

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2019/042943 AI

(43) Date de la publication internationale
07 mars 2019 (07.03.2019)

(51) Classification internationale des brevets :
G01N 21/3581 (2014.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2018/073037

(22) Date de dépôt international :
27 août 2018 (27.08.2018)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1757901 28 août 2017 (28.08.2017) FR

(71) Déposant : TERAHERTZ WAVES TECHNOLOGIES
[FR/FR] ; CAP OMEGA, Rond Point Benjamin Franklin,
CS 39521, 34000 MONTPELLIER (FR).

(72) Inventeurs : ARCHIER, Christophe ; c/o TERAHERTZ
WAVES TECHNOLOGIES, CAP OMEGA, Rond Point
Benjamin Franklin, CS 39521, 34000 MONTPELLIER

(FR). MOULIN, Benoit ; c/o TERAHERTZ WAVES
TECHNOLOGIES, CAP OMEGA, Rond Point Benjamin
Franklin, CS 39521, 34000 MONTPELLIER (FR).

(74) Mandataire : CASSIOPI ; 230 Avenue de l'Aube Rouge,
34170 CASTELNAU LE LEZ (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,
KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM,

(54) Title: EVIAGING DEVICE WITH MULTIPIXEL SENSOR FOR CONSTITUTING AN IMAGE WITH TERAHERTZ RADIATION

(54) Titre : DISPOSITIF D'IMAGERIE À CAPTEUR MULTIPIXELS POUR CONSTITUER UNE IMAGE AVEC DES RAYONNEMENTS TERAHERTZ

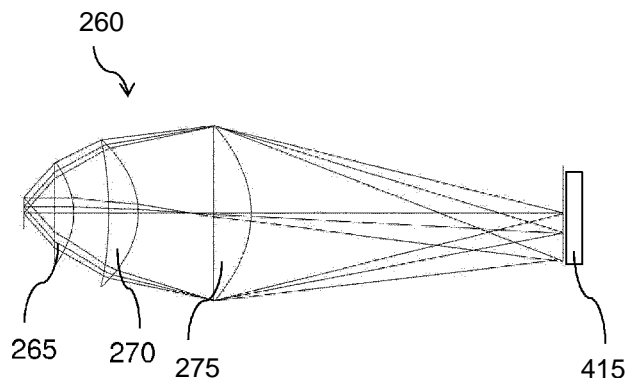


Figure 6

(57) Abstract: The invention relates to an imaging device which comprises: - an incoherent source of rays having a frequency of 0.075 THz to 10 THz for illuminating an object, - a sensor (415) of radiation coming from the object, which comprises a plurality of areas sensitive to the radiation coming from the source and which emits an electrical signal representative of the intensity of the rays coming from the source and reaching each sensitive area of the sensor, - at least one "microscope" optic (260) having a magnification factor higher than one and a resolution more than four times the interpixel divided by the magnification, situated on the optical path of the rays emitted by the source propagating from the source to the ray sensor, passing through the object.

(57) Abrégé : Le dispositif d'imagerie comporte: - une source incohérente de rayons dont la fréquence est comprise entre 0,075 THz et 10 THz pour éclairer un objet, - un capteur (415) de rayonnement provenant de l'objet, qui comporte une pluralité de zones sensibles aux rayonnements issus de la source et qui émet un signal électrique représentatif de l'intensité des rayons issus de la source atteignant chaque zone sensible du capteur, - au moins une optique (260) « de microscope » ayant un facteur de grandissement supérieur à un et une résolution meilleure que quatre fois l'interpixel divisé par le grandissement, située sur le chemin optique des rayons émis par la source allant de la source au capteur de rayons en passant par l'objet.



KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

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

DISPOSITIF D'IMAGERIE À CAPTEUR MULTIPIXELS POUR CONSTITUER UNE IMAGE AVEC DES RAYONNEMENTS TERAHERTZ

Domaine technique

La présente invention vise un dispositif d'imagerie à capteur multipixels pour constituer une image avec des rayonnements TéraHertz. Elle concerne, en particulier, le domaine de l'imagerie, par exemple pour le contrôle de qualités de pièces manufacturées.

5

Etat de la technique

Le domaine TéraHertz (THz) désigne les ondes électromagnétiques dont la fréquence est située entre 0,075 THz et 10 THz, soit en termes de longueur d'onde de 4 mm à $30 \mu\text{m}$. Ces ondes sont dites millimétriques, elles sont situées entre l'infrarouge lointain (ou FIR pour Far InfraRed), et les ondes radar (hyperfréquences). L'invention concerne plus particulièrement la gamme 75-700 GHz. En effet dans cette

10 (hyperfréquences). L'invention concerne plus particulièrement la gamme 75-700 GHz. En effet dans cette gamme de fréquence, une grande partie des matériaux plastiques et composites non-conducteurs sont transparents au rayonnement. Et les sources de rayonnement sont relativement accessibles en termes de ratio entre le prix de la source et la puissance optique disponible.

Tous les principes optiques utilisés en conception de système visible ou infrarouge s'appliquent au rayonnement THz avec le même rapport de proportion des phénomènes vis-à-vis de la longueur d'onde. Par exemple la limite de diffraction suit la loi d'Airy : $R_{\text{diff}} = 1,22 \lambda \text{ON}$, dans laquelle λ est la longueur d'onde et ON l'ouverture numérique. Soit pour une ouverture numérique ON de 2, et une longueur d'onde de 1 mm, une limite de diffraction de 2,44 mm. Cette limite de diffraction de l'ordre du millimètre correspond à la résolution spatiale moyenne d'un système d'imagerie THz.

15

Cependant, les systèmes connus n'atteignent pas cette résolution, qui permettrait d'atteindre les performances optimales.

20

Les systèmes THz existant utilisent des miroirs paraboliques hors axe comme moyen de propagation du faisceau. Ce choix s'explique car, dans beaucoup d'applications, le niveau de puissance de la source est si faible que les pertes introduites par chaque lentille ne sont pas acceptables (pertes par absorption, et surtout pertes par réflexions sur les interfaces).

25

Cependant l'utilisation de ces miroirs pose de nombreux problèmes :

- difficulté d'alignement avec beaucoup de renvois d'angle,
 - prix très élevé des optiques,
 - gamme de focale restreinte en particulier sur les fortes ouvertures et
 - obligation de travailler en conjugaison infini-foyer et sur l'axe optique.
- 30

Par ailleurs, un faisceau THz est invisible à l'œil, et, contrairement à l'infrarouge proche, il n'existe pas de carte photosensible permettant la conversion du rayonnement vers des longueurs d'onde visibles à l'œil. Cet aspect a un impact sur le réglage et l'alignement des systèmes.

On décrit, ci-dessous, des types de sources disponibles dans le domaine THz. Plusieurs méthodes de génération de rayonnement THz de rayonnement THz continu existent et sont utilisables dans un dispositif objet de l'invention, par exemple :

35

- Diode Impatt associée à un multiplicateur de fréquence pour aller au-delà de 0,2 THz, et
- Oscillateur fixe ou variable entre 0 et 0,02 THz associé à un multiplicateur de fréquence.

Le signal généré par les sources habituellement utilisées dans le domaine THz présente une cohérence très pure, la largeur de la raie d'émission est très fine. Un rayonnement cohérent n'est pas propice à la formation d'image car des franges d'interférences sont générées avec une amplitude très grande sur chaque système le permettant.

5 Utiliser une source cohérente dans un système d'imagerie alors que la scène à observer n'est pas perpendiculaire en tout point du champ génère une modulation d'amplitude proportionnelle aux variations d'altitudes modulo $\lambda/4$. Ce qui est préjudiciable à la qualité de l'image formée.

Exposé de l'invention

10 La présente invention vise à remédier à tout ou partie de ces inconvénients.

A cet effet, la présente invention vise un dispositif d'imagerie, selon la revendication 1.

Grâce à ces dispositions, le dispositif d'imagerie n'est pas sujet à la présence d'ondes stationnaires du fait de l'incohérence de la source. L'inventeur a déterminé que cette combinaison de moyens optiques et électroniques permet de réaliser des captures d'images avec une résolution maximisée et un niveau de
15 bruit faible, le déplacement relatif de ces moyens et de l'objet permettant de réaliser des images matricielles.

Dans des modes de réalisation, le rapport de la largeur spectrale sur la longueur d'onde médiane est supérieur à 1 % et, préférentiellement supérieur à 2,5 %. Ce rapport permet d'éliminer l'effet des ondes stationnaires pour les géométries de dispositif et d'optique les plus intéressantes.

20 Dans des modes de réalisation, la source incohérente est une source de bruit blanc suivie d'un multiplicateur de fréquences. Cette combinaison permet de générer les rapports de largeur spectrale sur longueur d'onde médiane permettant d'éliminer les effets des ondes stationnaires.

Dans des modes de réalisation, la source de bruit blanc émet sur une largeur de bande entre 200 MHz et 500 MHz pour une longueur d'onde médiane inférieure à 20 GHz.

25 Dans des modes de réalisation, la source de bruit blanc est un synthétiseur de fréquences filtré.

Dans des modes de réalisation, l'optique est constituée de deux groupes de lentilles, le premier groupe assurant la collecte de la lumière de la scène avec une pupille d'entrée à l'infini, et projette cette lumière à travers l'ouverture de l'objectif située en amont du deuxième groupe, de telle sorte que les rayons lumineux provenant de tous les points du champ optique remplissent entièrement l'ouverture, le deuxième
30 groupe focalisant sur la surface du capteur la lumière issue de l'ouverture en assurant le grandissement et l'ouverture côté image, le deuxième groupe assurant, de plus, la compensation des aberrations sphériques générées par le premier groupe.

Dans des modes de réalisation, le premier groupe comporte un ménisque configuré pour former un compensateur de champ optique.

35 Dans des modes de réalisation, la pupille de sortie est à l'infini.

Dans des modes de réalisation, le champ optique est de 40 mm pour un diamètre maximal de lentille de 100 mm.

Dans des modes de réalisation, le capteur comporte un circuit imprimé multicouche avec des vias, sur lequel sont soudés des capteurs ponctuels d'une seule zone sensible, n'ayant pas de connexion
40 latérale, en face arrière.

Dans des modes de réalisation, les vias du circuit imprimé sont réalisés par laser.

Dans des modes de réalisation, au moins un capteur ponctuel est dans un boîtier qui comporte une matrice de billes.

Dans des modes de réalisation, au moins un capteur ponctuel est de type assemblage au niveau du substrat ou au niveau du circuit.

5 Dans des modes de réalisation, au moins un capteur ponctuel d'une seule zone photosensible comporte un transistor câblé avec des hot vias.

Dans des modes de réalisation, au moins un capteur ponctuel d'une seule zone photosensible est polarisé par un circuit générant une tension de grille et un micro-courant dans la canal du transistor pour obtenir un gain d'au moins 3dB du rapport signal/bruit.

10 Grâce à cet ensemble de caractéristiques, la dispersion de fabrication du capteur est limitée et les réponses des différents capteurs ponctuels est mieux normalisée.

Dans des modes de réalisation, chaque zone sensible du capteur de rayonnement est réalisé selon la technique du « Wafer-level packaging », ou WLP, en français assemblage au niveau du substrat.

15 On rappelle qu'il s'agit d'une technologie d'assemblage d'un circuit intégré alors qu'il fait partie d'un substrat, par opposition avec la méthode traditionnelle dans laquelle on découpe le substrat en circuits individuels avant de les assembler. Cette technologie permet d'atteindre des dimensions de composants bien inférieures à ce qui était obtenu de manière traditionnelle, et d'obtenir une plus grande densité de zones sensibles.

20 Dans des modes de réalisation, l'interpixel (distance de centre à centre) entre les zones sensibles du capteur de rayonnement est inférieure à 1 mm.

Dans des modes de réalisation, le dispositif objet de l'invention comporte au moins une lentille de forme non symétrique de révolution, par exemple une lentille cylindrique ou une lentille avec des surfaces polynomiales sur X et Y.

25 Grâce à ces dispositions, l'éclairage de l'objet est concentré sur la zone de la scène qui est imagée par le capteur linéaire.

Dans des modes de réalisation, au moins un système optique comporte une lentille optique asphérique.

L'utilisation d'une ou plusieurs lentilles asphériques simplifie le dessin optique, par rapport à l'utilisation de miroirs paraboliques, ou de lentilles sphériques.

30 Dans des modes de réalisation, au moins un composant optique d'un système optique présente un traitement anti-reflet comportant des microstructures en forme de cônes ou de cratères.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de réaliser des traitements anti-reflets large bande et peu sensibles à l'orientation de la surface.

Dans des modes de réalisation, la fréquence d'émission de la source incohérente est modulée.

35 Dans des modes de réalisation, la source incohérente comporte une source de bruit de type bruit thermique dans une résistance ou diode impatt.

Dans des modes de réalisation, chaque zone photosensible est un nano-transistor, le signal généré par la radiation THz est une différence de potentiel continue entre le Drain et la Source du nano-transistor mesuré en mode commun ou différentiel.

40 Dans des modes de réalisation, le dispositif comporte une électronique de proximité pour polariser chaque nano-transistor par une tension de grille proche de sa tension de swing où le fonctionnement classique du transistor est le plus non linéaire.

Dans des modes de réalisation, le signal redressé issu de chaque nano-transistor est amplifié en forçant une asymétrie des charges dans le canal du nano-transistor en injectant un courant dans le canal du transistor, entre le drain et la source et /ou en utilisant des motifs métallisés jouant le rôle d'antennes.

5 Dans des modes de réalisation, l'électronique de proximité comporte un circuit de compensation de l'offset généré par l'injection du courant entre le drain et la source de chaque nano-transistor, par exemple en utilisant un montage soustracteur.

On augmente ainsi la sensibilité du dispositif.

Dans des modes de réalisation, le dispositif comporte au moins un amplificateur faible bruit et faible drift qui amplifie le signal sur la dynamique d'un convertisseur analogique numérique.

10 Dans des modes de réalisation, le dispositif comporte un moyen de synchronisation de la démodulation du signal avec le signal de modulation d'amplitude de la source.

Ceci assure un rapport signal à bruit maximisé en éliminant tous les bruits additifs à une fréquence autre que la fréquence de modulation de la source.

15 Le capteur et la source sont synchronisés par un signal d'horloge numérique. La source est modulée en amplitude par ce signal d'horloge ce qui permet de mesurer et de compenser le résidu de signal (offset) présent aux bornes du capteur en l'absence de THz. La compensation est à la fois numérique par une soustraction à haute fréquence du signal mesuré avec THz et sans THz, mais aussi analogique en ajustant la tension à soustraire au signal du capteur pour maintenir le niveau global dans une certaine gamme de tension.

20 Cette architecture garantit une plus grande sensibilité, un rapport signal/bruit signal amélioré.

Dans des modes de réalisation, le dispositif comporte un capteur des positions de l'objet à imager, par exemple en utilisant des encodeurs. Ces données de position mesurées sont synchronisées avec les données issues du capteur pour une utilisation sur l'ensemble de la course du déplacement de l'objet, y compris dans les zones d'accélération et dans les zones où le déplacement ne suit pas une ligne, ou n'est pas le long des axes naturels du système.

25 Un moyennage des données calé sur les positions absolues et non sur le temps permet une adaptation à toute vitesse de déplacement

Dans des modes de réalisation, le dispositif objet de l'invention comporte une lame séparatrice, la polarisation incidente sur la lame séparatrice étant la polarisation en mode TM (acronyme de transverse mode pour mode transversal) dans lequel le champ est parallèle au plan d'incidence.

30 La lame séparatrice est, par exemple, une lame constituée de Si-HRFZ dont l'épaisseur est calculée pour assurer la séparation optimale. Grâce à ces dispositions, il est possible d'effectuer des mesures en réflectométrie. La polarisation en mode TM assure une meilleure stabilité de l'efficacité de séparation lorsque l'épaisseur de la lame séparatrice varie dans sa tolérance de fabrication.

35 Dans des modes de réalisation, le dispositif comporte un moyen de mesure de l'intensité des rayonnements provenant de l'objet, et/ou de polarisation des rayons provenant de l'objet.

Le dispositif objet de l'invention permet ainsi plusieurs types de mesures.

Brève description des figures

40 D'autres avantages, buts et caractéristiques de la présente invention ressortiront de la description qui va suivre faite, dans un but explicatif et nullement limitatif, en regard des dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 représente, schématiquement et en coupe, un premier exemple de réalisation d'une source TéraHertz incohérente,
- la figure 2 représente, schématiquement et en coupe, un deuxième exemple de réalisation d'une source TéraHertz incohérente,
- 5 - la figure 3 représente, schématiquement et en coupe, un premier mode de réalisation d'un objectif d'imagerie mis en œuvre dans des dispositifs objets de l'invention,
 - la figure 4 représente, schématiquement et en coupe, un deuxième mode de réalisation d'un objectif d'imagerie mis en œuvre dans des dispositifs objets de l'invention,
 - la figure 5 représente, schématiquement et en coupe, un troisième mode de réalisation d'un
 - 10 objectif d'imagerie mis en œuvre dans des dispositifs objets de l'invention,
 - la figure 6 représente, schématiquement et en coupe, un quatrième mode de réalisation d'un objectif d'imagerie mis en œuvre dans des dispositifs objets de l'invention,
 - la figure 7 représente, schématiquement et en perspective, un premier moyen d'éclairage linéaire d'un objet, mis en œuvre dans des dispositifs objets de l'invention,
 - 15 - la figure 8 représente une courbe d'éclairage non uniforme,
 - la figure 9 représente une courbe d'émission d'une source de lumière pour compenser rééclairage non uniforme représenté en figure 8,
 - la figure 10 représente un système optique fournissant sensiblement la courbe d'émission illustrée en figure 9,
 - 20 - la figure 11 représente une courbe d'éclairage sensiblement uniforme fournie par le système optique illustré en figure 10, avec le moyen d'éclairage linéaire illustré en figure 7,
 - la figure 12 représente, schématiquement et en perspective, un deuxième moyen d'éclairage linéaire présentant des surfaces n'étant pas à symétrie de révolution,
 - la figure 13 représente, schématiquement et en coupe, un premier mode de réalisation particulier
 - 25 du dispositif objet de l'invention ,
 - la figure 14 représente, schématiquement et en coupe, un deuxième mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention,
 - la figure 15 représente, schématiquement et en coupe, un troisième mode de réalisation particulier du dispositif objet de l'invention ,
 - 30 - la figure 16 représente, schématiquement, un capteur multipixels et
 - la figure 17 représente un schéma électronique pour un microscope THz.

Description de modes de réalisation de l'invention

On note, dès à présent, que les figures ne sont pas à l'échelle.

35 Dans les systèmes de capture d'images objets de l'invention, on met en œuvre des optiques réfractives (lentilles), qui présentent une modularité plus importante que les miroirs, et donnent l'accès à l'utilisation des puissants outils de conception optique assistée par ordinateur.

40 Dans le domaine de fréquences 100-700 GHz, domaine préférentiel d'utilisation de la présente invention, les indices des matériaux (Polyéthylène haute densité (HDPE), Polyméthylpentène (PMP), Polycarbonate (PC), Silicium HRFZ (Si)) sont constants à quelques pourcents près. Les systèmes objets de l'invention ne présentent donc pas de problème de chromaticité, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de modification du comportement optique des dioptries lorsque la longueur d'onde change.

Préférentiellement, le dispositif d'imagerie objet de l'invention met en œuvre une source TéraHertz (THz) incohérente 100.

Une source THz incohérente 100 est, selon un premier exemple, constituée, comme illustré en figure 1 :

- 5 - d'un émetteur TéraHertz 105 ($f < 200$ GHz) de largeur de bande Δf telle que le rapport $\Delta f/f$ est supérieur à 1 % et, préférentiellement, supérieur à 2,5 %,
- d'un filtre 110 pour limiter la bande d'émission en conservant un rapport $\Delta f/f$ supérieur à 1% et, préférentiellement, à 2,5 %,
- d'amplificateurs ou atténuateurs 115,
- 10 - de multiplieurs 120 de fréquence et
- d'une antenne émettrice 125.

Une source THz incohérente 100 est, selon un second exemple, constituée, comme illustré en figure 2 :

- 15 - d'un émetteur 130 en bande basse, c'est-à-dire dans l'intervalle de fréquence allant de 0,1 GHz à 40 GHz, émettant sur une bande étroite ($f < 1$ GHz),
- d'un modulateur 135 sur une bande $0,1 \text{ GHz} < \Delta f < 40 \text{ GHz}$,
- d'amplificateurs ou atténuateur 140,
- de multiplieurs 145 de fréquence et
- d'une antenne émettrice 150.

20 L'émetteur 110 ou 130 génère un signal incohérent tel que, dans une durée plus courte que le temps d'acquisition du capteur, l'émetteur émet un spectre d'émission suffisamment étendu pour balayer l'onde stationnaire.

Dans des modes de réalisation, l'émetteur 110 ou 130 est une source de bruit de type bruit thermique dans une résistance ou diode impatt.

25 Dans des modes de réalisation, l'émetteur 110 ou 130 est une source accordable telle qu'un oscillateur à fréquence variable ou JIG.

Le modulateur 135 est accordé pour que, une fois multiplié par chaque multiplieur de fréquences 145, le signal généré ait une largeur de bande d'émission préférentiellement dans l'intervalle $0,1 \text{ GHz} < \Delta f < 10 \text{ GHz}$. On note que le modulateur 135 est modulable sur une bande très étroite (par exemple de 200 30 MHz).

Les amplificateurs 115, 140 ou atténuateurs servent à ajuster la puissance d'entrée du signal avant chaque multiplieur de fréquences 120 ou 145. Les multiplieurs, amplificateurs et atténuateurs peuvent utiliser des structures sur PCB (acronyme de « printed circuit board » pour circuit imprimé) ou bien guidées (aux fréquences considérées, on peut manipuler ces ondes électromagnétiques confinées dans des guides 35 d'onde métallique).

Le choix de l'antenne 125 ou 150 permet de paramétrer les propriétés optiques du faisceau qui sort du dernier multiplieur 120 ou 145 : polarisation, mode TEM (transverse electromagnetic mode pour mode électromagnétique transverse), divergence et taille du point d'émission.

40 La source présentée en figures 1 et 2 utilise un spectre d'émission qui assure un balayage au moins égal à $\lambda/4$ ce qui permet de réduire la sensibilité aux ondes stationnaires dans l'image tout en permettant de choisir la fréquence de travail et la polarisation.

Concernant les optiques d'imagerie la résolution spatiale est liée à la dimension du plus petit spot que l'on peut focaliser à travers le système. Le rayon du spot est donné par la loi d'Airy $R_{diff} = 1,22 \lambda ON$, dans laquelle λ est la longueur d'onde et ON l'ouverture numérique.

La résolution spatiale est donc proportionnelle à la longueur d'onde λ , et à l'ouverture numérique ON utilisée dans le système de focalisation. Cette ouverture ON se calcule grâce au diamètre D de l'optique de focalisation et à la focale f de cette optique $ON = f / D$.

Pour une longueur d'onde λ fixe, on peut donc optimiser la résolution du système en choisissant un diamètre D d'optique plus grand, ou une focale d'optique f plus courte.

L'ouverture numérique ON est physiquement limitée à une valeur de 0,5. Mais dans l'air avec des indices optiques réalistes (d'une valeur de 1,5 par exemple), il est très difficile d'atteindre des ouvertures inférieures à 0,7.

Pour maximiser le diamètre D du faisceau, on prend en compte la divergence de la source afin de choisir la focale f de la première lentille de façon que le faisceau emplisse entièrement cette première lentille. Ainsi le diamètre D du faisceau est égal au diamètre de la première lentille, et le paramètre ouverture numérique ON est donc optimisé.

Préférentiellement, le dispositif d'imagerie objet de l'invention utilise des lentilles asphériques (figures 3 à 6 et 13 à 15).

On rappelle ici qu'une lentille sphérique est une lentille dont la forme de chaque surface suit une sphère. Lorsqu'on utilise des lentilles sphériques sur des grands diamètres, il apparaît une aberration liée à la courbure de la lentille, appelée « aberration sphérique ». Les rayons marginaux (passant à proximité du bord de la lentille) ne se focalisent pas au même endroit que les rayons paraxiaux (passant au centre de la lentille). Cet effet vient contrebalancer le gain en résolution avec l'augmentation du diamètre du faisceau, car le faisceau focalisé avec aberration sphérique ne suit plus la loi d'Airy citée plus haut. De plus, l'introduction de cette aberration sphérique perturbe toute la propagation du faisceau THz en créant des anneaux de lumière au lieu d'un point de focalisation (« spot ») bien circulaires : il y a une perte d'énergie en plus d'une perte d'information.

Il existe plusieurs solutions pour résoudre ce phénomène, la plus simple est d'utiliser des lentilles dites asphériques. Pour une lentille asphérique la forme de la courbure suit une sphère au niveau du centre, mais en dehors du centre, la courbure est corrigée afin d'annuler l'aberration sphérique. En optique visible et infrarouge, ces lentilles sont très coûteuses à fabriquer du fait de leur forme complexe.

En THz, étant donné les méthodes de fabrication utilisées, il est aussi simple de fabriquer une lentille sphérique qu'une lentille asphérique.

On réalise une impression 3D et/ou du micro-usinage avec une rugosité résiduelle entre 0,02 et 0,1 mm. La mesure des paramètres de propagation de la source permet de définir l'éclairement en entrée du système : divergence, répartition de l'énergie

On optimise le système en faisant varier les distances entre les optiques, les rayons de courbures des surfaces ainsi que les coefficients de conicité (d'où l'asphéricité)

Le critère d'optimisation du système peut être défini par exemple sur la minimalisation de la taille du spot en plusieurs points du champ, ou bien la minimisation de la différence de front d'onde en plusieurs points du champ.

La longueur d'onde du faisceau étant millimétrique une rugosité de 1/100 est suffisante pour assurer une bonne efficacité de transmission. Ces rugosités sont compatibles des microfraises utilisés sur les tours et fraiseuses modernes et de l'impression 3D par dépôt de fil.

5 Dans la conception de l'imageur toutes les lentilles sont donc conçues asphériques afin d'atteindre les performances optiques maximum en termes d'aberration sphérique et de limiter le nombre de lentilles utilisées.

Concernant les traitements antireflets des lentilles et, le cas échéant, de la lame séparatrice, leur structure consiste en une structure de surface sur les optiques réfractives qui a pour effet de diminuer la réflexion de chaque dioptré en agissant sur l'indice optique à la surface de la lentille.

10 Une première méthode consiste à déposer une ou plusieurs couches de matériau diélectrique dont l'indice optique est plus faible que l'indice optique de la lentille traitée, par exemple l'indice optique du matériau de traitement est proche de la racine carrée de l'indice optique de la lentille. L'épaisseur de la couche à déposer est de l'ordre du quart de la longueur d'onde moyenne utilisée. Cette épaisseur du matériau de traitement est relativement grande en THz, comparé à l'infra-rouge, ce qui pose des problèmes
15 sur la technique de dépôt.

Une deuxième méthode, utilisée préférentiellement dans le dispositif d'imagerie objet de l'invention consiste à former des microstructures en forme de cônes ou de cratères à l'aide d'une méthode de micro-usinage, par exemple le « laser drilling » (fraisage laser) à l'aide d'un laser femto seconde. Ces microstructures de dimensions inférieures à la longueur d'onde, créent un gradient d'indice apparent à la
20 surface des dioptrés qui annule la réflexion sur la face car il n'y a plus la discontinuité d'indice qui cause la réflexion. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de réaliser des traitements anti-reflets très large bande et moins sensibles à l'orientation de la surface, contrairement au cas du dépôt de couche.

L'utilisation de ce type de traitement augmente le rendement énergétique des systèmes optiques à plusieurs lentilles en augmentant la transmission de chaque dioptré optique. Grâce aux traitements
25 antireflets, on augmente l'énergie projetée sur le capteur de plusieurs dizaines de pourcents. Les traitements anti-reflets participent également à l'élimination des images parasites et des ondes stationnaires.

En ce qui concerne l'électronique du capteur multi-pixel, pour le circuit analogique, on réalise une injection d'un courant dans le canal du transistor.

30 Pour augmenter la sensibilité du capteur THz à base de HEMT on injecte un courant de l'ordre de quelques dizaines de μA dans le canal du transistor. Cela a pour conséquence d'augmenter de plusieurs ordres de grandeur la réponse électrique en présence de rayonnement THz. L'injection se fait par un composant générateur de courant directement relié au transistor par son drain, le composant peut être par exemple un LM334 associé à une résistance, le choix de la valeur de la résistance permet de paramétrer
35 la quantité de courant injecté.

Le signal utile aux bornes du transistor en présence de rayonnement THz étant la tension entre son drain et sa source, il est nécessaire d'isoler le transistor et le composant injectant le courant du reste de la chaîne d'amplification par un montage suiveur ayant une impédance très forte. Ainsi le courant injecté ne peut se propager que dans le transistor et non dans la chaîne d'amplification.

40 Correction analogique de l'offset généré par le courant

La résistance du canal du transistor étant de l'ordre du kOhm, l'injection du courant dans le canal génère un offset continu aux bornes de celui-ci. Cet offset est présent qu'il y ait du THz ou non. Cet offset

peut être de l'ordre de plusieurs centaines de mV ce qui est problématique pour la chaîne d'amplification. En effet les amplificateurs amplifient autant le signal utile généré par le THz que l'offset continu : au-delà d'un certain niveau l'offset provoque une saturation des entrées des différents amplificateurs. Il est donc nécessaire de soustraire une tension continue du même ordre de grandeur que la tension d'offset au signal
5 généré par le transistor afin de permettre à la chaîne d'amplification de rester dans sa gamme de fonctionnement en entrée.

Amplification

L'amplification est choisie telle que le bruit généré par celle-ci est faible, qu'il ait une dérive la plus faible possible, et une bande passante suffisante pour les fréquences de travail. Par exemple un
10 amplificateur OPA735 de Texas Instruments présente les performances requises. On choisit classiquement deux étages d'amplification : le premier de gain fixe de 10 ou 100 à proximité de la surface sensible, qui assure le transport d'un signal plusieurs ordre de grandeur plus fort que le niveau de bruit induit par le circuit. Puis le deuxième amplificateur de gain variable (par exemple entre 1 et 10) à proximité du convertisseur analogique numérique (ADC). Ce qui permet au total d'atteindre un facteur maximal
15 d'amplification de 1000 tout en étant capable d'adapter l'amplification pour remplir la plage de conversion de l'ADC.

On observe, en figure 17, un transistor 815 recevant une tension de grille 805 et une injection de courant 810 sur son drain, la tension sur le drain étant fournie à un suiveur 820. En sortie du suiveur 820, un soustracteur 830 soustrait une tension 825, puis deux amplificateurs 835 et 840 amplifient le signal.

20 Modulation/Démodulation du signal

Le bruit généré par le transistor augmente fortement lorsqu'on injecte du courant. Il n'est plus intéressant de le faire fonctionner en mode continu (DC) car le niveau de bruit est trop important, en particulier le bruit basse fréquence lié à la tension d'offset. Cependant en plaçant le signal utile à une fréquence de l'ordre du kHz on obtient un rapport signal à bruit supérieur à 60dB, contre environ 45dB en
25 mode continu sans courant injecté. L'intérêt de l'injection du courant se trouve dans ce rapport signal à bruit qui est meilleur avec le courant pour une fréquence de travail située entre 100Hz et 100kHz.

Il existe plusieurs méthodes pour moduler et démoduler un signal, en particulier celle de la détection synchrone qui est largement utilisée dans les systèmes THz. Cette méthode présente un inconvénient : elle nécessite des temps d'intégration long qui diminuent fortement la vitesse d'acquisition.

Dans le cas présent, on procède de la façon suivante : la source est modulée de manière externe
30 par un composant électronique programmable (par exemple un FPGA) qui commande un modulateur d'amplitude radiofréquence. Le composant programmable maîtrise les états haut et bas de la modulation : sur l'un, le THz est émis par la source ; sur l'autre, aucun signal n'est émis. Alternativement, le signal reçu par le capteur est soit le signal utile lié à la présence de rayonnement THz, soit le bruit de fond en l'absence
35 de THz. Le composant programmable échantillonne le signal provenant du capteur durant les états haut et les états bas, il produit deux moyennes : l'une correspondant au niveau de signal moyen sur l'état haut, l'autre au niveau de signal moyen sur l'état bas. Par soustraction de ces deux moyennes on obtient le signal correspondant au THz seul filtré de ses composantes basses fréquences grâce à la différence haut - bas, et filtré de ses composantes hautes fréquences grâce à la moyenne sur chaque état haut et bas.
40 C'est ce signal différentiel moyenné qui est produit en sortie du capteur.

L'avantage de cette méthode est qu'on peut conserver des vitesses d'acquisition élevées à condition d'avoir des ADC rapides (200.000 échantillons par seconde, par exemple), des bandes passantes

d'amplification adaptées. De plus cette méthode est peu coûteuse en calculs, ce qui permet de l'implémenter pour toute une matrice de détecteur, le calcul étant fait indépendamment sur chaque capteur.

Cette architecture garantit une plus grande sensibilité, un bruit signal réduit et une synchronisation du signal avec la position de l'objet optimale.

5 Dans le cas de l'utilisation d'un capteur linéaire possédant une ou plusieurs lignes de photosites (ou pixels), ce capteur multipixels 700 est constitué, comme illustré en figure 16 :

- d'une ou plusieurs rangées 705 de détecteurs THz 710. Chaque détecteur THz est un nano-transistor RF en GAAS.GAN, ou INP dans une technologie inférieure à $0,25 \mu\text{m}$ qui, par effet plasma, dans son canal redresse les ondes THz dans les bandes 0,1 THz à 2,5 THz. Chaque nano-transistor est packagé
10 dans un micro packaging de surface $< 0,5 \text{ mm}^2$;

- d'une électronique de proximité 715 pour polariser chaque détecteur. Un nano-transistor pour être un redresseur efficace est polarisé par une tension de grille proche de sa tension de swing où le fonctionnement classique du transistor est le plus non linéaire. Le signal redressé est amplifié en forçant une asymétrie des charges dans le canal en injectant un courant entre le drain et la source ;

15 - d'une électronique de proximité 720 pour mettre en forme le signal THz. Le signal redressé est une différence de potentiel continu entre le Drain et la Source du nano-transistor mesuré en mode commun ou différentiel. L'électronique de proximité 720 est à haute impédance pour ne pas atténuer l'amplitude du signal et pour forcer l'injection du courant de polarisation dans le transistor et non dans le circuit d'amplification. Un montage soustracteur compense l'offset généré par l'injection du courant entre le drain
20 et la source. Un ou des amplificateurs faible bruit et faible drift amplifie le signal sur la dynamique du Convertisseur Analogique Numérique (CAN) 725 ;

- d'une électronique 725 pour digitaliser parallèlement le signal. Ce convertisseur analogique - numérique 725 possède une grande dynamique en amplitude (> 12 bits) et est rapide (> 100 kSamples/s ou milliers d'échantillons par seconde) ;

25 - d'un système 730 d'acquisition et de traitement du signal pour la réduction du bruit. De la même façon que dans le cas du capteur ponctuel, la source THz est modulée en amplitude ce qui permet de réaliser une mesure différentielle moyennée.

- d'un système 735 de communication haute vitesse via un protocole de communication Ethernet, USB ou cameraink (marques déposées).

30 Le capteur et la source sont synchronisés par un signal d'horloge numérique. La source est modulée en amplitude par ce signal d'horloge ce qui permet de mesurer et de compenser le résidu de signal (offset) présent aux bornes du capteur en l'absence de THz. La compensation est à la fois numérique par une soustraction à haute fréquence du signal mesuré avec THz et sans THz, mais aussi analogique en ajustant la tension à soustraire au signal du capteur pour maintenir le niveau global dans une certaine gamme de
35 tension.

Dans le cas du capteur multipixels, les positions absolues de l'objet à imager sont mesurées par un encodeur. Ces données de position sont alors synchronisées avec les données issues du capteur THz pour une utilisation sur l'ensemble de la course du déplacement y compris dans les zones d'accélération. Et enfin un moyennage des données calé sur les positions absolues et non sur le temps permet une
40 adaptation à toute vitesse de déplacement

Cette architecture garantie la plus grande sensibilité, un bruit signal réduit et une synchronisation du signal avec la position de l'objet optimal.

Le capteur multipixels 700 est réalisé selon la technique du « Wafer-level packaging » (ou WLP, en français assemblage au niveau du substrat) . Il s'agit d'une technologie d'assemblage d'un circuit intégré alors qu'il fait partie d'un substrat, par opposition avec la méthode traditionnelle dans laquelle on découpe le substrat en circuits individuels avant de les assembler. Cette technologie permet d'atteindre des dimensions et des proximités de composants bien supérieures à ce qui était obtenu de manière traditionnelle.

Le capteur multipixels 700 permet d'agrandir spatialement le champ de vue et donc de réaliser des images à haute résolution avec une grande fréquence de rafraîchissement (fréquence ligne > 1 kHz). Chaque capteur 700, y compris son électronique de proximité est en charge de redresser l'onde THz qu'il reçoit localement et de fournir un signal adapté en impédance pour les étages électroniques suivants. Dans l'électronique 720, chaque circuit soustracteur suivi d'un amplificateur, ou amplificateur différentiel, permet d'amplifier le signal utile.

Le signal est numérisé à haute cadence (Fréquence d'acquisition > 1 kHz) au plus près de la sortie analogique.

La démodulation du signal est réalisée de manière synchrone avec le signal de modulation de la source sur les signaux provenant de chaque pixel, ce qui assure un rapport signal à bruit maximisé en éliminant tous les bruits additifs à une fréquence autre que la fréquence de modulation de la source.

Le capteur multipixels 700 est situé dans le plan focal du système optique d'imagerie. Chaque capteur ponctuel est en charge de redresser l'onde THz, d'amplifier le signal utile. Le signal est numérisé à haute cadence (Fréquence d'acquisition > 1 kHz) au plus près de la sortie analogique

La faible surface des capteurs permet une grande compacité et donc il résulte une grande résolution spatiale. Les composants photosensibles sont disposés en ligne avec, par exemple, un espace entre deux surfaces photosensibles de composants de l'ordre de $300\ \mu\text{m}$ et un interpixel, distance de centre à centre, inférieur à 1 mm et préférentiellement de $800\ \mu\text{m}$, chaque composant ayant une dimension de $500\ \mu\text{m} \times 1\ \text{mm}$. La polarisation individuelle de chaque capteur permet de garantir une homogénéité de sensibilité capteur à capteur en conservant une haute sensibilité. La gestion parallèle de tous les signaux permet de garantir une très haute vitesse d'acquisition. Un traitement du signal embarqué permet un filtrage temps réel pour obtenir le meilleur rapport signal à bruit. Une communication par via un protocole de communication Ethernet, USB ou cameralink permet par gestion des paquets de d'envoyer les lignes à haute cadence de chaîner plusieurs capteurs multi pixels sans perte de données.

Le point de départ de la conception des systèmes d'imagerie pour capteur linéaire est la résolution spatiale imposée par le capteur. Le dispositif d'imagerie objet de l'invention présente, dans ses modes de réalisation multipixels, un inter-pixel de $800\ \mu\text{m}$, et selon le modèle, une ligne de 64, 128 ou 192 pixels. Par choix du champ de vision du côté de l'objet à imager, on impose la résolution spatiale optimale de l'ensemble capteur et objectif.

Par exemple, dans le cas d'un champ de vision de 30 mm coté objet, il est nécessaire d'assurer un échantillonnage correct de la scène selon de critère de Shannon (quatre pixels pour une paire de lignes à la résolution maximale) . Ainsi la résolution spatiale optimale de la caméra (capteur et objectif) est de 0,53 pl/mm (paires de lignes par millimètre) en fréquence. Une résolution optique supérieure du système ne pourrait pas être échantillonnée correctement par la caméra, une résolution optique inférieure conduirait à disposer d'un nombre de pixel/mm excessif donc de ne pas bénéficier de toute la ressource disponible. Cette approche indique également directement le grandissement nécessaire au système optique, ici $1,71 \times$.

Suite à ce préalable, on est capable de donner une cible de performance au système optique. Connaissant la fréquence de travail, par exemple 255 GHz, on calcule par la loi d'Airy que l'objectif à concevoir doit avoir une ouverture numérique coté objet de 1,31, une ouverture numérique coté image de 2,23. On peut également estimer la dimension du diamètre de l'objectif nécessaire pour atteindre cette

5 ouverture numérique : ici 75 mm.

Compte tenu des paramètres optiques déterminés ci-dessus, on voit que l'objectif à concevoir pour répondre à la problématique est un objectif de type microscope, c'est-à-dire permettant d'agrandir la scène tout en assurant la séparation des détails de celle-ci. Cette optique « de microscope » a un facteur de grandissement supérieur à un et une résolution meilleure que quatre fois l'interpixel divisé par le

10 grandissement. Cette optique est située sur le chemin optique des rayons émis par la source allant de la source au capteur de rayons en passant par l'objet.

En effet, contrairement à l'objectif de photographie ou à une lunette de vision lointaine (téléscope), l'objectif de microscope présente les caractéristiques globales suivantes : la scène à imager est plus petite que la taille du capteur, les pixels du capteur sont du même ordre de grandeur que les détails moyens de

15 la scène. Le rapport de reproduction est bien supérieur à un (une scène de $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ sera reproduite sur un capteur de 10 mm x 10mm : grandissement de 100). L'objectif travaille à faible distance de l'objet, et son ouverture objet peut atteindre des valeurs telles que 0,7.

En ce qui concerne l'utilisation d'un objectif de microscope, on rappelle qu'une optique de microscopie permet à la fois de grandir l'objet à observer, et de séparer les détails de cet objet afin qu'il

20 soit observable. C'est la combinaison d'un grandissement et d'un pouvoir de résolution qui caractérise un tel système optique.

Dans le cadre des systèmes d'imagerie à objectif de microscope en imagerie THz, d'une part la scène est généralement plus petite que la taille de la matrice de détecteur, et le détecteur est de l'ordre de grandeur des détails de la scène, il est donc nécessaire d'avoir un grandissement de la scène et de ses

25 détails pour l'imager. D'autre part l'image de la scène doit se former en assurant un pouvoir de résolution de l'objet suffisant pour pouvoir observer ses détails, ce qui implique en général de travailler avec des fortes ouvertures, donc à proximité de l'objet et avec des optiques de grand diamètre comparativement à la scène.

Pour répondre à la problématique de l'imagerie de champ THz, l'objectif de microscope est le

30 meilleur candidat :

- les pixels du capteur sont gros comparés aux détails de l'image à former,
- le capteur est de grande dimension : > 150 mm pour 192 pixels et
- la résolution à atteindre nécessite de très fortes ouvertures.

La conséquence de ce choix est que l'objectif est volumineux, d'une dimension similaire, ou plus

35 grande que les objets à imager.

Les résultats en termes de nombre de lentilles de l'optique, leurs formes, et leurs dimensions dépend beaucoup du grandissement visé, et de la résolution attendue, ainsi que du tirage de l'objectif (distance entre objet et première lentille)

Les objectifs présentent au minimum deux groupes de lentilles :

- 40
- 1er groupe : à proximité de l'objet, permet la collection de la lumière issue de l'objet avec l'ouverture ciblée et
 - 2ème groupe : à proximité de l'image, permet de former l'image de l'objet avec l'ouverture image ciblée.

Pour des objectifs faiblement contraints (par exemple grandissement de deux, et longueur d'onde faible), il est possible de concevoir un objectif sur ce principe avec une seule lentille par groupe, donc seulement deux lentilles en tout. Cela est rendu possible en particulier grâce à la capacité de fabriquer des lentilles asphériques.

5 Pour des objectifs plus contraints (par exemple grandissement de 1 et longueur d'onde élevée) il est nécessaire d'utiliser plus d'une lentille par groupe :

- compensateur de champ dans le premier groupe pour limiter la courbure de champ et
- deux ou trois lentilles dans le deuxième groupe pour limiter les épaisseurs et les aberrations

10 Dans certains modes de réalisation, l'objectif présente en réalité trois groupes de lentilles, le deuxième groupe étant divisé en deux sous-groupes séparés d'un espace d'air important, c'est le cas en particulier lorsque l'objectif est télécentrique coté image.

Exemples de réalisation

Exemple 1, figure 3 : champ objet 40 mm, grandissement 1,3x, 235 GHz

15 L'objectif 200 possède deux groupes 205 et 210 d'une lentille chacun, il n'est pas télécentrique coté image. Cet objectif 200 a été conçu avec la contrainte d'un tirage objet supérieur à 50 mm. La MTF (acronyme de « modulation transfer fonction » pour fonction de transfert de modulation) montre une résolution de 0,4 pl/mm, soit 1,92 mm de résolution rapporté à l'objet. Le spot diagramme montre que le système est limité par diffraction sur tout le champ : l'image n'est pas perturbée par les aberrations.

Exemple 2, figure 4 : champ objet 30 mm, grandissement 1,7x, 235 GHz

20 L'objectif 215 possède trois lentilles 220, 225 et 230, le deuxième groupe étant divisé en deux sous-groupes d'une lentille. Objectif télécentrique coté image. La MTF coté image montre une résolution de 0,45 pl/mm, soit 1,3 mm de résolution rapporté à objet. Le spot diagramme montre que le système est limité par diffraction sur tout le champ : l'image n'est pas perturbée par les aberrations.

Exemple 3, figure 5 : champ objet 52 mm, grandissement 1x, 140 GHz

25 L'objectif 235 présente un deuxième groupe divisé en deux sous-groupes. Quatre lentilles 240, 245, 250 et 255 sont nécessaires pour obtenir le grandissement de 1 et la télécentricité coté image. La MTF coté image montre une résolution de 0,40 pl/mm, soit 2,5 mm de résolution rapporté à objet. Le spot diagramme montre que le système est limité par diffraction sauf en bord de champ (défaut léger).

Exemple 4, figure 6 : champ objet 50 mm, grandissement 3,1, 235 GHz

30 L'objectif 260, de fort grandissement en deux groupes, avec un compensateur de champ dans le premier groupe. Cet objectif, à trois lentilles 265, 270 et 275 permet d'atteindre des résolutions inférieures à la longueur d'onde. La MTF coté image montre une résolution de 0,41 pl/mm, soit 780 $\mu\eta$ de résolution rapportée à objet. Le spot diagramme montre que le système est limité par diffraction sauf en bord de champ (défaut léger).

35 L'objectif d'imagerie THz sert à faire l'image d'un objet situé dans le champ vers un plan image situé à l'opposé de l'objectif. La condition pour fonctionner dans les spécifications est d'avoir en entrée un signal THz suffisant pour la sensibilité de détection dans le plan image. Dans une réalisation classique, cet objectif est intégré dans une chaîne incluant une source, un système de projection de l'éclairement de la source, l'objectif lui-même, un capteur multi-pixel, et un système d'analyse informatisé (non représenté).

40 L'objectif est donc un élément est clé dans la chaîne décrite ci-dessus car c'est lui qui assure la résolution spatiale optique sur l'objet à imager. Les dimensions de l'objectif sont intrinsèquement liées à

ses performances : plus la résolution désirée est grande plus les lentilles sont de grande dimension, et la longueur de l'objectif est importante.

L'utilisation d'une ligne de pixels comme capteur nécessite l'utilisation d'un éclairage sur une ligne de la scène afin de concentrer l'énergie de la source sur la partie de l'objet observée par le capteur linéaire.

5 La source émet un rayonnement sur un cône d'émission déterminé par son cornet. La répartition de l'énergie dans le cône d'émission présente une distribution d'énergie non uniforme et circulaire car celle-ci est en général de distribution gaussienne et à symétrie de révolution. Le système de linéarisation de la source vise deux objectifs :

- rendre l'éclairage de la source linéaire et
- 10 - rendre l'éclairage de la source uniforme sur la scène.

Dans des modes de réalisation, l'éclairage de la scène est conçu parallèle dans une direction, et focalisé dans la direction perpendiculaire. L'utilisation d'une lentille cylindrique 290 est une solution pour atteindre cet objectif. Le faisceau 285 issu de la source est agrandi sur le même diamètre que la scène à éclairer, puis avec une lentille dont la courbure est asphérique à géométrie cylindrique (et non à géométrie 15 de révolution) on focalise le rayonnement dans une seule direction de l'espace, comme illustré en figure 7.

La linéarisation 280 par la méthode précédente présente un éclairage non-uniforme car la distribution de l'éclairage de la source ne l'est pas. La focalisation de la distribution d'énergie de la source dans une seule direction de l'espace garde la même distribution inhomogène reportée long de la ligne d'éclairage.

20 La figure 8 représente une distribution d'énergie 300 en sortie de source 100.

Avec un logiciel de conception optique, il est possible de calculer la distribution à géométrie de révolution optimale pour assurer un éclairage uniforme une fois transformé par la lentille cylindrique. Cette distribution étant connue, le logiciel l'utilise comme cible pour optimiser les lentilles de mise en forme du faisceau à la sortie de la source 100. Par exemple un éclairage présentant une distribution 305, 25 illustrée en figure 9, forme une distribution uniforme après une lentille cylindrique.

Pour réaliser une uniformisation de l'éclairage sur la ligne observée par le capteur d'image linéaire, en deux étapes de conception, on forme un système 310 à trois lentilles 315, 320, 325, comme illustré en figure 10 :

- au cours d'une première étape, on calcule la distribution 305 nécessaire à l'entrée de la lentille 30 cylindrique 325,
- au cours d'une deuxième étape, on réalise une optimisation d'un système à deux lentilles asphériques 315, 320 pour former cette distribution 305.

La figure 11 illustre la distribution 330 résultant de la mise en œuvre du système optique 310.

Dans une autre méthode de linéarisation, on remplace les deux lentilles 315 et 320 de mise en 35 forme du faisceau par une seule lentille, présentant au moins une surface n'étant pas à symétrie de révolution (sphère, asphère), mais représentant des splines ou des polynômes. Dans ce cas, un ensemble de deux lentilles 335 et 340 permet de rendre l'éclairage linéaire et uniforme, comme illustré en figure 12:

- la lentille 335 sert à la mise en forme du faisceau pour préparer la distribution d'énergie (lentille à surface polynomiale XY, par exemple)
- 40 - la lentille 340 cylindrique asphérique réalise la focalisation du faisceau dans une seule direction.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est plus simple à mettre en œuvre dans un logiciel de calcul : une macro de passage de l'éclairage circulaire gaussien de la source à l'éclairage linéaire

uniforme est directement implémentée au niveau de l'optimisation sans passer par une étape intermédiaire de calcul de l'éclairement nécessaire à l'entrée de la lentille cylindrique 340. Le calcul de la macro, complexe pour un système à symétrie de révolution, on brise cette symétrie dès la première lentille. Cela apporte l'avantage de diminuer le nombre de lentilles nécessaires.

5 La conception de l'éclairement prend en compte la source utilisée (longueur d'onde, divergence). Le système d'éclairement permet de projeter assez d'énergie THz sur un plan de l'espace pour ensuite utiliser un objectif de collection et un capteur pour former une image d'un objet placé dans ce plan de l'espace.

10 Le système de linéarisation permet de choisir comment répartir l'énergie issue de la source afin d'éclairer le plus efficacement la scène. Un système bénéficiant de ce type d'éclairement a la plus grande efficacité énergétique, ce qui permet d'utiliser des capteurs moins sensibles, ou de faire des images d'objets très opaques ou peu réfléchissants.

15 Dans un autre mode de réalisation l'éclairement peut être un rectangle dont les largeurs et hauteurs peuvent être choisies par le concepteur. Dans ce cas l'éclairement est collimaté sur l'objet à étudier ce qui permet d'une part d'avoir une plus grande profondeur dans laquelle l'éclairement est optimale et d'autre part d'avoir la pupille de sortie du système d'éclairement à l'infini afin d'éviter d'avoir une partie de l'image de la source qui se superpose avec l'image de l'objet.

20 Pour réaliser un éclairement rectangulaire on procède selon la deuxième méthode décrite ci-dessus : un calcul photométrique permet de déterminer une macro de passage entre un éclairement gaussien de révolution et un éclairement rectangulaire uniforme (ou rectangulaire avec un profil d'intensité particulier. De plus, on impose l'angle d'incidence des rayons nul ponctuel sur l'objet afin de rendre l'éclairement collimaté). Cette macro est implémentée dans le logiciel de conception pour faire l'optimisation de deux lentilles à surface n'étant pas à symétrie de révolution qui génèrent au niveau de l'objet un éclairement rectangulaire tel que défini par le concepteur.

25 En ce qui concerne la lame séparatrice, par exemple les lames 435 et 455 illustrées en figures 14 et 15, le silicium Haute Résistivité est très couramment utilisé dans le domaine THz pour la fabrication de fenêtres optique, de séparateur de faisceau, ou de lentilles de collection hémisphériques. Préférentiellement, le système de capture d'images objet de l'invention utilise ce matériau pour ses lames semi-réfléchissantes. En effet, l'indice très élevé de 3,41 permet d'obtenir sur une seule face de matériau une séparation du faisceau en deux composantes réfléchi et transmise de 45% et 55% respectivement.

30 Pour assurer la fonction de lame-séparatrice (idéalement 50% de transmission et 50% de réflexion) la lame doit être conçue avec soin, car le passage à travers les deux faces de la lame provoque des interférences du faisceau avec lui-même qui fait varier notablement les performances du composant.

35 Préférentiellement, la lame séparatrice est l'objet d'un traitement antireflet sur une seule face de son matériau. Ainsi il n'apparaît pas de réflexion sur cette face, et les interférences ne se produisent pas. Pour le traitement, on choisit préférentiellement un matériau d'un indice proche de 1,8, et on adapte son épaisseur à un sous-multiple de la longueur d'onde.

40 Dans des modes de réalisation, on obtient une efficacité de séparation de 50% en choisissant l'épaisseur de la lame : par calcul des composants de l'onde entrant en interférence on est capable de déterminer quelle épaisseur conduit à une efficacité de 50%.

En ce qui concerne la polarisation incidente sur la lame séparatrice, préférentiellement on utilise la polarisation en mode TM (acronyme de transverse mode pour mode transversal) dans lequel le champ est

parallèle au plan d'incidence. L'inventeur a, en effet, déterminé que la polarisation en mode TM assure une meilleure stabilité de l'efficacité de séparation lorsque l'épaisseur de la lame séparatrice varie dans sa tolérance de fabrication.

La lame séparatrice est utilisée sur un faisceau faiblement divergent pour être la plus efficace. Préférentiellement, on l'insère dans un faisceau collimaté. La lame séparatrice est traversée deux fois par le faisceau optique : une fois lorsqu'il provient de la source, une deuxième fois lorsqu'il revient de l'objet vers le détecteur.

La lame séparatrice est utilisée pour concevoir un système optique en réflexion, où l'éclairage de l'objet et la récupération du flux provenant de l'objet se font du même côté de l'objet.

10 Un dispositif d'imagerie multipixels objet de l'invention intègre les éléments suivants :

- une source THz,
- un système optique constitué de lentilles pour réaliser l'éclairage linéaire,
- un système optique constitué de lentilles pour réaliser la collection de l'éclairage après transmission à travers l'objet ou réflexion sur l'objet,
- 15 - d'une lame séparatrice dans le cas de la réflexion,
- un capteur multipixels et
- une unité de traitement du signal sortant du capteur.

De manière générale il est compliqué d'utiliser le mode transmission soit à cause des dimensions de l'objet, soit à cause de contraintes d'environnement industriel. Le mode réflexion est donc couramment utilisé. Il existe plusieurs manières d'agencer l'éclairage et l'objectif pour mettre en place ce mode.

En mode transmission, le système optique complet présente deux parties 400 et 410 séparées, l'une pour l'éclairage linéaire, l'autre pour l'objectif d'imagerie. Par exemple, dans le système optique du dispositif 40 illustré en figure 13, les trois lentilles de gauche, partie 400, pour l'éclairage, les deux de droite, partie 410, pour l'objectif. Entre les deux, l'espace libre permet d'insérer l'objet 405 dont des images doivent être captées par le capteur 415.

L'ouverture de l'éclairage est adaptée à l'ouverture de l'objectif pour ne pas perdre d'énergie en dehors de l'objectif.

Dans un mode de réalisation du dispositif 42 illustré en figure 14, avec réflexion à travers tout l'objectif, les trois lentilles de droite 420 forment l'éclairage qui est projeté au niveau du plan image de l'objectif 430. L'éclairage passe ensuite par l'objectif 430 pour être projeté sur l'objet 425. Enfin l'objectif 430 forme l'image de l'objet 425 qui est projeté à 90° sur le capteur 415 grâce à une lame semi-réfléchissante 435.

L'éclairage est alors conçu pour éclairer uniformément l'objet 425 à travers l'objectif 430.

Dans un mode de réalisation du dispositif 44 illustré en figure 15, avec réflexion à l'intérieur de l'objectif, l'éclairage 440 prend en compte une lentille supplémentaire 460 après la lentille cylindrique 465 : la dernière lentille de l'objectif 450. Ainsi l'éclairage est inséré directement à la sortie de l'objectif 450. L'objectif 450 fonctionne grâce à une lame semi-réfléchissante 455 qui renvoie la lumière réfléchie à 90° vers les deux autres lentilles et le capteur linéaire 470.

L'avantage de cette conception est d'être plus compacte, et d'introduire moins de pertes avec moins de lentilles traversées par le faisceau THz entre la source et le capteur.

Le système d'éclairage permet d'avoir un éclairage homogène de la scène, le système de collection une très grande résolution exploitée par l'extrême compacité des pixels du capteur multipixels.

On décrit, ci-dessous, des modes de réalisation préférentiels des différents organes du dispositif objet de l'invention.

Préférentiellement, la source incohérente 100 de rayons présente un rapport de la largeur de bande d'émission sur la longueur d'onde médiane df/f constant. Ce rapport correspond à une certaine dose d'incohérence temporelle et ce quelle que soit la fréquence d'émission de la source. Ainsi, il n'est pas important que la source soit incohérente d'un point de vue "absolu" c'est à dire selon une certaine classification de l'ensemble des sources sur le marché. L'effet obtenu en utilisant une source moins cohérente est d'éliminer des effets d'ondes stationnaires lié aux dimensions caractéristiques de nos systèmes optiques. Avec le rapport df/f typique annoncé, préférentiellement supérieur à 1 % et, encore plus préférentiellement, supérieur à 2,5 %, on a une longueur de cohérence de l'ordre de la dizaine de millimètre, ce qui élimine les effets d'ondes stationnaires à l'échelle du dispositif objet de l'invention.

Le choix de ces rapports df/f permet de diminuer les ondes stationnaires. Le fait de fixer le rapport df/f plutôt que de largeur spectrale permet de s'affranchir de la fréquence de travail.

La technologie des sources multipliée s'appuie ici sur une source de bruit blanc de largeur 400MHz (source de fréquence médiane entre 0 et 18 GHz filtrée sur une plage de 400MHz) et, par ailleurs, des composants classiques normalement spécifiés pour une bande fine. Par exemple, on utilise un rapport df/f de $400 \text{ GHz}/15000 \text{ GHz} = 2,7\%$, ou $6,4 \text{ GHz}/240 \text{ GHz} = 2,67\%$.

L'objectif réfractif est nouveau par le fait de faire un objectif "de microscope" dans le domaine térahertz, qui combine une ouverture forte, et une résolution optique quasi-constante sur tout le champ de l'objectif qui fait plusieurs dizaines de millimètres. De plus, cette optique n'a pas de limitation de largeur de champ autre que la taille de la plus grosse lentille fabricable en un seul bloc.

Préférentiellement, cette optique, ou objectif, comporte deux groupes de lentilles :

- le premier groupe assure la collection de la lumière de la scène avec une pupille d'entrée à l'infini (objectif télécentrique) , en assurant l'ouverture calculée coté objet. Et projette cette lumière à travers l'ouverture de l'objectif située en amont du deuxième groupe de sorte que les rayons provenant de tous les points du champ remplissent entièrement l'ouverture. Dans le cas d'objectifs fortement contraints (ouverture < 1 , ou grandissement $\gg 1$), il est nécessaire d'ajouter un ménisque dans le premier groupe afin de jouer le rôle de compensateur de champ ; et

- le deuxième groupe focalise sur la surface du capteur la lumière issue de l'ouverture en assurant le grandissement et l'ouverture calculée coté image. Le deuxième groupe assure la compensation des aberrations (en particulier sphériques) générées par le premier groupe, de sorte que l'objectif soit limité par diffraction sur tout le champ. La pupille de sortie peut être également à l'infini, dans des modes de réalisation, mais ce n'est pas obligatoire coté image.

L'ouverture est de l'ordre de 1. Le champ optique est typiquement de 40 mm pour un diamètre de lentille de 100 mm. Le choix de la largeur du champ n'est limité que par la dimension maximale de la plus grosse lentille fabricable en usine et non pas par un critère dépendant des propriétés optiques attendues.

Pour faire rentrer le circuit de lecture sur une surface limitée, on utilise des composants miniature, des PCB multicouches avec des vias laser. La compacité est rendue possible car les puces sont soudées en face arrière "type BGA" ces puces n'ont pas de connexion latérale ce qui réduit leur encombrement latéral et donc permet de placer les dites puces très proches les unes des autres. La matrice de billes (en anglais Bail Grid Array ou BGA) est un type de boîtier de circuit intégré, destiné à être soudé sur un circuit imprimé.

Un boîtier BGA est composé d'une matrice de billes de soudures. Ces billes sont soudées sur un circuit imprimé possédant des plages d'accueil d'un diamètre adéquat. Il existe également des connecteurs qui permettent d'établir une liaison électrique entre un circuit intégré BGA et un circuit imprimé. Le pas entre billes est généralement de l'ordre du mm, il peut descendre à quelques dixièmes de mm pour les composants CSP (Chip Scale Package, traduisible par boîtier à l'échelle d'un die). L'utilisation de PCB multi couche avec vias permet d'optimiser la compacité et d'égaliser la longueur des pistes entre les composants et ainsi homogénéiser la réponse de chaque cellule sensible. Les puces sont de type Wafer Scale Level Package ou Chip Scale Package. Les techniques traditionnelles découpent les puces de façon individuelles pour les placer ensuite dans un packaging puis elles sont soudées avec des fils entre les plots de contact de la puce et les plots du packaging.

Les Packaging au niveau du Chip ou du wafer sont des résines qui sont déposées sur le wafer puis c'est le wafer avec la résine qui est découpée. Il n'y a donc plus de fil de soudure ni de packaging externe. La puce RF est alors plus reproductible car les fils/soudure sont la cause de nombreux soucis et à sa taille minimale, quelques dizaines de microns plus grand que la puce. Les ondes THz étant des ondes millimétriques, une puce sub millimétrique placée avec une précision de 0,050mm fournit une image de haute qualité. De plus, le fait de souder individuellement les puces avec des machines robotisées permet de faire une réparation et changer une puce qui serait défectueuse sur la ligne de pixels. La combinaison des contraintes du THz avec la disponibilité de ces micro puces et des circuits imprimés multicouches avec via qui fournit des images excellentes. Cette combinaison est moins adaptée au-delà de 2-3 THz car la longueur d'onde est alors de 0,1 mm.

Le packaging apporte d'autres effets techniques : meilleure homogénéité de la photo-réponse d'un capteur à l'autre, sensibilité identique à l'orientation de la polarisation de la lumière d'un capteur à l'autre. Le packaging fait 0,5 mm. X 1 mm, avec des bornes de connexion qui ne sortent pas de la surface des zones photosensibles (pad de contact situés sous le packaging). Le transistor est câblé non pas avec des "bondings" mais avec hot-via, contacts traversants sur la face arrière. Concernant les hot-vias, le lecteur pourra se reporter "Design Data for Hot-via Interconnects in Chip Scale Packaged MMICs up to 110 GHz" Alexandre Bessemoulin, 12th GAAS Symposium - Amsterdam, 2004.

La taille du packaging et la méthode de câblage du transistor à l'intérieur permettent d'atteindre une très bonne répétabilité de placement d'un capteur à l'autre. Or la réponse du transistor est très sensible à son orientation et son câblage dans le packaging. Dans les packaging plus gros, les dispersions sur la position du transistor et la forme des bonding créent une grande disparité de réponse d'un capteur à l'autre. Par le choix de ce packaging 0,5x1 mm, on assure deux fonctions : permettre une grande compacité, et une meilleure reproductibilité de la réponse d'un pixel à l'autre.

Le transistor est polarisé par un circuit générant une tension de grille et un micro-courant dans le canal du transistor pour booster sa sensibilité (gain de 3dB de rapport signal à bruit). Pour utiliser le transistor dans ces conditions, le circuit de lecture être adapté : soustraction de l'offset en particulier. Il est aussi question d'un choix d'ampli faible bruit et faible dérive en température. Tous ces composants prennent de la place en termes de surface et aussi de complexité de routage, il est nécessaire d'utiliser des composants CMS 0201 et 0402 et des PCB multicouches avec des vias laser.

Le choix de la largeur du champ n'est limité que par la dimension maximale de la plus grosse lentille fabricable en usine et non pas par un critère dépendant des propriétés optiques attendues.

REVENDICATIONS

1. Dispositif d'imagerie (40, 42, 44), caractérisé en ce qu'il comporte :
 - une source (100) incohérente de rayons dont la fréquence est comprise entre 0,075 THz et 10 THz pour éclairer un objet,
 - un capteur (415, 470) de rayonnement provenant de l'objet, qui comporte une pluralité de zones sensibles aux rayonnements issus de la source et qui émet un signal électrique représentatif de l'intensité des rayons issus de la source atteignant chaque zone sensible du capteur,
 - au moins une optique (235, 260) « de microscope » ayant un facteur de grandissement supérieur à un et une résolution meilleure que quatre fois l'interpixel divisé par le grandissement, située sur le chemin optique des rayons émis par la source allant de la source au capteur de rayons en passant par l'objet, dans lequel le ratio de la largeur de bande sur la longueur d'onde médiane est supérieur à 1 %.
2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel le ratio de la largeur de bande sur la longueur d'onde médiane est supérieur à 2,5 %.
3. Dispositif selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel la source incohérente est une source de bruit blanc suivie d'un multiplicateur de fréquences.
4. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel la source de bruit blanc émet sur une largeur de bande entre 200 MHz et 500 MHz pour une longueur d'onde médiane inférieure à 20 GHz.
5. Dispositif selon l'une des revendications 3 ou 4, dans lequel la source de bruit blanc est un synthétiseur de fréquences filtré.
6. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel l'optique est constituée de deux groupes de lentilles, le premier groupe assurant la collecte de la lumière de la scène avec une pupille d'entrée à l'infini, et projette cette lumière à travers l'ouverture de l'objectif située en amont du deuxième groupe, de telle sorte que les rayons lumineux provenant de tous les points du champ optique remplissent entièrement l'ouverture, le deuxième groupe focalisant sur la surface du capteur la lumière issue de l'ouverture en assurant le grandissement et l'ouverture côté image, le deuxième groupe assurant, de plus, la compensation des aberrations sphériques générées par le premier groupe.
7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel le premier groupe comporte un ménisque configuré pour former un compensateur de champ optique.
8. Dispositif selon l'une des revendications 6 ou 7, dans lequel la pupille de sortie est à l'infini.
9. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel le champ optique est de 40 mm pour un diamètre maximal de lentille de 100 mm.
10. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel le capteur comporte un circuit imprimé multicouche avec des vias, sur lequel sont soudés des capteurs ponctuels d'une seule zone sensible, n'ayant pas de connexion latérale, en face arrière.
11. Dispositif selon la revendication 10, dans lequel les vias du circuit imprimé sont réalisés par laser.
12. Dispositif selon l'une des revendications 10 ou 11, dans lequel au moins un capteur ponctuel est dans un boîtier qui comporte une matrice de billes.
13. Dispositif selon l'une des revendications 10 à 12, dans lequel au moins un capteur ponctuel est de type assemblage au niveau du substrat ou au niveau du circuit.
14. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 13, dans lequel au moins un capteur ponctuel d'une seule zone photosensible comporte un transistor câblé avec des hot vias.

15. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 14, dans lequel au moins un capteur ponctuel d'une seule zone photosensible est polarisé par un circuit générant une tension de grille et un micro-courant dans la canal du transistor pour obtenir un gain d'au moins 3dB du rapport signal/bruit.
16. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 15, dans lequel l'interpixel, distance de centre à centre, des zones sensibles du capteur de rayonnement est inférieure à 1 mm.
17. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 16, qui comporte au moins une lentille de forme non symétrique de révolution, par exemple une lentille cylindrique ou une lentille avec des surfaces polynomiales sur X et Y.
18. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 17, dans lequel au moins un système optique comporte une lentille optique asphérique.
19. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 18, dans lequel au moins un composant optique d'un système optique présente un traitement anti-reflet comportant des microstructures en forme de cônes ou de cratères.
20. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 19, dans lequel la fréquence d'émission de la source incohérente est modulée.
21. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 20, dans lequel la source incohérente comporte une source de bruit de type bruit thermique dans une résistance ou diode impatt.
22. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 21, dans lequel chaque zone photosensible est un nano-transistor, le signal généré par la radiation THz est une différence de potentiel continue entre le Drain et la Source du nano-transistor mesuré en mode commun ou différentiel.
23. Dispositif selon la revendication 22, qui comporte une électronique de proximité pour polariser chaque nano-transistor par une tension de grille proche de sa tension de swing où le fonctionnement classique du transistor est le plus non linéaire.
24. Dispositif selon la revendication 23, dans lequel le signal redressé issu de chaque nano-transistor est amplifié en forçant une asymétrie des charges dans le canal du nano-transistor en injectant un courant dans le canal du transistor, entre le drain et la source et /ou en utilisant des motifs métallisés jouant le rôle d'antennes.
25. Dispositif selon l'une des revendications 23 ou 24, dans lequel l'électronique de proximité comporte un circuit de compensation de l'offset généré par l'injection du courant entre le drain et la source de chaque nano-transistor, par exemple en utilisant un montage soustracteur.
26. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 25, qui comporte au moins un amplificateur faible bruit et faible drift qui amplifie le signal sur la dynamique d'un convertisseur analogique numérique.
27. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 26, qui comporte un moyen de synchronisation de la démodulation du signal avec un signal de modulation d'amplitude de la source.
28. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 27, qui comporte un capteur des positions de l'objet à imager, par exemple en utilisant un encodeur.
29. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 28, qui comporte une lame séparatrice, la polarisation incidente sur la lame séparatrice étant la polarisation en mode TM (acronyme de transverse mode pour mode transversal) dans lequel le champ est parallèle au plan d'incidence.
30. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 29, qui comporte un moyen de mesure de l'intensité des rayonnements provenant de l'objet, et/ou de polarisation des rayons provenant de l'objet.

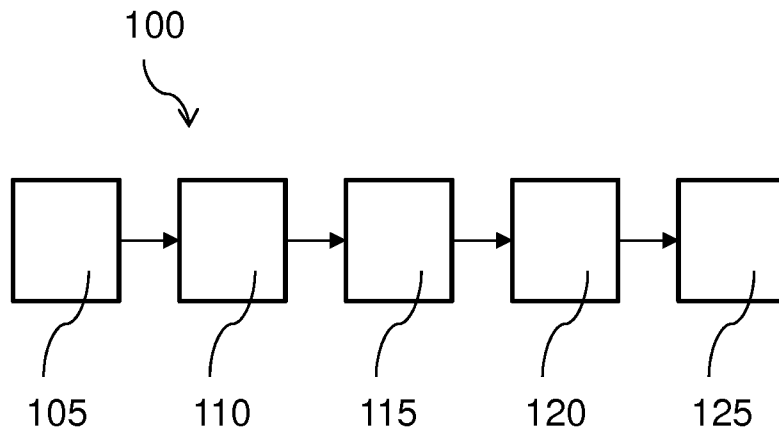


Figure 1

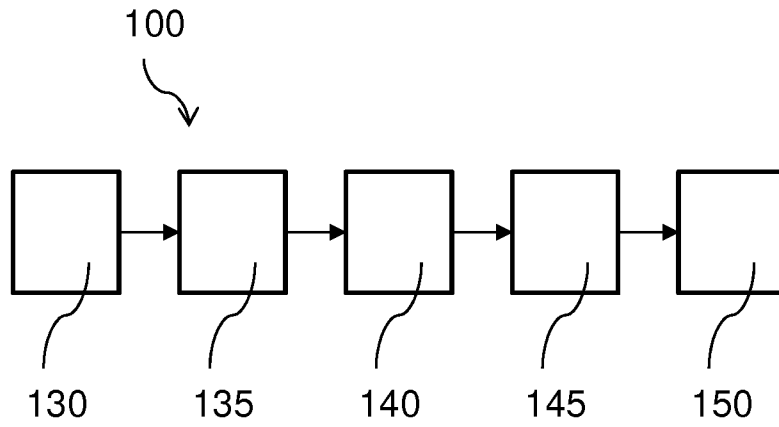


Figure 2

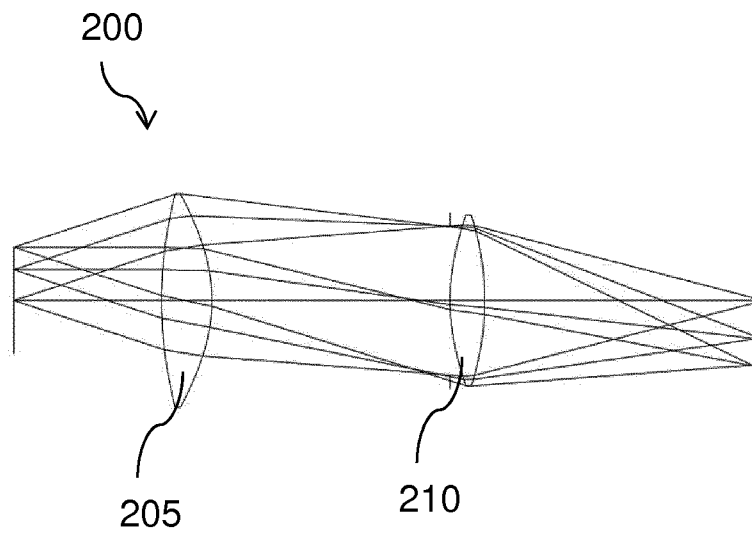


Figure 3

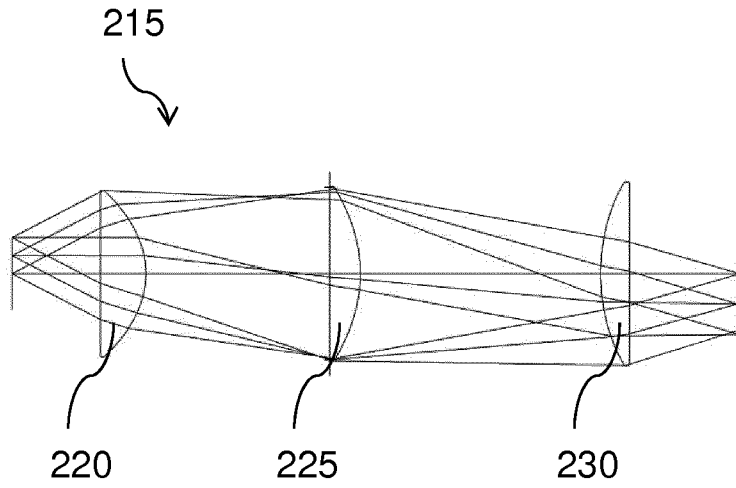


Figure 4

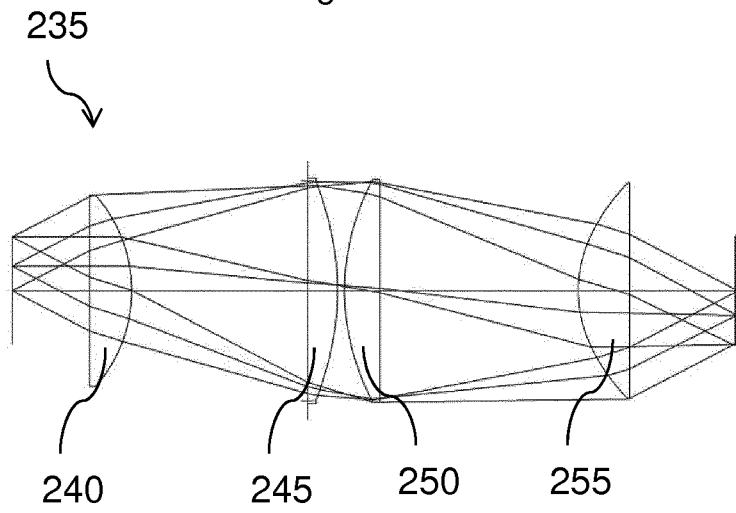


Figure 5

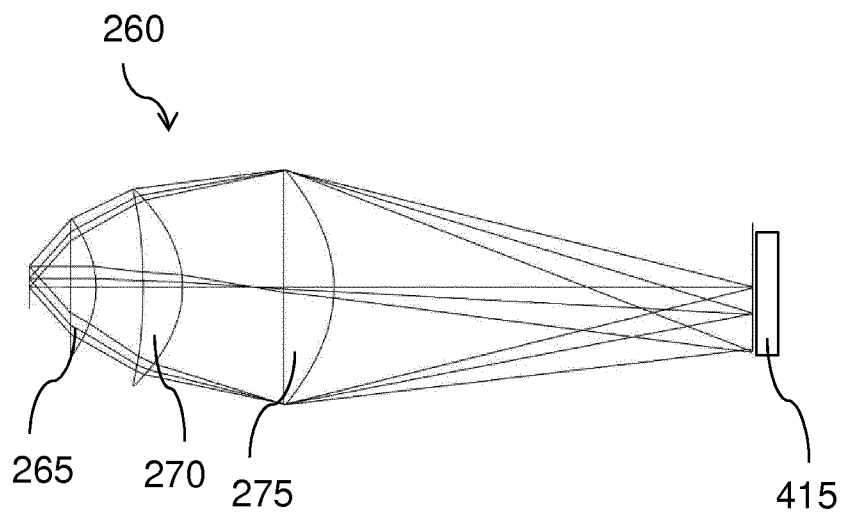


Figure 6

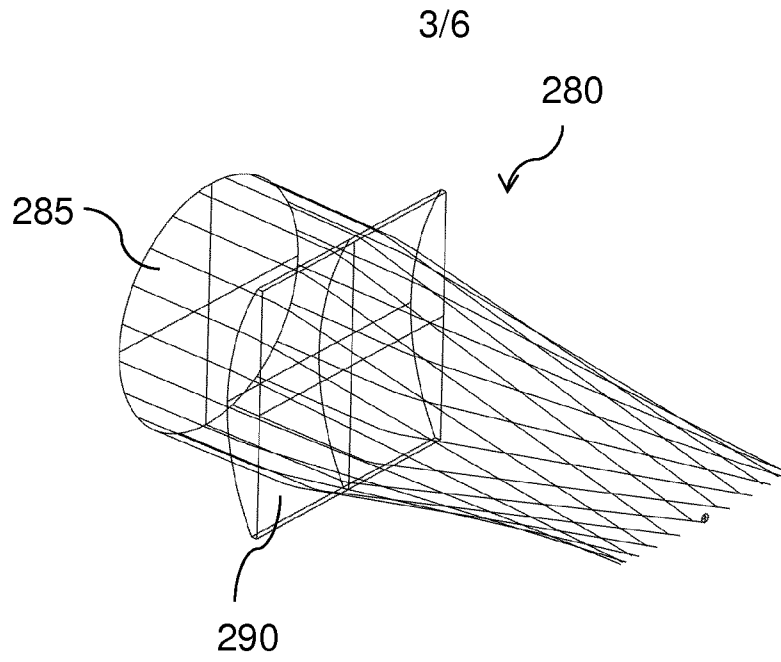


Figure 7

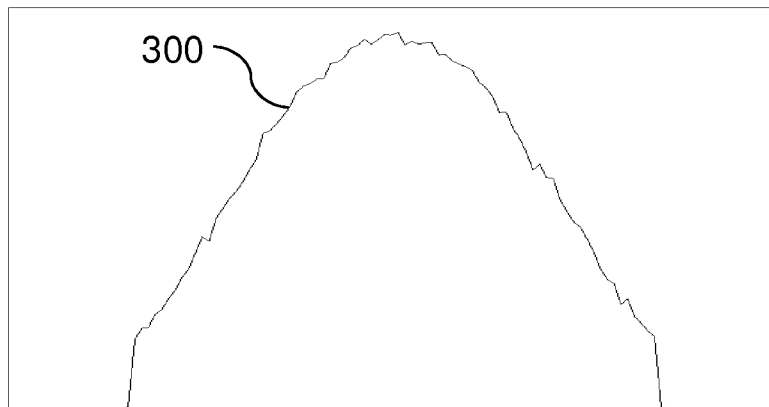


Figure 8

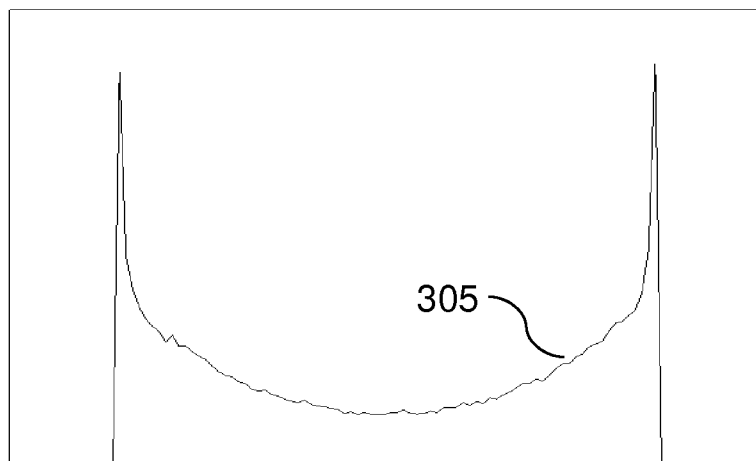


Figure 9

4/6

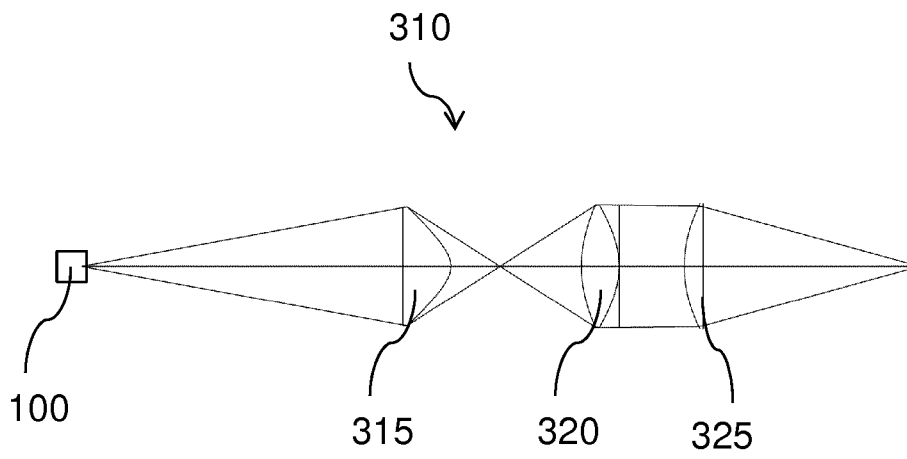


Figure 10

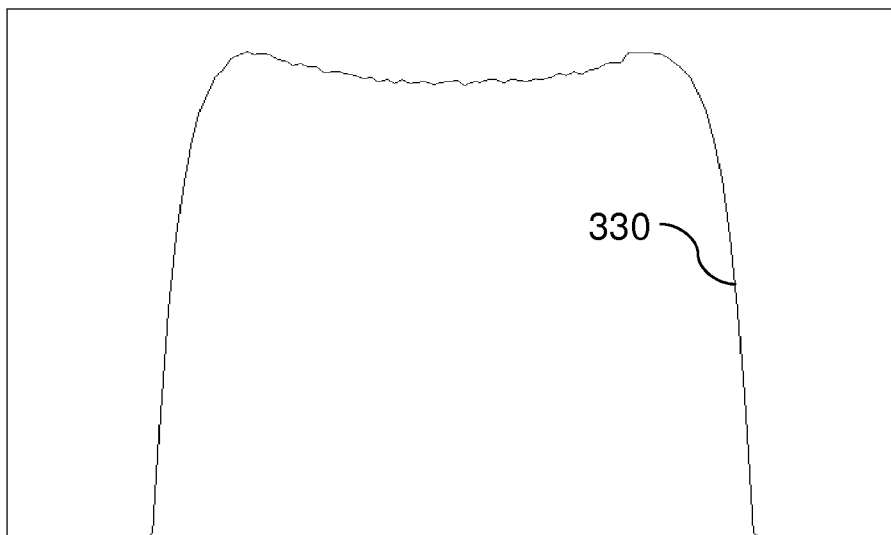


Figure 11

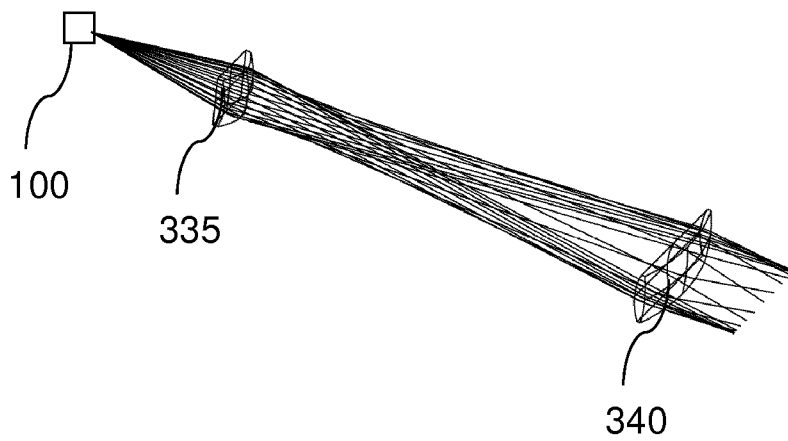


Figure 12

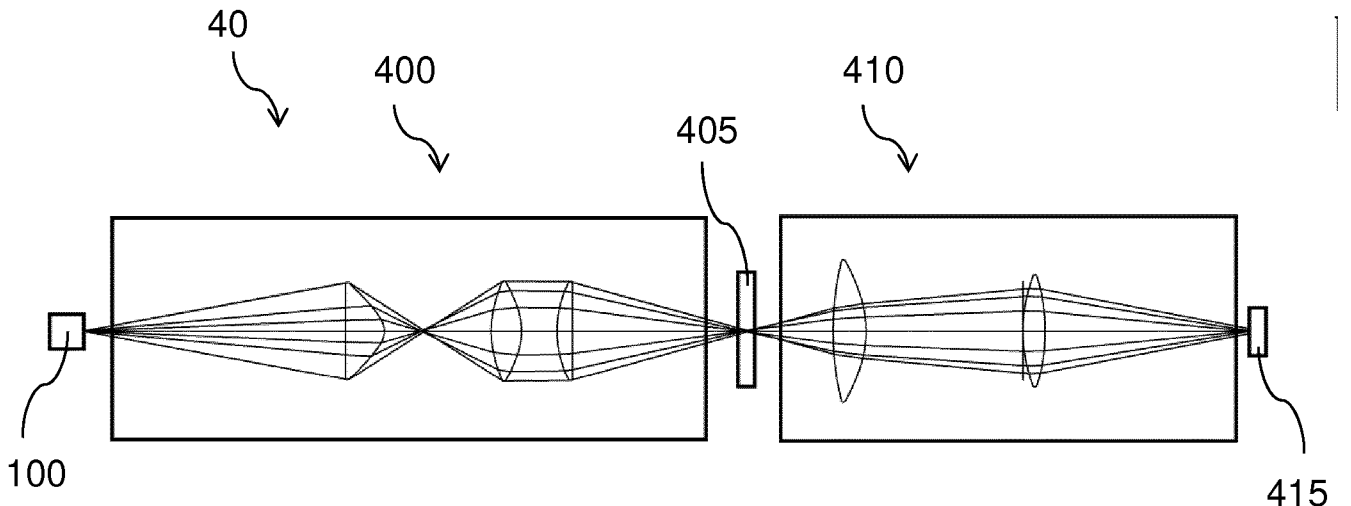


Figure 13

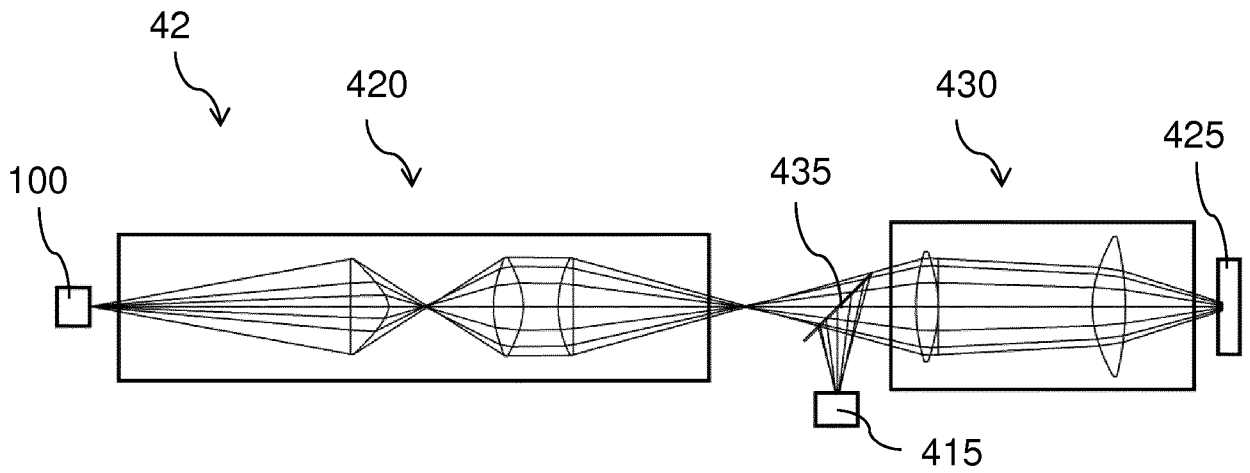


Figure 14

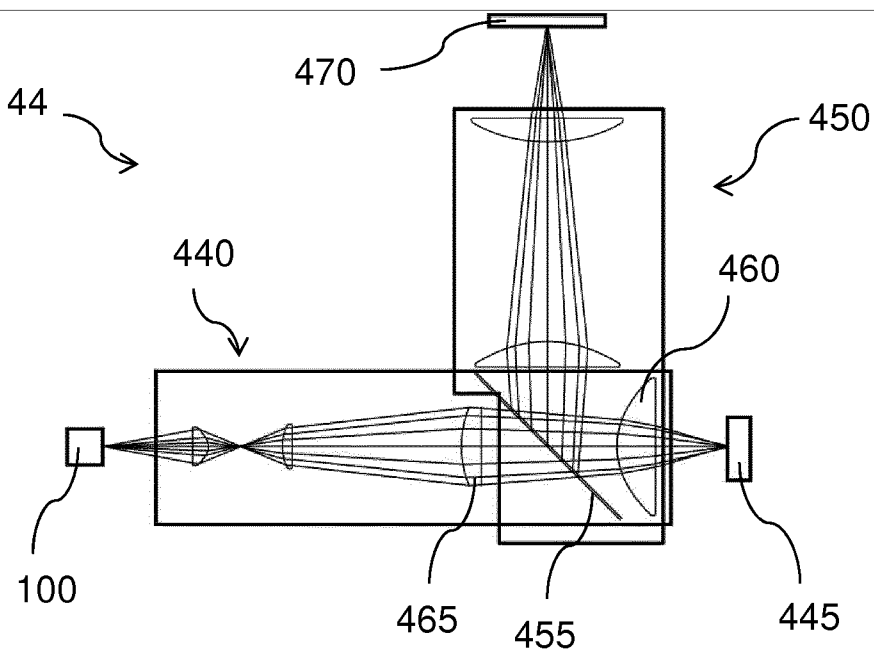


Figure 15

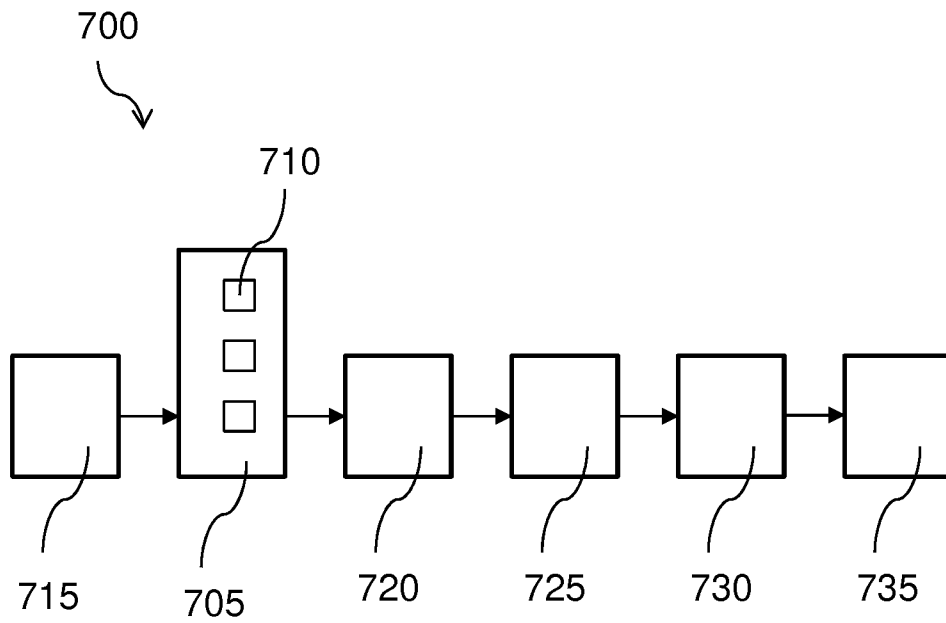


Figure 16

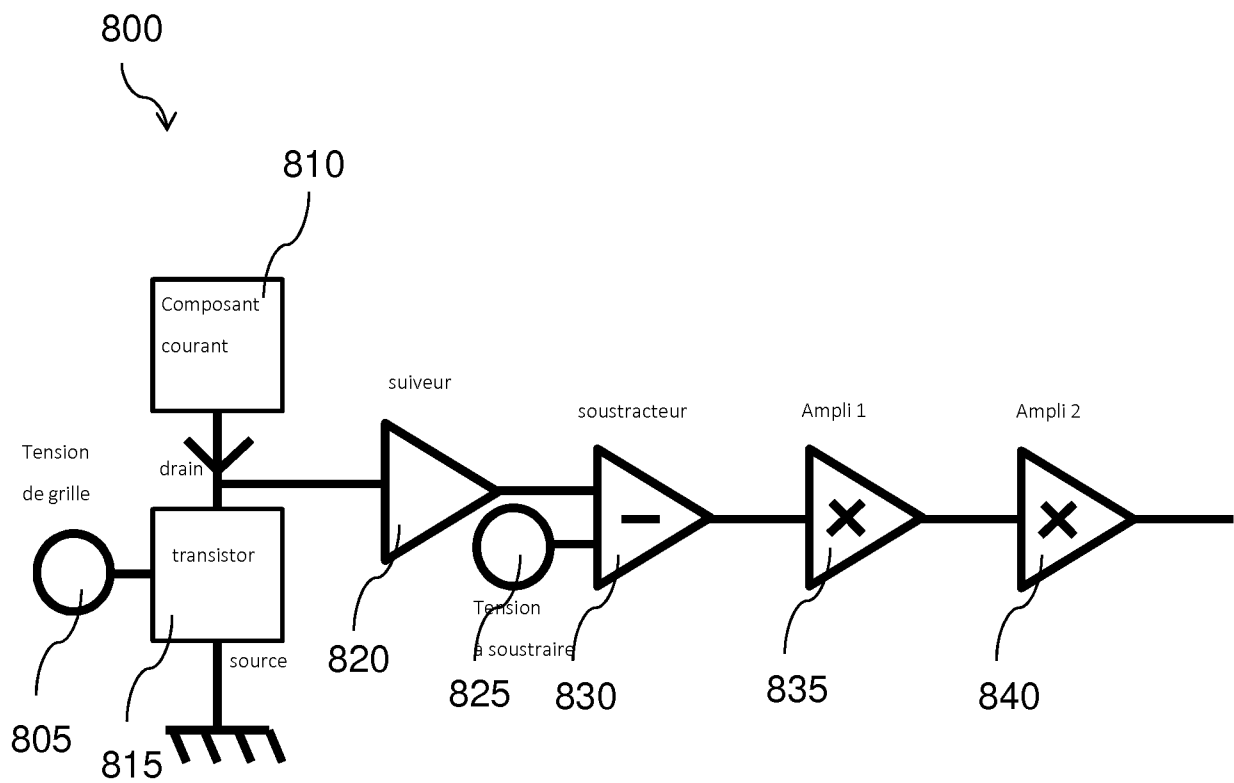


Figure 17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/073037

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01N21/3581
 ADD.
 According to International Patent Classification (IPC) onto both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
 Minimum documentation searched (classification **System** followed by classification **symbols**)
G01N G02B

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal , WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>NAOKI ODA ET AL: "Real-time transmissi on-type terahertz mi croscope with palm size terahertz caméra and compact quantum cascade laser" , PROCEEDINGS OPTICAL DIAGNOSTICS OF LIVING CELLS II , vol . 8496, 15 October 2012 (2012-10-15) , page 84960Q, XP055478169 , US ISSN : 0277-786X, DOI : 10. 1117/12 .928564 ISBN : 978-1-5106-1723-0 pages 84960Q-3; figure 2 tabl es 1, 2 figure 5</p> <p style="text-align: center;">----- -/- .</p>	1-6,8-30

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Spécial catégories of cited documents :

<p>"A" document defining the général state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other spécial reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search 31 October 2018	Date of mailing of the international search report 13/11/2018
---	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Le Masson , Ni col as
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/073037

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
T	"Inégali té (mathémati ques) - Wi ki pédi a" , 31 July 2017 (2017-07-31) , XP055478283 , Retri eved from the Internet: URL: https ://fr.wi ki pedi a.org/wi ki /Inégali té (mathémati ques) [retri eved on 2018-05-24] page 1 -----	
T	"Le cri tère de Shannon : Page pour l'impressi on" , 24 May 2018 (2018-05-24) , XP055478335 , Retri eved from the Internet: URL: https ://medi a4.obspm. fr/publ i c/ressour ces_l u/pages_ analyser/shannon _impressi on. h tml [retri eved on 2018-05-24] Théorème de Shannon ; page 4 -----	
T	"Spati al Resol uti on i n Di gi tal Imagi ng ; Mi croscopyU" , 24 May 2018 (2018-05-24) , XP055478336 , Retri eved from the Internet: URL: https ://www.mi croscopyu. com/tutori al s/ spati al -resol uti on- i n- di gi tal -imagi ng [retri eved on 2018-05-24] page 2, paragraph 3 -----	
A	US 2011/168891 A1 (VAN DER WEI DE DANIEL [US] ET AL) 14 July 2011 (2011-07-14) paragraph [0017] -----	1-30
A	Anonymous : "Vi rgi ni a Di odes , Inc - Mul ti pli ers" , 15 March 2014 (2014-03-15) , XP055520488 , Retri eved from the Internet: URL: https ://web.archi ve.org/web/2014031521 4429/http ://vadi odes .com/i ndex .php/en/prod ucts/mul ti pli ers [retri eved on 2018-10-31] page 2 - page 3 ----- -/--	1-30

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/073037

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>CHERNOMYRDIN NI KI TA V ET AL: "Wide-aperture aspheri cal lens for high-resol uti on terahertz imagi ng" , REVI EW OF SCI ENTI FIC INSTRUMENTS, A I P, MELVILLE, NY, US, vol . 88, no. 1, 12 January 2017 (2017-01-12) , XP012215296, ISSN: 0034-6748, DOI: 10. 1063/1 .4973764 [retri eved on 2017-01-12] pages 014703-3 ; figure 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>W00 JEONG MIN ET AL: "Terahertz filter i ntegrated wi th a subwavel engh structured anti refl ecti on coati ng" , A I P ADVANCES, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747 , vol . 5, no. 12, 1 January 1901 (1901-01-01) , XP012204228, DOI: 10. 1063/1 .4939571 figure 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>Pi otr Garbacz : "TERAHERTZ IMAGING - PRINCI PLES, TECHNIQUES, BENEFITS, AND LIMITATIONS" , , 1 January 2016 (2016-01-01) , XP055473632 , Retri eved from the Internet: URL: https ://yadda. i cm.edu.pl /baztech/el eme nt/bwmetal .el ement.baztech-b79fb0b6-5eb8-4 54f-b6b5-1c735a53bf3a/c/garbacz_terahertz_ l_2016.pdf [retri eved on 2018-05-08] page 84</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>BOUBANGA-TOMBET S ET AL: "Terahertz radi ati on détekti on by field effect transi stor i n magneti c field" , APPLI ED PHYSICS LETTERS, A I P PUBLISHING LLC, US, vol . 95, no. 7, 19 August 2009 (2009-08-19) , pages 72106-72106, XP012122720, ISSN: 0003-6951 , DOI: 10. 1063/1 .3207886 the whol e document</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>VALK VAN DER N C J ET AL: "TERAHERTZ POLARIZATION IMAGING" , OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCI ETY OF AMERICA, vol . 30, no. 20, 15 October 2005 (2005-10-15) , pages 2802-2804, XP001235423 , ISSN: 0146-9592 , DOI: 10. 1364/OL. 30. 002802 figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/073037

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>COMART I LKER ET AL: "Mi crowave Characteri zati on of a Wafer-Level Packagi ng Approach for RF MEMS Devi ces Usi ng Glass Fri t Bondi ng" , IEEE SENSORS JOURNAL, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol . 14, no. 6, 1 June 2014 (2014-06-01) , pages 2006-2011 , XP011546270, ISSN: 1530-437X, DOI : 10. 1109/JSEN .2014. 2308256 [retri eved on 2014-04-22] the whol e document -----</p>	1-30

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2018/073037

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2011168891	A1	14-07-2011	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2018/073037

<p>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01N21/3581 ADD.</p>		
<p>Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB</p>		
<p>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</p>		
<p>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01N G02B</p>		
<p>Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche</p>		
<p>Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal , WPI Data</p>		
<p>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</p>		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	<p>NAOKI ODA ET AL: "Real-time transmissi on-type terahertz mi croscope with palm size terahertz caméra and compact quantum cascade laser" , PROCEEDINGS OPTICAL DIAGNOSTICS OF LIVING CELLS II , vol . 8496, 15 octobre 2012 (2012-10-15) , page 84960Q, XP055478169 , US ISSN : 0277-786X, DOI : 10. 1117/12 .928564 ISBN : 978-1-5106-1723-0 pages 84960Q-3; figure 2 tabl eaux 1, 2 figure 5</p> <p style="text-align: center;">----- -/- .</p>	1-6,8-30
<p><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</p>		
<p>* Catégories spéciales de documents cités:</p> <p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> <p>"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention</p> <p>"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément</p> <p>"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier</p> <p>"&" document qui fait partie de la même famille de brevets</p>		
<p>Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée</p> <p style="text-align: center;">31 octobre 2018</p>		<p>Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale</p> <p style="text-align: center;">13/11/2018</p>
<p>Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale</p> <p style="text-align: center;">Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016</p>		<p>Fonctionnaire autorisé</p> <p style="text-align: center;">Le Masson , Ni col as</p>

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
T	<p>"Inégal it é (mathémati ques) - Wi ki pédi a" , , 31 jui llet 2017 (2017-07-31) , XP055478283 , Extrai t de 1' Internet: URL: https ://fr.wi ki pedi a.org/wi ki /Inégal it é (mathémati ques) [extrai t le 2018-05-24] page 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	
T	<p>"Le cri tère de Shannon : Page pour 1' impressi on" , , 24 mai 2018 (2018-05-24) , XP055478335 , Extrai t de 1' Internet: URL: https ://medi a4.obspm. fr/publ i c/ressour ces_lu/pages_analyser/shannon _impressi on.h tml [extrai t le 2018-05-24] Théorème de Shannon ; page 4</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	
T	<p>"Spati al Resol uti on i n Di gi tal Imagi ng ; Mi croscopyU" , , 24 mai 2018 (2018-05-24) , XP055478336, Extrai t de 1' Internet: URL: https ://www.mi croscopyu. com/tutori al s/ spati al-resol uti on-i n-di gi tal -imagi ng [extrai t le 2018-05-24] page 2, ali néa 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	
A	<p>US 2011/168891 A1 (VAN DER WEI DE DANIEL [US] ET AL) 14 jui llet 2011 (2011-07-14) ali néa [0017]</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>Anonymous : "Vi rgi ni a Di odes , Inc - Mul ti pli ers" , , 15 mars 2014 (2014-03-15) , XP055520488, Extrai t de 1' Internet: URL: https ://web.archi ve.org/web/20140315214429/http ://vadi odes .com/i ndex .php/en/prod ucts/mul ti pli ers [extrai t le 2018-10-31] page 2 - page 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p style="text-align: center;">-/--</p>	1-30

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'Indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>CHERNOMYRDIN NI KI TA V ET AL: "Wide-aperture aspheri cal lens for high-resol uti on terahertz imagi ng" , REVI EW OF SCI ENTI FIC INSTRUMENTS, AI P, MELVILLE, NY, US, vol . 88, no. 1, 12 janvi er 2017 (2017-01-12) , XP012215296, ISSN: 0034-6748, DOI: 10. 1063/1 .4973764 [extrai t le 2017-01-12] pages 014703-3 ; figure 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>W00 JEONG MIN ET AL: "Terahertz filter i ntegrated wi th a subwavel engh structured anti refl ecti on coati ng" , AI P ADVANCES, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747 , vol . 5, no. 12, 1 janvi er 1901 (1901-01-01) , XP012204228, DOI: 10. 1063/1 .4939571 figure 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>Pi otr Garbacz : "TERAHERTZ IMAGING - PRINCI PLES, TECHNIQUES, BENEFITS, AND LIMITATIONS" , , 1 janvi er 2016 (2016-01-01) , XP055473632 , Extrai t de l'Internet: URL: https ://yadda. i cm.edu.pl /baztech/el eme nt/bwmetal .el ement.baztech-b79fb0b6-5eb8-4 54f-b6b5-1c735a53bf3a/c/garbacz _terahertz _ 1 2016.pdf [extrai t le 2018-05-08] page 84</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>BOUBANGA-TOMBET S ET AL: "Terahertz radi ati on déteçti on by field effect transi stor i n magneti c field" , APPLI ED PHYSICS LETTERS, A I P PUBLISHING LLC, US, vol . 95, no. 7, 19 août 2009 (2009-08-19) , pages 72106-72106, XP012122720, ISSN: 0003-6951 , DOI: 10. 1063/1 .3207886 le document en enti er</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30
A	<p>VALK VAN DER N C J ET AL: "TERAHERTZ POLARIZATION IMAGING" , OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCI ETY OF AMERICA, vol . 30, no. 20, 15 octobre 2005 (2005-10-15) , pages 2802-2804, XP001235423 , ISSN: 0146-9592 , DOI: 10. 1364/OL. 30. 002802 figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30

-/--

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>COMART I LKER ET AL: "Mi crowave Characteri zati on of a Wafer-Level Packagi ng Approach for RF MEMS Devi ces Usi ng Gl ass Fri t Bondi ng" , IEEE SENSORS JOURNAL, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol . 14, no. 6, 1 jui n 2014 (2014-06-01) , pages 2006-2011 , XP011546270, ISSN: 1530-437X, DOI : 10. 1109/JSEN .2014. 2308256 [extrai t le 2014-04-22] le document en enti er</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-30

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2018/073037

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2011168891	A1	14-07-2011	AUCUN