de les assembler de façon compacte avec une précision d'intégration suffisante pour former la puce photonique 30.

[0127] Les figures 10A à 10H présentent des étapes de fabrication de la plaquette miroirs. La [fig.10A] illustre la fourniture d'un substrat 10a de silicium (100). L'orientation cristalline du substrat est notamment choisie en fonction des chimies de gravure anisotrope utilisées pour la gravure des facettes des miroirs. Un masque dur 14 typiquement à base de nitrure de silicium, est déposé sur le substrat 10a, par exemple par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD) ([fig.10B]). Des motifs 15 en résine photosensible sont ensuite formés par photolithographie ([fig.10C]). Le masque dur 14 est gravé ([fig.10D]) et la résine est retirée ([fig.10E]).

[0128] Le substrat 10a est ensuite gravé ([fig.10F]) par gravure anisotrope du Si en solution alcaline, par exemple à base de hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH), ou d'hydroxyde de potassium (KOH), ou de pyrocatechol et eau (EDP). L'inclinaison des facettes FE obtenues après gravure peut varier selon l'orientation cristallographique du substrat, la nature du masque dur et la solution de gravure utilisée. Typiquement des angles d'inclinaison de $54,7^\circ$ ou de 45° peuvent être réalisés. Cette technique permet d'obtenir des facettes très lisses. D'autres techniques permettent d'obtenir des facettes inclinées. Une technique de lithographie couramment dénommée « grey tone » (nuances de gris) consiste à faire varier la dose d'énergie lors de la lithographie de la résine servant de masque de gravure. Le motif de résine présente après développement une pente qui est transférée dans le substrat par gravure sèche, par exemple par gravure RIE (Reactive Ion Etching, soit gravure réactive ionique en français).

[0129] La hauteur des structures d'extraction ainsi formées peut être choisie en fonction de la hauteur des guides d'onde réalisés sur la plaquette guide d'ondes et/ou de la largeur des zones inter-pixels. Cette hauteur est typiquement comprise entre 9 μm et 11 μm .

[0130] Le masque dur 14 est ensuite retiré ([fig.10G]) et les facettes FE sont métallisées ([fig.10H]). La métallisation des facettes FE peut se faire par dépôt d'une bicouche titane-or Ti/Au. Le dépôt Ti/Au présente une épaisseur typiquement comprise entre 50 nm et 500 nm. La métallisation peut être réalisée au moyen d'un pochoir ou plus classiquement par photolithographie et gravure. La métallisation peut alternativement être effectuée par fluage. La technique de dépôt par fluage consiste à déposer le matériau, par exemple le métal, sur la structure, par exemple les facettes, que l'on veut recouvrir. Un recuit permet ensuite d'atteindre une transition vitreuse du matériau pour qu'il puisse épouser la forme de la structure. Le métal assure la fonction de réflecteur des

micro-miroirs. Il permet en outre avantageusement de faciliter l'assemblage mécanique de la plaquette miroirs avec la plaquette guides d'onde lors d'un collage par thermo-compression.

- [0131] Les figures 11A à 11D présentent des étapes de fabrication de la plaquette guides d'onde. La [fig.11A] illustre la fourniture d'un substrat 10b de silicium. Une succession d'épitaxies permet de former les couches 11 et 13 formant respectivement la gaine et le cœur des guides d'onde ([fig.11B]). Les couches 11 sont par exemple formées par épitaxie de SiGe à 40% de Ge et la couche 13 est par exemple formée par épitaxie de Ge. Les épaisseurs déposées sont typiquement de l'ordre de 3 μm pour le Ge et de 3 à 5 μm pour le SiGe. Le guide d'onde obtenu à la [fig.11B] est un guide d'onde plan, dit guide 2D, qui s'étend sur toute la surface du substrat 10b.
- [0132] Un cordon de scellement 105 en or Au est ensuite défini et réalisé par des étapes de dépôt / lithographie / gravure, en périphérie de la plaquette guides d'onde. Ce cordon de scellement 105 permet ensuite l'assemblage des plaquettes miroirs et guides d'onde.
- [0133] Des zones d'extraction 313 destinées à accueillir les structures d'extraction 311 lors de l'assemblage, sont ensuite définies par lithographie / gravure ([fig.11D]).
- [0134] Les plaquettes miroirs et guides d'onde sont ensuite assemblées. Un assemblage par thermocompression Au-Au, est de préférence utilisé. La thermocompression métal-métal présente l'avantage, outre sa mise en œuvre relativement simple et peu coûteuse, d'être réalisée à basse température ($<400^{\circ}\text{C}$), typiquement environ 250°C . D'autres techniques d'assemblage sont également possibles (collage eutectique, collage direct, collage polymère...). Les tolérances d'alignement pour ce type d'assemblage par thermocompression sont de l'ordre de quelques microns, typiquement $\pm 5 \mu\text{m}$.
- [0135] Après assemblage, un amincissement de la plaquette guides d'onde est de préférence effectué, depuis la face 103 tel qu'illustré à la [fig.9A]. Le substrat 10b présente après amincissement une épaisseur de préférence inférieure ou égale à 300 μm . Cela permet in fine de réduire la distance entre la surface de l'échantillon à analyser et le capteur.
- [0136] La plaquette résultant de l'assemblage peut être découpée en plusieurs puces photoniques.
- [0137] L'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation décrits mais s'étend à tout mode de réalisation entrant dans la portée de la revendication 1.]

Revendications

- [Revendication 1] Dispositif (1) d'imagerie infra-rouge sans lentilles destiné à imager un échantillon (2), comprenant au moins une source de lumière (3, 3a, 3b) configurée pour émettre une lumière selon plusieurs longueurs d'onde du domaine infrarouge, ladite au moins une source de lumière (3, 3a, 3b) présentant une face d'émission (300) destinée à émettre la lumière en direction de l'échantillon (2) à imager, ledit dispositif (1) comprenant en outre au moins un capteur (4) configuré pour détecter une partie réfléchie de la lumière émise ayant interagi avec l'échantillon, ledit capteur comprenant une pluralité de pixels (41) et présentant une face de détection (400) destinée à recevoir ladite partie réfléchie de la lumière émise, les faces d'émission et de détection (300, 400) étant tournées d'un même côté du dispositif (1), ladite au moins une source de lumière (3, 3a, 3b) comprenant une source primaire (3a) configurée pour émettre une lumière selon plusieurs longueurs d'onde du domaine infrarouge, couplée à une source secondaire (3b) configurée pour réémettre ladite lumière selon une pluralité de directions d'émission (E), la face d'émission (300) étant située au niveau de la source secondaire (3b) et la source primaire (3a) étant déportée en dehors d'une zone d'émission de la face d'émission (300), le dispositif étant caractérisé en ce que la source secondaire (3b) est formée au moins en partie par une puce photonique (30) comprenant une pluralité de structures d'extraction passives (311) couplées à la source primaire (3a).
- [Revendication 2] Dispositif selon la revendication précédente dans lequel la source de lumière (3, 3a, 3b) et le capteur (4) sont empilés l'un sur l'autre.
- [Revendication 3] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel les émetteurs de lumière (31) sont agencés sous forme d'une matrice d'émission (310) et les pixels (41) du capteur sont agencés sous forme d'une matrice de détection (410), la puce photonique (30) étant superposée au capteur (4) de sorte que les émetteurs de lumière (31) soient alternés avec les pixels (41) du capteur (4), en projection selon une direction d'empilement (z) de la puce photonique (30) et du capteur (4).
- [Revendication 4] Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2 dans lequel la puce photonique (30) est superposée au capteur (4) et les émetteurs de lumière (31) entourent les pixels (41) du capteur (4), en projection selon une direction d'empilement (z) de la puce photonique (30) et du capteur

(4).

- [Revendication 5] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel la puce photonique (30) comprend des guides d'onde (312) configurés pour guider la lumière émise par la source primaire (3a) jusqu'aux structures d'extraction passives (311).
- [Revendication 6] Dispositif selon la revendication précédente dans lequel les structures d'extraction passives (311) présentent chacune au moins une facette (F_E) inclinée d'un angle compris entre 30° et 60° par rapport à la face d'émission (300), lesdites facettes étant en regard des guides d'onde (312) et configurées pour réfléchir la lumière sortant des guides d'onde (312), selon la pluralité de directions d'émission (E), de façon à former des miroirs d'extraction.
- [Revendication 7] Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel la puce photonique (30) présente une épaisseur inférieure ou égale à $300\ \mu\text{m}$, et de préférence inférieure ou égale à $200\ \mu\text{m}$.
- [Revendication 8] Procédé de fabrication d'un dispositif (1) d'imagerie infrarouge sans lentilles selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant les étapes suivantes :
- Fournir une source de lumière primaire (3a),
 - Former la puce photonique (30) destinée à réémettre, au niveau d'une face d'émission (300), la lumière émise par la source primaire (3a),
 - Fournir un capteur (4) comprenant une pluralité de pixels (41) aptes à détecter, sur une face de détection (400), une partie de la lumière émise par la source de lumière primaire (3a),
 - Assembler la puce photonique (30) au capteur (4) de manière à ce que les faces d'émission et de détection (300, 400) soient tournées d'un même côté du dispositif (1),
 - Coupler la source de lumière primaire (3a) aux structures d'extractions passives (311) de la puce photonique (30).
- [Revendication 9] Procédé de fabrication selon la revendication précédente dans lequel la formation de la puce photonique (30) comprend :
- Former les structures d'extraction passives (311) en saillie sur une première face (101) d'un premier substrat (10a) à base de silicium, par gravure dudit substrat (10a),
 - Former des guides d'onde (312) en regard des structures

d'extraction (311), lesdits guides d'onde (312) étant configurés pour guider la lumière émise par la source de lumière primaire (3a) jusqu'aux structures d'extraction (311).

- [Revendication 10] Procédé de fabrication selon la revendication précédente dans lequel les guides d'onde (312) sont formés directement sur la première face (101) du premier substrat (10a) à base de silicium, dans au moins une couche (11, 13) en un matériau différent du silicium, et dans lequel les structures d'extraction passives (311) sont formées dans ladite au moins une couche (11).
- [Revendication 11] Procédé de fabrication selon la revendication 9 dans lequel les guides d'onde (312) sont formés sur une deuxième face (102) d'un deuxième substrat (10b), et dans lequel le deuxième substrat (10b) est assemblé au premier substrat (10a) de manière à ce que les guides d'ondes (312) soient en regard des structures d'extraction (311) du premier substrat (10a), le procédé comprenant en outre un amincissement du deuxième substrat (10b) à partir d'une face (103) opposée à la deuxième face (102).
- [Revendication 12] Procédé de fabrication selon l'une quelconque des trois revendications précédentes dans lequel les structures d'extraction passives (311) sont gravées de manière à présenter chacune au moins une facette (F_E) inclinée d'un angle compris entre 30° et 60° par rapport à la première face (101), et dans lequel un dépôt métallique (12) est effectué sur chacune desdites au moins une facettes (F_E), de façon à former des miroirs d'extraction.
- [Revendication 13] Procédé d'utilisation d'un dispositif (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le dispositif (1) est au contact ou à proximité immédiate d'une zone à imager de l'échantillon (2), de façon à ce que la distance séparant ladite zone à imager et le capteur (4) soit inférieure à $200\ \mu\text{m}$.

[Fig. 1A]

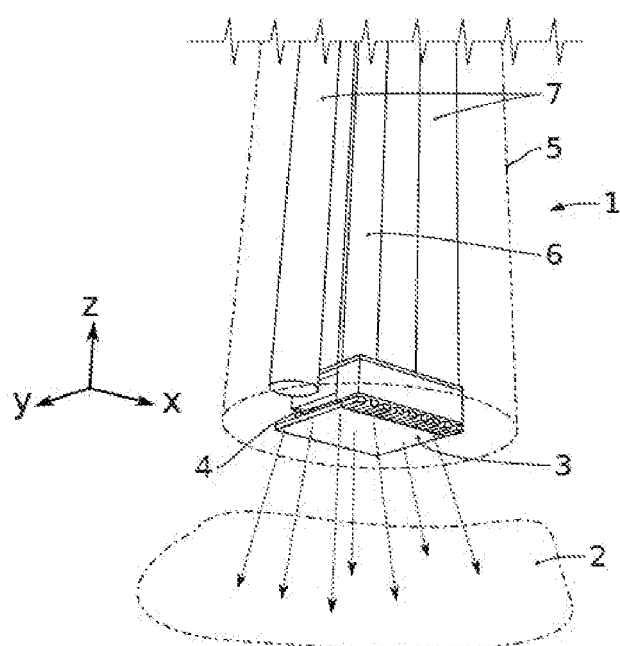


FIG. 1A

[Fig. 1B]

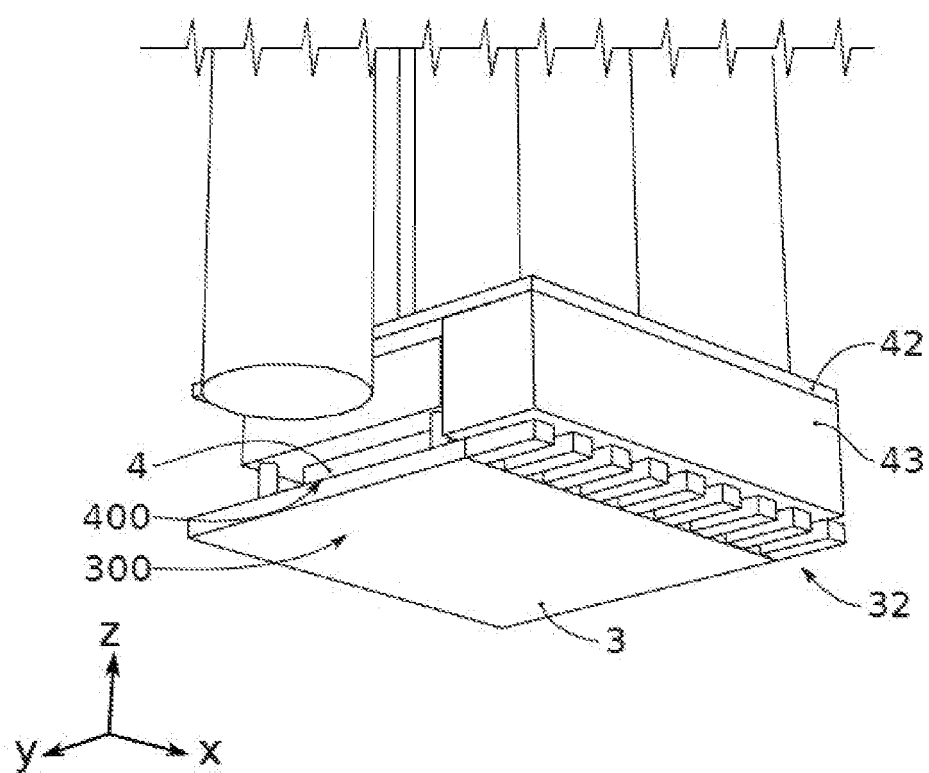


FIG. 1B

[Fig. 2]

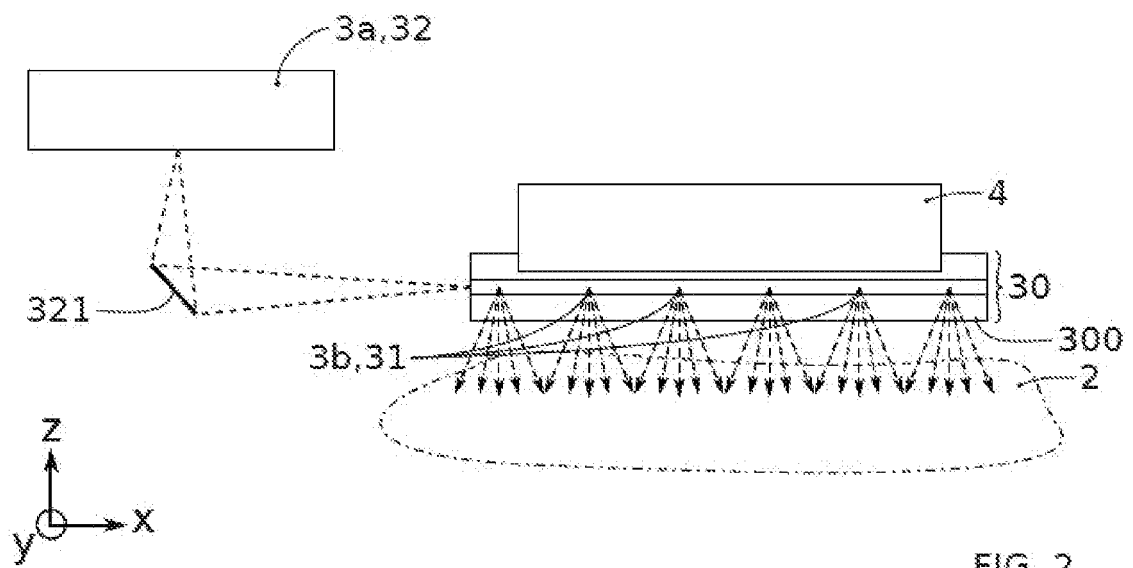
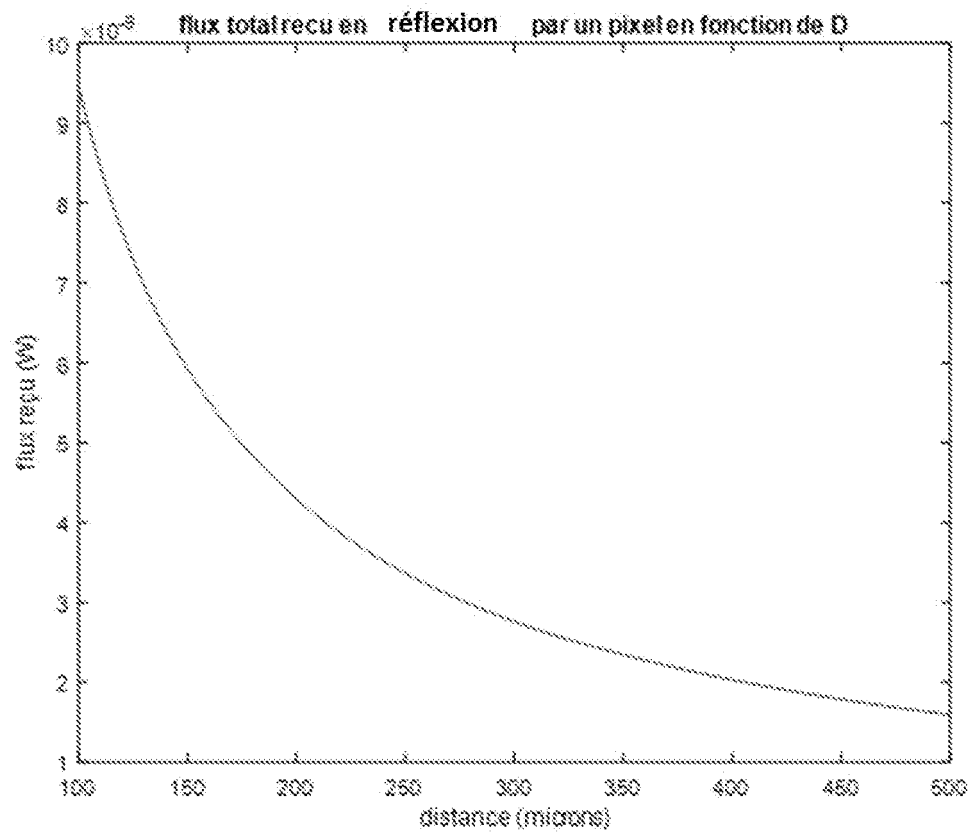


FIG. 2

[Fig. 3]



[Fig. 4]

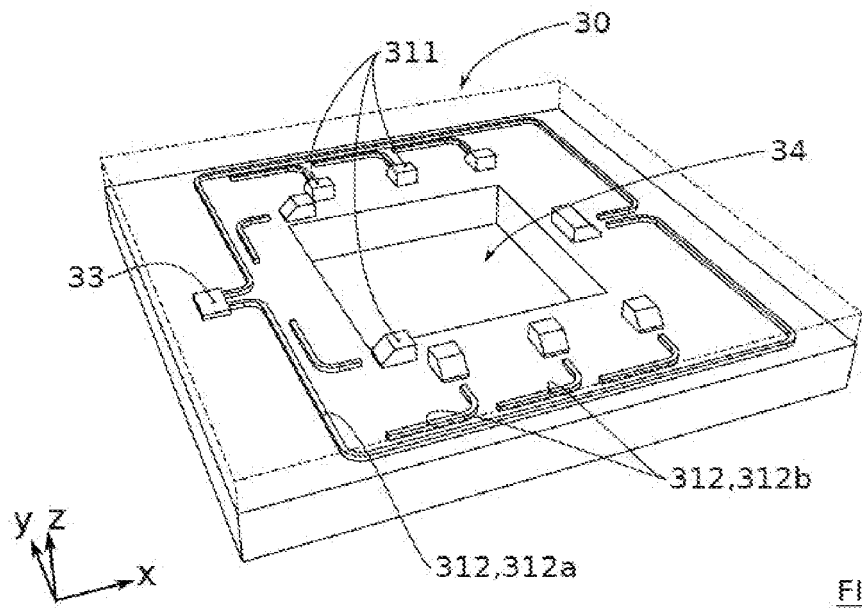


FIG. 4

[Fig. 5]

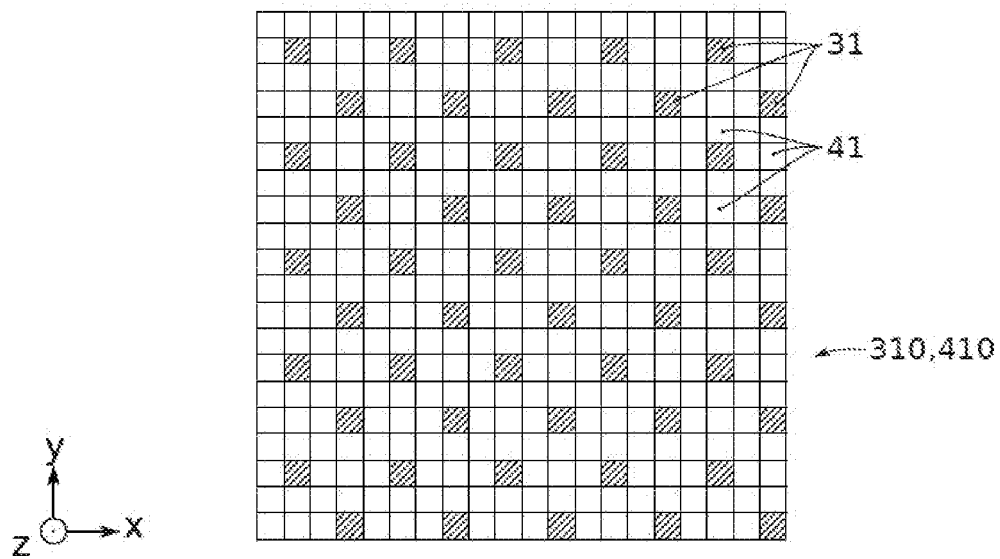
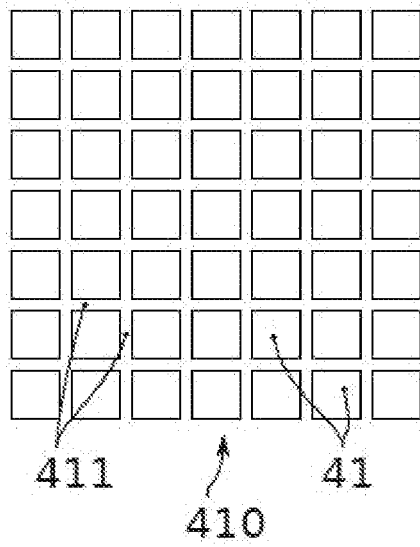
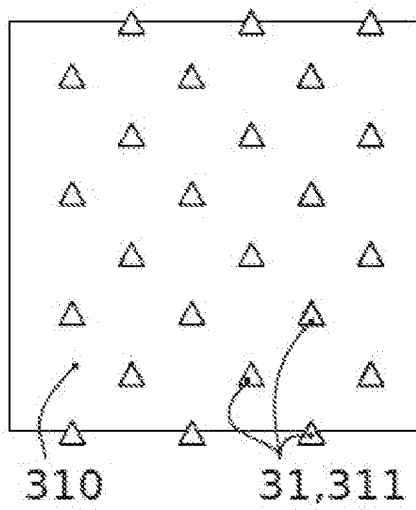


FIG. 5

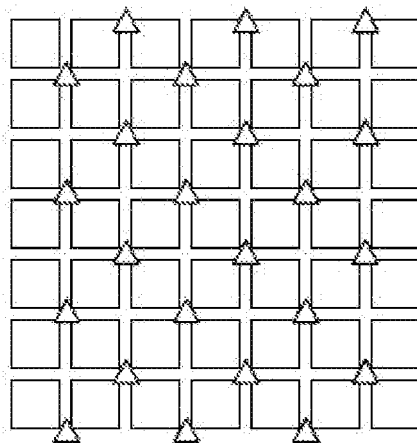
[Fig. 8A]

FIG. 8A

[Fig. 8B]

FIG. 8B

[Fig. 8C]



310,410
FIG. 8C

[Fig. 9A]

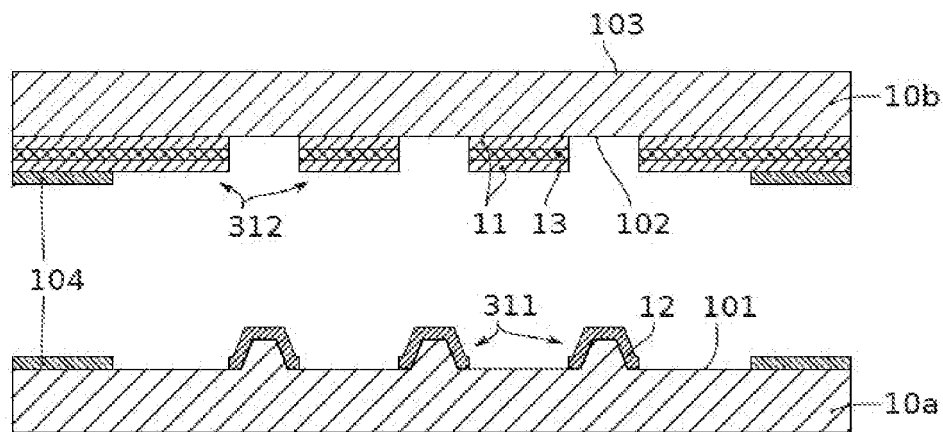


FIG. 9A

[Fig. 9B]

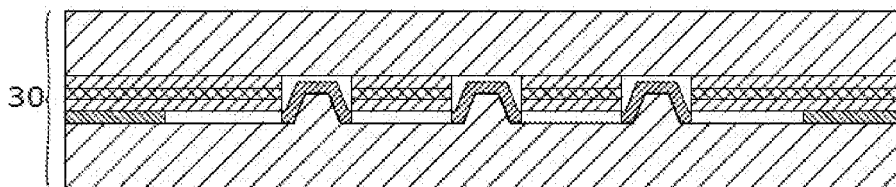


FIG. 9B

[Fig. 10A]

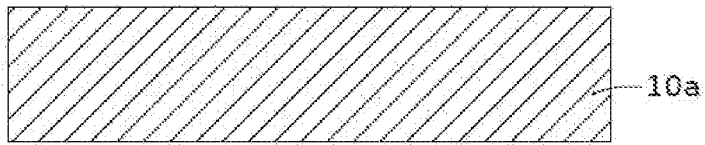


FIG. 10A

[Fig. 10B]

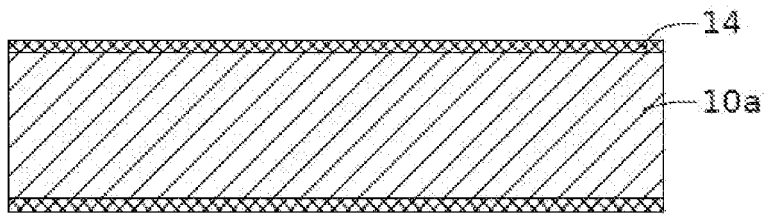


FIG. 10B

[Fig. 10C]

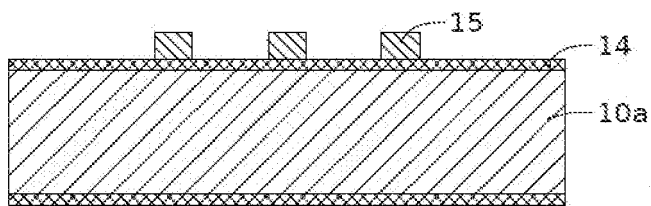


FIG. 10C

[Fig. 10D]

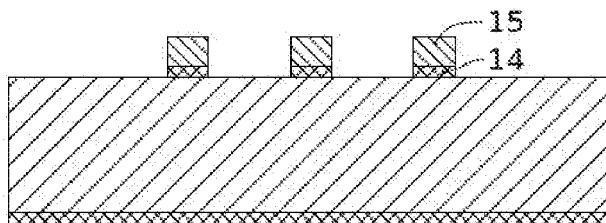


FIG. 10D

[Fig. 10E]

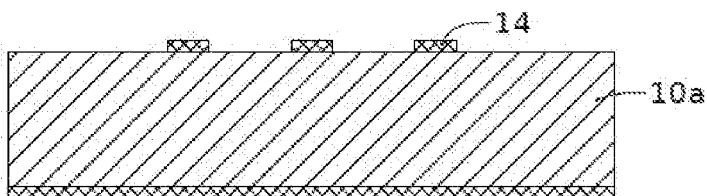


FIG. 10E

[Fig. 10F]

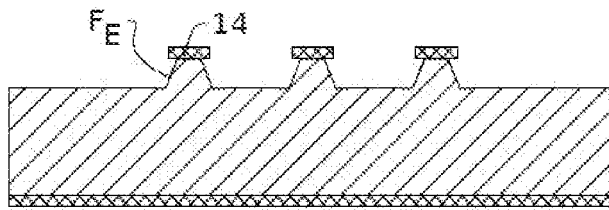


FIG. 10F

[Fig. 10G]

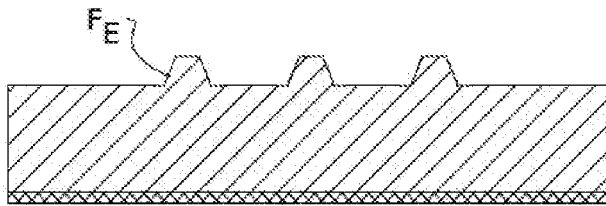


FIG. 10G

[Fig. 10H]

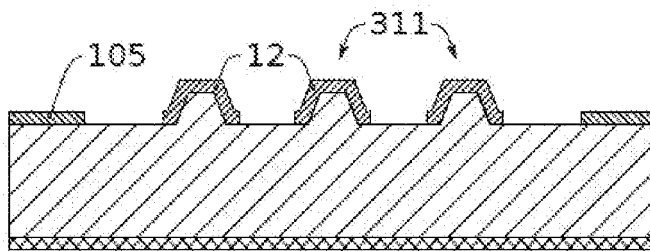


FIG. 10H

[Fig. 11A]

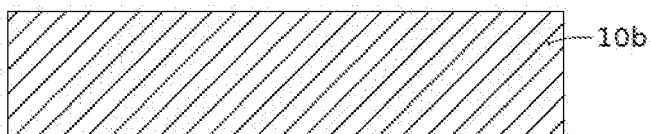


FIG. 11A

[Fig. 11B]

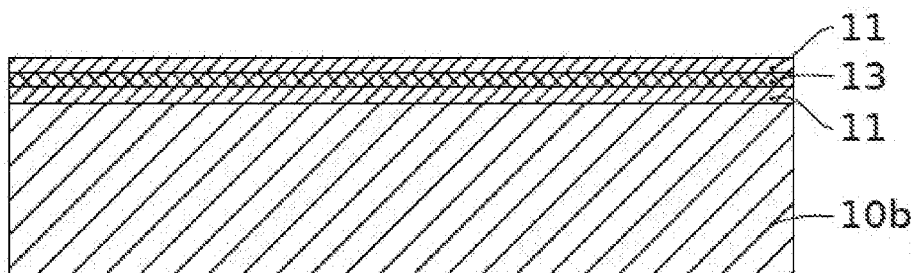
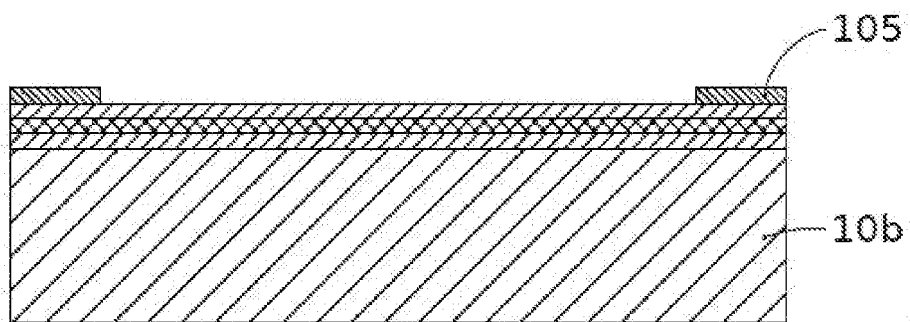
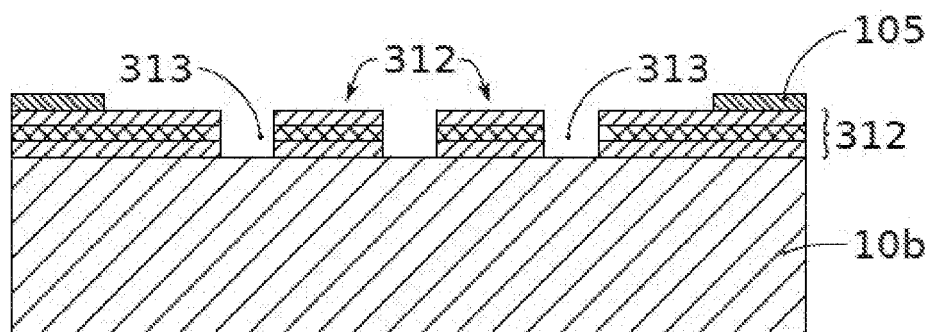


FIG. 11B

[Fig. 11C]

FIG. 11C

[Fig. 11D]

FIG. 11D

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

EP 2 657 793 A1 (IMEC [BE])
30 octobre 2013 (2013-10-30)

EP 3 502 666 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE
ATOMIQUE [FR]) 26 juin 2019 (2019-06-26)

US 2014/125642 A1 (PEARLSTEIN LARRY [US]
ET AL) 8 mai 2014 (2014-05-08)

WO 2018/015517 A1 (IMEC VZW [BE])
25 janvier 2018 (2018-01-25)

US 2007/296688 A1 (NAKAMURA HIROKI [JP] ET
AL) 27 décembre 2007 (2007-12-27)

WO 2015/167492 A1 (HEWLETT PACKARD
DEVELOPMENT CO [US])
5 novembre 2015 (2015-11-05)

LIU DEXING ET AL: "Lensless Infrared
Image Processing Method Based on Fresnel
Aperture",
2019 44TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON
INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES
(IRMMW-THZ), IEEE,
septembre 2019 (2019-09), pages 1-2,
XP033636783,
DOI: 10.1109/IRMMW-THZ.2019.8873965
[extrait le 2019-10-16]

EVAN L ERICKSON ET AL: "Miniature
lensless computational infrared imager",
ELECTRONIC IMAGING,
vol. 2016, no. 12,
14 février 2016 (2016-02-14), pages 1-4,
XP055710005,
ISSN: 2470-1173, DOI:
10.2352/ISSN.2470-1173.2016.12.IMSE-269

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

NEANT

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

NEANT