

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①1 N° de publication : **3 145 210**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **23 00623**

⑤1 Int Cl⁸ : **G 01 N 21/31** (2023.01), G 01 N 21/350, G 01 N 33/
00

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Capteur de gaz compact de conception simple.

②2 Date de dépôt : 24.01.23.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 26.07.24 Bulletin 24/30.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 31.01.25 Bulletin 25/05.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *ELICHENS Société anonyme à
conseil d'administration* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : DUPREZ Hélène et MARCHENAY
Arnaud.

⑦3 Titulaire(s) : *ELICHENS Société anonyme à conseil
d'administration.*

⑦4 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

FR 3 145 210 - B1



Description

Titre de l'invention : Capteur de gaz compact de conception simple

Domaine technique

[0001] Le domaine technique de l'invention est un capteur optique de gaz, et plus particulièrement un capteur infrarouge non dispersif.

ART ANTERIEUR

[0002] Le recours à des méthodes optiques pour l'analyse d'un gaz est assez fréquent. Des dispositifs permettent de déterminer la composition d'un gaz en se basant sur le fait que les espèces composant un gaz présentent des propriétés spectrales d'absorption différentes les unes des autres. Ainsi, connaissant une bande spectrale d'absorption d'une espèce gazeuse, sa concentration peut être déterminée par une estimation de l'absorption de la lumière traversant le gaz, en utilisant la loi de Beer Lambert. Ce principe permet une estimation de la concentration d'une espèce gazeuse présente dans le milieu.

[0003] La source de lumière est usuellement une source émettant dans l'infrarouge, la méthode utilisée étant usuellement désignée par le terme anglosaxon "NDIR detection", l'acronyme NDIR signifiant Non Dispersive Infra-Red. Un tel principe a été fréquemment mis en œuvre, et est par exemple décrit dans de nombreux documents, par exemple dans US5026992 ou WO2007064370.

[0004] Selon les procédés les plus courants, le gaz analysé s'étend entre une source de lumière et un photodétecteur, dit photodétecteur de mesure, ce dernier étant destiné à mesurer une onde lumineuse, émise par la source, transmise à travers le gaz à analyser, et partiellement absorbée par ce dernier. Les procédés comprennent généralement une mesure d'une onde lumineuse, dite onde lumineuse de référence, émise par la source, et non absorbée par le gaz analysé.

[0005] La comparaison entre l'onde lumineuse en présence de gaz et l'onde lumineuse sans gaz permet de caractériser le gaz. Il s'agit par exemple de déterminer une quantité d'une espèce gazeuse dans le gaz, selon la technologie désignée par le terme "NDIR par absorption". Il peut également s'agir d'estimer une quantité de particules dans le gaz, en détectant une lumière diffusée par ce dernier selon une plage angulaire de diffusion prédéterminée.

[0006] L'onde lumineuse de référence est mesurée par un photodétecteur de référence. Il peut s'agir d'un photodétecteur de référence différent du photodétecteur de mesure, et agencé de façon à être disposé face à la source de lumière le photodétecteur de référence étant associé à un filtre optique de référence. Le filtre optique de référence définit une bande spectrale de référence, dans laquelle le gaz à analyser ne présente pas

d'absorption significative.

[0007] Les documents EP2711687 et EP2891876 décrivent des capteurs de gaz comportant des enceintes, dans lesquelles un ou plusieurs miroirs sont agencés. Les miroirs permettent de maximiser le trajet de la lumière dans l'enceinte, et de focaliser les rayons lumineux ayant traversé le gaz sur le ou les photodétecteurs. Cela permet d'augmenter la sensibilité de détection tout en utilisant des dispositifs compacts.

[0008] US2022/0214267 décrit une configuration compacte d'un capteur de gaz, compatible avec un format dit « 4R », qui est un standard usuel dans le domaine de la détection de gaz.

[0009] Le demandeur a conçu un capteur de gaz particulièrement compact, compatible avec le format 4R, dont la fabrication est plus simple, et moins coûteuse que celle du capteur décrit dans US2022/0214267. Il en résulte un capteur de gaz aux performances optimisées, privilégiant notamment la compacité et le coût.

Exposé de l'invention

[0010] Un premier objet de l'invention est un capteur de gaz comportant une enceinte, configurée pour recevoir un gaz, le capteur comportant également :

- une source de lumière, configurée pour émettre une onde lumineuse se propageant dans l'enceinte en formant, à partir de la source de lumière, un premier cône de lumière;
- un photodétecteur de mesure configuré pour détecter une onde lumineuse émise par la source de lumière et s'étant propagé à travers l'enceinte;
- la source de lumière et le photodétecteur de mesure étant supportés par un circuit imprimé;
 - une surface réfléchissante de rang 1, formant une partie d'une ellipsoïde de révolution, présentant un premier foyer et un deuxième foyer, la surface réfléchissante de rang 1 étant disposée face à la source de lumière, de façon à réfléchir le premier cône de lumière vers le deuxième foyer, la première surface réfléchissante formant une partie d'une ellipsoïde de révolution ;
 - le dispositif étant caractérisé en ce que :
 - le circuit imprimé comporte un miroir plan, formant une surface réfléchissante de rang 2, le deuxième foyer de la surface réfléchissante de rang 1 étant situé sur le miroir plan ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier;
 - le dispositif comporte une dernière surface réfléchissante, de rang N , N étant supérieur ou égal à 3, comportant un premier foyer, situé au niveau d'un miroir plan, disposé sur le circuit

imprimé, formant une surface réfléchissante de rang $N-1$, la dernière surface réfléchissante comportant un deuxième foyer;

- [0011] de telle sorte que l'onde lumineuse émise par la source de lumière est successivement réfléchi par les N surfaces réfléchissantes, selon leurs rangs respectifs, avant de converger vers le deuxième foyer de la dernière surface réfléchissante, en formant un dernier cône de lumière, le photodétecteur de mesure étant disposé de manière à s'étendre dans le dernier cône de lumière.
- [0012] Selon une possibilité, la source de lumière est disposée au niveau du premier foyer de la surface réfléchissante de rang 1, ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.
- [0013] Selon une possibilité, le photodétecteur de mesure est disposé au niveau du deuxième foyer de la dernière surface réfléchissante, ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.
- [0014] Selon une possibilité:
- le dispositif comporte plusieurs surfaces réfléchissantes de rang pair, chaque surface réfléchissante de rang pair étant un miroir plan disposé sur le circuit imprimé ;
 - le dispositif comporte plusieurs surfaces réfléchissantes de rang impair, chaque surface réfléchissante de rang pair formant une partie d'une ellipsoïde de révolution et s'étendant face au circuit imprimé.
- [0015] Selon une possibilité:
- chaque surface réfléchissante de rang n est configurée pour réfléchir l'onde lumineuse qu'elle reçoit en formant un cône de lumière de rang $n+1$, ce dernier s'étendant autour d'un axe de propagation de rang $n+1$;
 - lorsque $n < N$, l'axe de propagation de rang $n+1$ s'étend entre la surface réfléchissante de rang n jusqu'à la surface réfléchissante de rang $n+1$;
 - lorsque n est impair, et $n \leq N-2$, chaque surface réfléchissante s'étend selon une partie d'une ellipsoïde de révolution, l'axe de propagation de rang $n+1$ passant par le deuxième foyer de la surface de rang n , ce dernier étant confondu avec le premier foyer de la surface de rang $n+2$;
 - lorsque $n = N$, l'axe de propagation de rang $N+1$ s'étend entre la surface de rang N jusqu'au photodétecteur de mesure;
- [0016] de telle sorte que l'onde lumineuse émise par la source de lumière subit un nombre de réflexions correspondant au nombre de surfaces réfléchissantes avant d'atteindre le photodétecteur de mesure.
- [0017] Selon une possibilité, dans lequel lorsque $n < N$ et n est impair, chaque cône de lumière de rang $n+1$ converge vers le deuxième foyer de la surface de rang n à partir de laquelle il se propage.

- [0018] Les surfaces réfléchissantes de rang impair peuvent être ménagées sur une face interne d'une même paroi, formant un capot du capteur. L'enceinte peut être formée par l'assemblage du capot du capteur en dessus d'un socle, le circuit imprimé étant disposé sur le socle.
- [0019] Le ou chaque miroir plan peut être formé par une couche mince d'un matériau réfléchissant déposée sur le circuit imprimé.
- [0020] Le nombre de surfaces réfléchissantes s'étendant entre la source de lumière et le photodétecteur de mesure est de préférence impair. Le nombre de surfaces réfléchissantes s'étendant entre la source de lumière et le photodétecteur de mesure peut être égal à 3 ou à 5.
- [0021] Selon une possibilité, le capteur comporte un photodétecteur de référence, configuré pour détecter une onde lumineuse considérée comme non atténuée par le gaz.
- [0022] Le capteur peut comporter une surface réfléchissante de référence, formant une ellipsoïde de révolution, la surface de référence comportant :
- un premier foyer, disposé au niveau d'une surface réfléchissante plane, de rang pair, ou à une distance inférieure à 1 mm de cette dernière ;
 - un deuxième foyer, disposé au niveau du photodétecteur de référence, ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.
- [0023] Un deuxième objet de l'invention est un procédé d'analyse d'un gaz à l'aide d'un capteur selon le premier objet de l'invention, le procédé comportant les étapes suivantes :
- a. introduction du gaz dans l'enceinte du capteur;
 - b. illumination du gaz à l'aide de la source de lumière;
 - c. mesure d'une intensité lumineuse d'une onde lumineuse, émise par la source de lumière, et s'étant propagée à travers l'enceinte par le photodétecteur de mesure;
 - d. détermination d'une quantité d'une espèce gazeuse dans le gaz, à partir de l'intensité lumineuse mesurée.
- [0024] L'étape d) peut être mise en œuvre par une unité de traitement à partir d'un signal généré par le photodétecteur de mesure.
- [0025] Le procédé peut comporter une détection, par un photodétecteur de référence, d'une onde lumineuse de référence, considérée comme non absorbée, ou de façon négligeable, par le gaz. L'étape d) est alors mise en œuvre par l'unité de traitement à partir d'un signal de référence généré par le photodétecteur de référence.
- [0026] L'invention sera mieux comprise à la lecture de l'exposé des exemples de réalisation présentés, dans la suite de la description, en lien avec les figures listées ci-dessous.

FIGURES

- [0027] Les figures 1A et 1B sont des coupes du capteur de gaz, respectivement dans un plan transversal XZ et dans un plan principal XY, le plan principal étant perpendiculaire au plan transversal.
- [0028] La [Fig.2A] schématise le socle et le capot du capteur et montre l'emplacement des principaux composants du capteur, c'est-à-dire une source de lumière, un photo-détecteur de mesure, ainsi que trois surfaces réfléchissantes. Sur cette figure, l'axe D_1 correspond à une génératrice circulaire représentée sur la [Fig.1B]. Cette représentation revient à dérouler l'enceinte du capteur selon cette génératrice.
- [0029] La [Fig.2B] représente une variante du mode de réalisation schématisé sur la [Fig.2A], mettant en œuvre un photodétecteur de référence.
- [0030] La [Fig.3A] montre un mode de réalisation mettant en œuvre 5 surfaces réfléchissantes successives.
- [0031] La [Fig.3B] représente une variante du mode de réalisation schématisé sur la [Fig.3A], mettant en œuvre un photodétecteur de référence.
- [0032] La [Fig.4] montre un banc d'essai expérimental visant à déterminer la réflectivité de différentes couches minces.

EXPOSE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

- [0033] Les figures 1A et 1B schématisent un capteur de gaz 1 selon l'invention. Le capteur de gaz 1 comporte une enceinte 2 délimitée par un socle 4, un capot 5 et une paroi transversale 6. La paroi transversale 6 s'étend parallèlement à un axe transversal Z. La paroi transversale 6 est une paroi annulaire, autour de l'axe transversal Z. Elle s'étend entre le socle 4 et le capot 5. L'axe transversal Z s'étend perpendiculairement à un plan principal XY. L'enceinte 2 forme un boîtier cylindrique, obtenu en disposant le capot 5 sur le socle 4.
- [0034] Le socle 4 comporte une face externe 4_e et une face interne 4_i . Le capot 5 comporte une face externe 5_e et une face interne 5_i . Les faces externes 4_e , 5_e respectives du socle 4 et du capot 5 sont planes, parallèlement au plan principal XY. Elles sont perpendiculaires à l'axe transversal Z autour duquel s'étend la paroi annulaire 6. Les faces internes 4_i , 5_i respectives du socle 4 et du capot 5 sont orientées vers l'intérieur de l'enceinte 2. L'enceinte 2 est reliée à des broches de connexion 3, parallèles à l'axe transversal Z.
- [0035] La forme et les dimensions du capteur 1 sont conformes à un format usuel dans le domaine de la détection de gaz, dit format 4R. Le diamètre Φ de l'enceinte 2, dans le plan XY, est de 20 mm, et sa hauteur h (selon l'axe Z) est de 16.6 mm. Compte tenu de l'épaisseur de la paroi transversale 6, le diamètre interne Φ' de l'enceinte 2 est de 17 mm. On définit un sens positif de rotation autour de l'axe transversal Z, qui est considéré arbitrairement comme similaire au sens de rotation des aiguilles d'une montre.

[0036] Un avantage du format 4R est qu'il est largement utilisé dans le domaine de l'électronique. Ainsi, un capteur de gaz 1 respectant ce format peut aisément être raccordé à des circuits électroniques existants. Le respect de ce format facilite la maintenance de systèmes de mesure, en facilitant le remplacement de capteurs.

[0037] L'enceinte 2 est destinée à être occupée par un gaz G à analyser. Le gaz à analyser comporte une espèce gazeuse G_x dont on souhaite déterminer une concentration C_x dans le gaz. L'espèce gazeuse G_x absorbe la lumière, et notamment la lumière infra-rouge, dans une bande spectrale d'absorption $\Delta\lambda_x$. Le capteur 1 comporte également :

- une source de lumière 10, configurée pour émettre une onde lumineuse 11 dans une bande spectrale d'émission $\Delta\lambda$. La bande spectrale d'émission peut s'étendre entre le proche ultra-violet et l'infra-rouge moyen, par exemple entre 200 nm et 20 μm , et le plus souvent dans l'infra-rouge, la bande spectrale d'émission $\Delta\lambda$ étant par exemple comprise entre 1 μm et 20 μm .
- un photodétecteur de mesure 20, configuré pour détecter une onde lumineuse 14, dite onde lumineuse transmise, dans la bande spectrale d'absorption $\Delta\lambda_x$. L'onde lumineuse transmise est une onde lumineuse émise par la source de lumière 10, et s'étant propagée à travers l'enceinte, en s'atténuant progressivement durant son parcours à travers le gaz. Le photodétecteur de mesure 20 peut être associé à un filtre passe-bande, définissant une bande spectrale de détection $\Delta\lambda_d$ comprise dans la bande spectrale d'absorption $\Delta\lambda_x$.
- un photodétecteur de référence 20_{ref}, configuré pour détecter une onde lumineuse de référence. L'onde lumineuse de référence détectée par le photodétecteur de référence 20_{ref} est considérée comme non atténuée par le gaz G présent dans l'enceinte. Dans cet exemple, le photodétecteur de référence détecte l'onde lumineuse de référence 20_{ref} dans une bande spectrale de référence $\Delta\lambda_{ref}$, dans laquelle l'atténuation de l'onde lumineuse émise par la source est considérée comme négligeable, ou due à une variation de conditions environnementales, par exemple la température, ou l'humidité. Le photodétecteur de référence peut être associé à un filtre passe-bande de référence, définissant la bande spectrale de référence $\Delta\lambda_{ref}$. Par exemple, la bande spectrale de référence $\Delta\lambda_{ref}$ est centrée autour de la longueur d'onde 3.91 μm . Le recours à un photodétecteur de référence est optionnel mais est avantageux. De façon alternative, le photodétecteur de référence n'est pas disposé dans l'enceinte 2 comportant le gaz, auquel cas la bande spectrale de référence peut être similaire à la bande spectrale de mesure.

[0038] De préférence, la source de lumière 10, le photodétecteur de mesure 20 et le photodétecteur de référence 20_{ref} sont reliés à un même support plan. Il peut notamment s'agir d'une carte électronique formant la première paroi 4 de l'enceinte 2. Une telle dis-

position simplifie la fabrication du capteur.

[0039] La source de lumière peut être impulsionnelle, et émettre des impulsions lumineuses dont la durée est généralement comprise entre 50 ms et 1 s. Il peut notamment s'agir d'une source de lumière infra-rouge de type filament formé sur une membrane suspendue, le filament étant parcouru par un courant électrique. De cette façon, la membrane suspendue est chauffée à une température comprise entre 400°C et 800°C, de façon à émettre une lumière infra-rouge.

[0040] Le photodétecteur de mesure 20 et le photodétecteur de référence 20_{ref} peuvent être des thermopiles ou des pyrodétecteurs ou des photodiodes. Chaque photodétecteur est configuré pour générer un signal de détection, dont l'amplitude A correspond à une intensité I de l'onde lumineuse détectée.

[0041] L'intensité I de l'onde lumineuse détectée par le photodétecteur de mesure 20 dépend de la concentration C_x de l'espèce gazeuse d'intérêt G_x selon la relation de Beer Lambert :

$$[0042] \quad att = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu(C_x)l} \quad (1)$$

[0043] où :

- $\mu(C_x)$ est un coefficient atténuation, dépendant de la concentration C_x recherchée;
- l est l'épaisseur de gaz traversé par l'onde lumineuse dans l'enceinte ;
- I₀ correspond à l'intensité de l'onde qui est ou serait détectée par le photodétecteur de mesure 20 en l'absence de gaz absorbant dans l'enceinte.

[0044] La comparaison entre I et I₀, prenant la forme d'un ratio I/I₀, correspond à une atténuation att causée par l'espèce gazeuse G_x considérée. Lors de chaque impulsion de la source de lumière 10, on peut ainsi déterminer $\mu(C_x)$, ce qui permet d'estimer la quantité C_x sachant que la relation entre C_x et $\mu(C_x)$ est connue.

[0045] L'intensité I₀ peut être prédéterminée, par exemple au cours d'une calibration, ou mesurée en l'absence de gaz dans l'enceinte 20. Lorsque le capteur comporte un photodétecteur de référence 20_{ref}, l'intensité de référence I_{ref} mesurée par le photodétecteur de référence permet de mesurer des variations de I₀.

[0046] Le capteur comporte une unité de traitement 30, recevant les signaux mesurés respectivement par le photodétecteur de mesure 20 et l'éventuel photodétecteur de référence 20_{ref}. L'unité de traitement 30 permet d'effectuer, à partir de ces derniers, les calculs d'estimation de la concentration de l'espèce gazeuse recherchée. L'unité de traitement 30 comporte par exemple un microprocesseur.

[0047] Les dimensions de l'enceinte 2 dans laquelle s'étend le gaz sont particulièrement réduites. Or, il est préférable que l'onde lumineuse détectée par le photodétecteur de mesure 20 soit suffisamment atténuée de façon que l'atténuation att soit plus aisément

quantifiable, en tenant compte des différents bruits de la chaîne de mesure. Il est donc préférable que la longueur l parcourue par les rayons atteignant le photodétecteur de mesure soit suffisamment élevée. Le demandeur considère que l'atténuation att doit être supérieure à 0.2.

[0048] Dans la demande US2022/0214267, on décrit une configuration particulièrement compacte d'un capteur de gaz, dans lequel les rayons sont réfléchis par des surfaces réfléchissantes ellipsoïdales. Par surface ellipsoïdale, on entend une surface qui suit une partie d'une ellipsoïde de révolution. Les surfaces réfléchissantes permettent à l'onde émise par la source de lumière d'effectuer de multiples réflexions avant d'atteindre le photodétecteur de mesure. Il en résulte une longueur suffisante l parcourue, dans l'enceinte 2, par les rayons atteignant le photodétecteur de mesure 20. Cependant, une telle configuration suppose la réalisation d'un grand nombre de surfaces ellipsoïdales, qui doivent être précisément agencées les unes par rapport aux autres. De plus, cela suppose la réalisation de deux pièces différentes présentant des formes complexes.

[0049] La [Fig.2A] schématise l'intérieur de l'enceinte 2. Sur la [Fig.2A], on a représenté l'intérieur de l'enceinte 2 en suivant une génératrice circulaire D_1 représentée en pointillés sur la [Fig.1B]. Cette représentation revient à dérouler l'enceinte selon la génératrice circulaire D_1 , le long de laquelle s'étendent des surfaces réfléchissantes S_n de rang n . L'indice n est un entier naturel tel que $1 \leq n \leq N$, N étant le nombre de surfaces réfléchissantes situées sur le chemin optique de l'onde lumineuse émise par la source de lumière 10 et se propageant vers le photodétecteur de mesure 20.

[0050] Dans ce dispositif, selon que n soit pair ou impair, la surface réfléchissante S_n de rang n est respectivement plane ou ellipsoïdale. Ainsi, le capteur est formé d'une alternance de surfaces réfléchissantes ellipsoïdales (rang n impair) ou planes (n pair). Le recours à des surfaces réfléchissantes planes simplifie la fabrication du capteur.

[0051] Le terme surface ellipsoïdale S_n désigne une surface ellipsoïdale de révolution, obtenue par une rotation dans l'espace d'une ellipse E_n autour de l'un de ses axes. Dans l'exemple décrit, chaque surface ellipsoïdale S_n , n étant impair, est associée à une ellipse E_n présentant un grand axe et un petit axe. Par surface ellipsoïdale associée à une ellipse, on entend une surface ellipsoïdale formée par une rotation de l'ellipse autour d'un de ses axes. Dans l'exemple représenté, chaque surface ellipsoïdale S_n est obtenue par une rotation de l'ellipse E_n , à laquelle elle est associée, autour de son grand axe. Une telle surface ellipsoïdale est dite allongée, ce qui correspond à la désignation anglosaxonne "prolate spheroid" ou "prolate ellipsoid".

[0052] Par surface réfléchissante, on entend une surface dont le coefficient de réflexion, dans tout ou partie de la bande spectrale d'émission $\Delta\lambda$, est supérieur à 40%, voire 50%, et de préférence supérieur à 80%. Dans le domaine spectral infra-rouge, une paroi réfléchissante peut être formée à l'aide d'un matériau réfléchissant tel un métal,

par exemple de l'or.

- [0053] Dans les configurations représentées sur les figures 2A et 2B, $N = 3$. Dans les configurations représentées sur les figures 3A et 3B, $N = 5$. N peut être compris entre 3 et 10, mais le demandeur considère que $N = 5$ correspond à un optimum.
- [0054] Quelle que soit la configuration, chaque surface réfléchissante S_n , n étant impair, est ellipsoïdale. Elle comporte un premier foyer P_{1-n} et un deuxième foyer P_{2-n} , les deux foyers étant distincts l'un de l'autre. Lorsque $3 \leq n < N$, le premier foyer P_{1-n} est confondu avec le deuxième foyer $P_{2-(n-2)}$ d'une surface réfléchissante ellipsoïdale S_{n-2} de rang $n-2$. Lorsque $n = 1$ (première surface réfléchissante S_1), le deuxième foyer P_{2-1} est confondu avec le premier foyer P_{1-3} de la deuxième surface réfléchissante S_3 . Lorsque $n = N$ (dernière surface), le premier foyer P_{1-N} est confondu avec le deuxième foyer $P_{2-(N-2)}$ de la surface ellipsoïdale S_{N-2} de rang $N-2$. La première surface réfléchissante S_1 permet une réflexion de l'onde lumineuse incidente 11 émise par la source de lumière 10, tandis que la dernière surface réfléchissante S_N permet une réflexion de l'onde lumineuse, ayant traversé l'enceinte 10, vers le photodétecteur de mesure 20.
- [0055] Chaque surface réfléchissante S_n , n étant pair, est un miroir plan. Chaque surface réfléchissante S_n , n étant pair, est située au niveau :
- du deuxième foyer $P_{2,n-1}$ de la surface réfléchissante ellipsoïdale S_{n-1} de rang immédiatement inférieur ;
 - du premier foyer $P_{1,n+1}$ de la surface réfléchissante ellipsoïdale de rang immédiatement supérieur S_{n+1} .
- [0056] La source de lumière 10 et le photodétecteur de mesure 20 sont portés par un circuit imprimé 7, le circuit imprimé étant désigné par le terme anglosaxon Printed Circuit Board (PCB). De préférence, la source de lumière et le photodétecteur de mesure sont portés par le même circuit imprimé. De préférence, chaque miroir plan, formant une surface réfléchissante S_n de rang pair, est formé par une couche mince d'un matériau réfléchissant, tel de l'or ou du nickel, directement sur le PCB. L'épaisseur de la couche mince peut être de quelques 100 nanomètres, par exemple comprise entre 50 nm et 1 μm , ou entre 300 nm et 1 μm . Ainsi, avantageusement, chaque miroir résulte d'un dépôt du matériau réfléchissant directement sur le PCB. Cela simplifie le processus de fabrication du détecteur. La couche mince plane est disposée de façon à se situer dans l'axe Δ_{n-1} du cône de lumière Ω_{n-1} émis par la surface réfléchissante ellipsoïdale S_{n-1} de rang précédent. Comme précédemment indiqué, chaque surface réfléchissante S_n , n étant pair, s'étend au niveau du deuxième foyer $P_{2,n-1}$ de la surface réfléchissante ellipsoïdale S_{n-1} de rang précédent, ainsi qu'au niveau du premier foyer $P_{1,n+1}$ de la surface réfléchissante ellipsoïdale S_{n+1} de rang suivant.
- [0057] Un des avantages de l'invention est que seules les surfaces réfléchissantes de rang impair sont ellipsoïdales. Ces dernières sont ménagées sur le capot 5, et plus pré-

cisement forment la face interne 5_1 du capot. Contrairement à la configuration décrite dans US2022/0214267, les surfaces réfléchissantes ellipsoïdales sont formées sur une seule et même pièce, destinée à être disposée face au circuit imprimé 7. Cela limite le nombre de pièces complexes à réaliser. Par ailleurs, la formation de miroirs plans sur le circuit imprimé est particulièrement simple et peu onéreuse, ce qui réduit le prix du capteur. On peut soit déposer une couche mince réfléchissante, soit disposer un miroir plan préfabriqué.

- [0058] L'onde lumineuse 11 émise par la source de lumière est successivement réfléchi par les différentes surfaces réfléchissantes S_n , selon leurs rangs respectifs, pris dans l'ordre croissant. Autrement dit, les surfaces réfléchissantes $S_1 \dots S_N$ s'étendent successivement entre la source de lumière 10 et le photodétecteur de mesure 20. Le terme s'étendre successivement est à interpréter en considérant la propagation de la lumière entre la source de lumière 10 et le photodétecteur de mesure 20. Le trajet de l'onde lumineuse, projeté sur le socle 4 ou le capot 5, décrit un arc de cercle.
- [0059] La source de lumière 10 est configurée pour émettre l'onde lumineuse d'émission 11 selon un cône de lumière Ω_1 , dit premier cône, s'étendant autour d'un premier axe Δ_1 , jusqu'à la première surface réfléchissante ellipsoïdale S_1 . La source de lumière 10 est disposée à un sommet du premier cône de lumière Ω_1 . La source de lumière 10 est de préférence confondue avec le premier foyer $P_{1,1}$ de la première surface réfléchissante S_1 .
- [0060] Les termes « confondu » ou « au niveau de » sont à interpréter avec une certaine tolérance, et peuvent signifier "être situé dans le voisinage de", le voisinage correspondant à une zone s'étendant à une faible distance d'un point. Par faible distance, il est entendu une distance inférieure à 1 mm, voire inférieure à 0,5 mm.
- [0061] Sur la configuration représentée sur la [Fig.2A], la première surface réfléchissante ellipsoïdale S_1 est configurée pour réfléchir le premier cône de lumière Ω_1 pour former un deuxième cône de lumière Ω_2 , s'étendant autour d'un deuxième axe Δ_2 . Le deuxième cône de lumière converge vers le deuxième foyer $P_{2,1}$ de la première surface réfléchissante S_1 , ce dernier étant situé au niveau du miroir plan S_2 , qui forme la deuxième surface réfléchissante.
- [0062] Le capteur comporte une troisième surface réfléchissante ellipsoïdale S_3 , dont le premier foyer $P_{1,3}$ s'étend au niveau de la deuxième surface réfléchissante S_2 . La deuxième surface réfléchissante S_2 est configurée pour réfléchir le deuxième cône de lumière Ω_2 pour former un troisième cône de lumière Ω_3 , s'étendant autour d'un troisième axe Δ_3 . Le troisième cône de lumière Ω_3 diverge jusqu'à la troisième surface réfléchissante ellipsoïdale S_3 .
- [0063] La troisième surface réfléchissante ellipsoïdale S_3 est configurée pour réfléchir le troisième cône de lumière Ω_3 pour former un quatrième cône de lumière Ω_4 , s'étendant

autour d'un quatrième axe Δ_4 . Le quatrième cône de lumière Ω_4 converge vers le photodétecteur de mesure 20, ce dernier étant situé au niveau du deuxième foyer $P_{2,3}$ de la troisième réfléchissante S_3 .

[0064] Ainsi, l'onde lumineuse 11 émise par la source de lumière 10 se propage entre les différentes surfaces réfléchissantes $S_1 \dots S_N$, alternativement ellipsoïdales et plane, avant d'atteindre le photodétecteur de mesure. Dans cet exemple, $N = 3$. N peut être égal à 5, ou à un autre entier impair supérieur ou égal à 3. Entre la source de lumière 10 et le photodétecteur de mesure 20, l'onde lumineuse émise par la source de lumière subit N réflexions successives, c'est-à-dire autant de réflexions que de surfaces réfléchissantes s'étendant entre la source de lumière 10 et le photodétecteur de mesure 20. Cela permet de minimiser les pertes de signal lors de chaque réflexion. Entre deux surfaces réfléchissantes de rang successifs $n, n+1$, l'onde lumineuse 11 ne subit pas de réflexion par une autre surface réfléchissante. Les surfaces réfléchissantes de rang impair sont ellipsoïdales. La surface réfléchissante de rang 2 est un miroir plan disposé sur le circuit imprimé 7.

[0065] La [Fig.2B] montre une configuration selon laquelle le capteur 1 comporte un photodétecteur de référence 20_{ref} , ce dernier étant disposé sur le même circuit imprimé 7 que la source de lumière 10 et que le photodétecteur de mesure 20. Le capteur comporte une surface ellipsoïdale réfléchissante de référence S_{ref} , opposée au photodétecteur de référence 20_{ref} . La surface réfléchissante de référence S_{ref} comporte un premier foyer P_{1-ref} et un deuxième foyer P_{2-ref} , les foyers étant distincts l'un de l'autre. Le premier foyer P_{1-ref} de la surface réfléchissante de référence S_{ref} est situé sur la surface réfléchissante S_2 . Le deuxième foyer P_{2-ref} de la surface réfléchissante de référence S_{ref} est situé au niveau du photodétecteur de référence 20_{ref} . A l'instar des surfaces réfléchissantes de rang impair, la surface réfléchissante de référence S_{ref} est de préférence portée par la paroi opposée à celle portant la source de lumière, le photodétecteur de mesure 20 et le photodétecteur de référence 20_{ref} . Sur la [Fig.2B], on a délimité, par des tirets mixtes, les cônes de référence $\Omega_{ref,1}$ et $\Omega_{ref,2}$ respectivement incident à la surface réfléchissante de référence S_{ref} et réfléchi par cette dernière.

[0066] Sur la figure 3A, on a représenté une configuration selon laquelle le nombre N de surfaces réfléchissantes est égal à 5. Sur la [Fig.3B], on a représenté une configuration avec 5 surfaces réfléchissantes, et une surface réfléchissante de référence qui dirige un cône de lumière de référence vers le photodétecteur de référence 20_{ref} . Sur la [Fig.3B], on a délimité, par des tirets mixtes, les cônes de référence $\Omega_{ref,1}$ et $\Omega_{ref,2}$ respectivement incident à la surface réfléchissante de référence S_{ref} et réfléchi par cette dernière.

[0067] L'aptitude d'une simple couche mince, déposée sur un circuit imprimé, à réfléchir une onde lumineuse a été vérifiée expérimentalement. La [Fig.4] représente le dispositif expérimental mis en œuvre.

- [0068] Une source de lumière L émet une lumière, de type filament, collimatée par une première lentille L1, vers une surface réfléchissante plane S. La lumière réfléchi par la couche mince est focalisée par une deuxième lentille L2 vers un photodétecteur D, de type thermopile. La surface réfléchissante était soit un miroir soit une couche d'or, déposée sur un PCB, sur une couche d'accroche de nickel de 5 μm . On a utilisé deux cartes PCB différentes : sur une première carte PCB1, l'épaisseur de la couche d'or était égale à 66 nm. Sur une deuxième couche d'accroche, l'épaisseur était de 744 nm. La lumière collectée par le détecteur a permis d'estimer la réflectivité de la surface réfléchissante, la réflectivité correspondant au pourcentage de lumière émise par la source de lumière et collectée par le photodétecteur D. L'angle θ représenté sur la [Fig.4] était de 30° . Les distances d1 et d2 étaient respectivement de 33.5 mm et 52.9 mm.
- [0069] On a mis en œuvre deux PCB, dont les qualités de finition étaient différentes. La carte PCB1 présentait un état de surface grossier, traité de manière standard par une finition électrochimique. La deuxième carte PCB présentait un état de surface plus lisse, suite à une finition électrolytique.
- [0070] Sur le PCB1, on a formé quatre miroirs identiques plans, référencés M1 à M4. Il en est de même du PCB2, sur lequel on a formé quatre miroirs identiques plans M6 à M10.
- [0071] Le tableau ci-dessous montre les réflectivités respectivement déterminées pour chaque miroir plan.
- [0072] [Tableaux1]

Référence	Type de miroir	Réflectivité
PCB1	M1	41
	M2	42
	M3	39
	M4	38
PCB2	M6	62
	M7	50
	M8	64
	M9	49
	M10	46
Miroir de référence		97

- [0073] La dernière ligne du tableau correspond à un miroir de référence, considéré comme parfait.
- [0074] On observe que l'amélioration de l'état de surface du PCB permet d'améliorer significativement la réflectivité.
- [0075] L'invention pourra être appliquée pour la détection de gaz dans la surveillance de l'environnement, ou dans des applications de contrôle de gaz industriels, notamment dans l'agroalimentaire, l'industrie pétrolière, ou la distribution de gaz.

Revendications

[Revendication 1]

Capteur (1) de gaz comportant une enceinte (2), configurée pour recevoir un gaz (G), le capteur comportant également :

- une source de lumière (10), configurée pour émettre une onde lumineuse (11) se propageant dans l'enceinte en formant, à partir de la source de lumière, un premier cône de lumière (Ω_1);
- un photodétecteur de mesure (20) configuré pour détecter une onde lumineuse (14) émise par la source de lumière (10) et s'étant propagée à travers l'enceinte;
- la source de lumière et le photodétecteur de mesure étant supportés par un circuit imprimé (7);
 - une surface réfléchissante de rang 1, formant une partie d'une ellipsoïde de révolution, présentant un premier foyer (P1-1) et un deuxième foyer (P1-2), la surface réfléchissante de rang 1 étant disposée face à la source de lumière (10), de façon à réfléchir le premier cône de lumière vers le deuxième foyer, la première surface réfléchissante formant une partie d'une ellipsoïde de révolution ;
 - le dispositif étant caractérisé en ce que :
 - le circuit imprimé comporte un miroir plan, formant une surface réfléchissante de rang 2, le deuxième foyer de la surface réfléchissante de rang 1 étant situé sur le miroir plan ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier;
 - le dispositif comporte une dernière surface réfléchissante (S_N) de rang N , N , étant supérieur ou égal à 3, la dernière surface réfléchissante comportant un premier foyer (P1- N), situé au niveau d'un miroir plan, disposé sur le circuit imprimé, le miroir plan formant une surface réfléchissante de rang N -1, la dernière surface réfléchissante comportant un deuxième foyer (P2- N) ;

de telle sorte que l'onde lumineuse (11) émise par la source de lumière est successivement réfléchi par les N surfaces réfléchissantes, selon leurs rangs respectifs, avant de converger vers le deuxième foyer (P2- N) de la dernière surface réfléchissante (S_N), en formant un dernier cône de lumière (Ω_N), le photodétecteur de mesure étant disposé de manière à s'étendre dans le dernier cône de lumière.

[Revendication 2] Capteur selon la revendication 1, dans lequel la source de lumière (10) est disposée au niveau du premier foyer (P1-1) de la surface réfléchissante de rang 1 (S_1), ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.

[Revendication 3] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le photodétecteur de mesure (20) est disposé au niveau du deuxième foyer (P2- N) de la dernière surface réfléchissante (S_N), ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.

[Revendication 4] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel :

- le dispositif comporte plusieurs surfaces réfléchissantes de rang pair, chaque surface réfléchissante de rang pair étant un miroir plan disposé sur le circuit imprimé ;
- le dispositif comporte plusieurs surfaces réfléchissantes de rang impair, chaque surface réfléchissante de rang pair formant une partie d'une ellipsoïde de révolution et s'étendant face au circuit imprimé.

[Revendication 5] Capteur selon la revendication 4, dans lequel :

- chaque surface réfléchissante de rang n est configurée pour réfléchir l'onde lumineuse qu'elle reçoit en formant un cône de lumière (Ω_{n+1}) de rang $n+1$, ce dernier s'étendant autour d'un axe de propagation (Δ_{n+1}) de rang $n+1$;
- lorsque $n < N$, l'axe de propagation (Δ_{n+1}) de rang $n+1$ s'étend entre la surface réfléchissante (S_n) de rang n jusqu'à la surface (S_{n+1}) de rang $n+1$;
- lorsque n est impair, et $n \leq N-2$, chaque surface réfléchissante (S_n) s'étend selon une partie d'une ellipsoïde de révolution, l'axe de propagation de rang $n+1$ passant par le deuxième foyer (P2- n) de la surface (S_n) de rang n , ce dernier étant confondu avec le premier foyer (P1- $n+2$) de la surface (S_{n+2})

de rang $n + 2$;

- lorsque $n = N$, l'axe de propagation (Δ_{N+1}) de rang $N+1$ s'étend entre la surface (S_N) de rang N jusqu'au photodétecteur de mesure (20) ;

de telle sorte que l'onde lumineuse émise par la source de lumière (10) subit un nombre de réflexions correspondant au nombre (N) de surfaces réfléchissantes avant d'atteindre le photodétecteur de mesure (20).

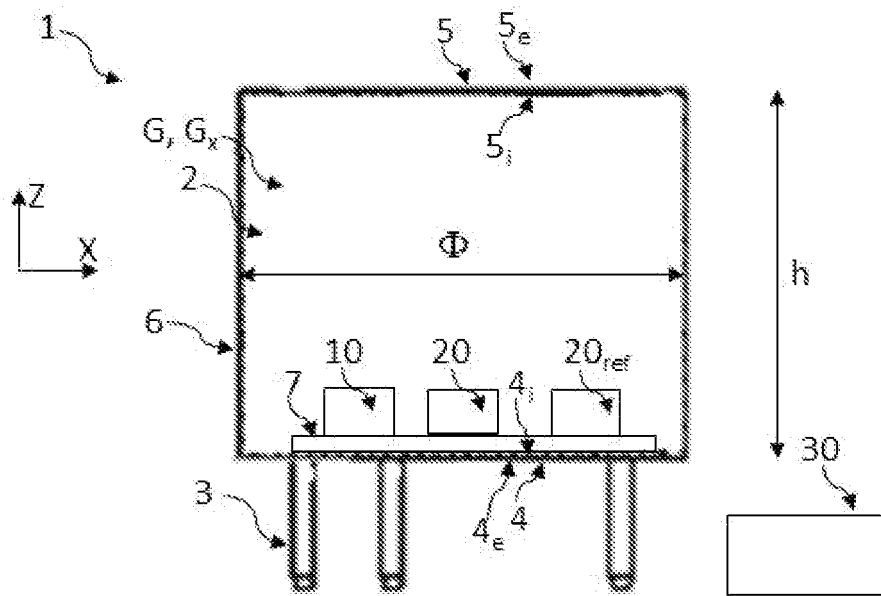
- [Revendication 6] Capteur selon la revendication 5, dans lequel lorsque $n < N$ et n est impair, chaque cône de lumière (Ω_{n+1}) de rang $n+1$ converge vers le deuxième foyer (P_{2-n}) de la surface (S_n) de rang n à partir de laquelle il se propage.
- [Revendication 7] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les surfaces réfléchissantes de rang impair sont ménagées sur une face interne (S_i) d'une même paroi (5), formant un capot du capteur.
- [Revendication 8] Capteur selon la revendication 7, dans lequel l'enceinte (2) est formée par l'assemblage du capot (5) du capteur en dessus d'un socle (4), le circuit imprimé (7) étant disposé sur le socle.
- [Revendication 9] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le ou chaque miroir plan est formé par une couche mince d'un matériau réfléchissant déposée sur le circuit imprimé.
- [Revendication 10] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le nombre (N) de surfaces réfléchissantes s'étendant entre la source de lumière (10) et le photodétecteur de mesure (20) est impair.
- [Revendication 11] Capteur selon la revendication 10, dans lequel le nombre de surfaces réfléchissantes s'étendant entre la source de lumière et le photodétecteur de mesure est égal à 3 ou à 5.
- [Revendication 12] Capteur selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant un photodétecteur de référence (20_{ref}), configuré pour détecter une onde lumineuse considérée comme non atténuée par le gaz (G).
- [Revendication 13] Capteur selon la revendication 12, comportant une surface réfléchissante de référence (S_{ref}), formant une ellipsoïde de révolution, la surface de référence comportant :
- un premier foyer (P_{1-ref}) disposé au niveau d'une surface réfléchissante plane, de rang pair, ou à une distance inférieure à 1 mm de cette dernière ;

- un deuxième foyer, (P2 – ref) disposé au niveau du photodétecteur de référence, ou à une distance inférieure à 1 mm de ce dernier.

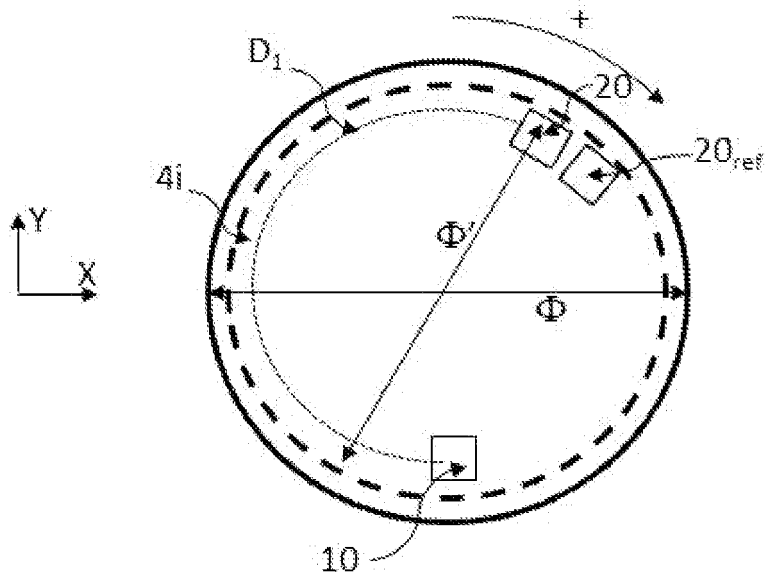
- [Revendication 14] Procédé d'analyse d'un gaz (G) à l'aide d'un capteur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, le procédé comportant les étapes suivantes :
- a. introduction du gaz dans l'enceinte (2) du capteur (1);
 - b. illumination du gaz à l'aide de la source de lumière (10) ;
 - c. mesure d'une intensité lumineuse d'une onde lumineuse, émise par la source de lumière, et s'étant propagée à travers l'enceinte (2) par le photodétecteur de mesure (20) ;
 - d. détermination d'une quantité d'une espèce gazeuse dans le gaz (G_x), à partir de l'intensité lumineuse mesurée.

- [Revendication 15] Procédé selon la revendication 14, dans laquelle l'étape d) est mise en œuvre par une unité de traitement (30) à partir d'un signal généré par le photodétecteur de mesure (20).

[Fig. 1A]

**Fig. 1A**

[Fig. 1B]

**Fig. 1B**

[Fig. 2A]

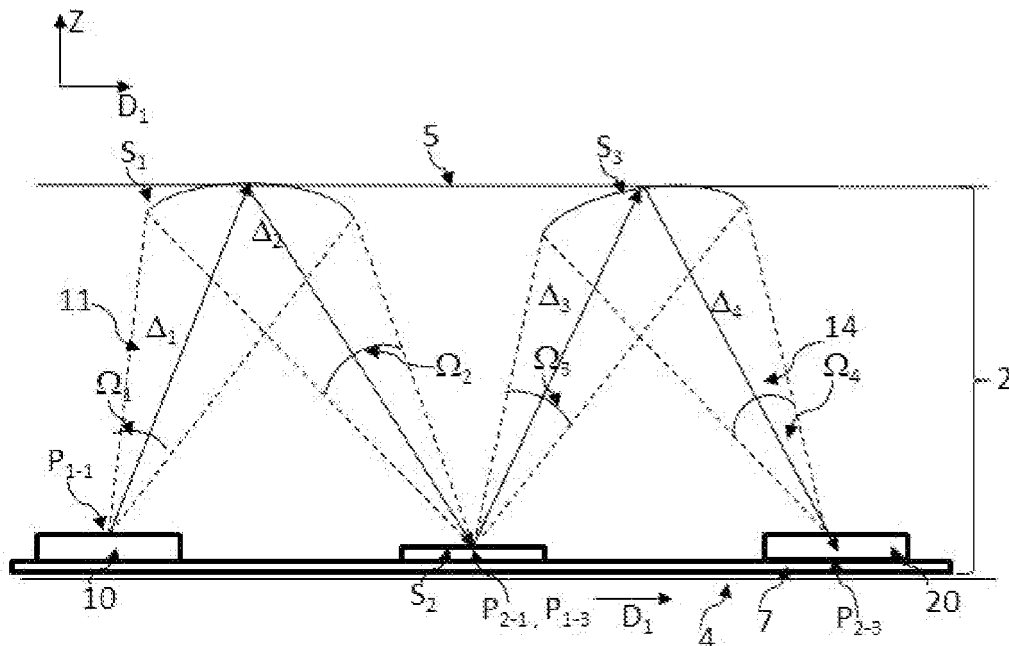


Fig. 2A

[Fig. 2B]

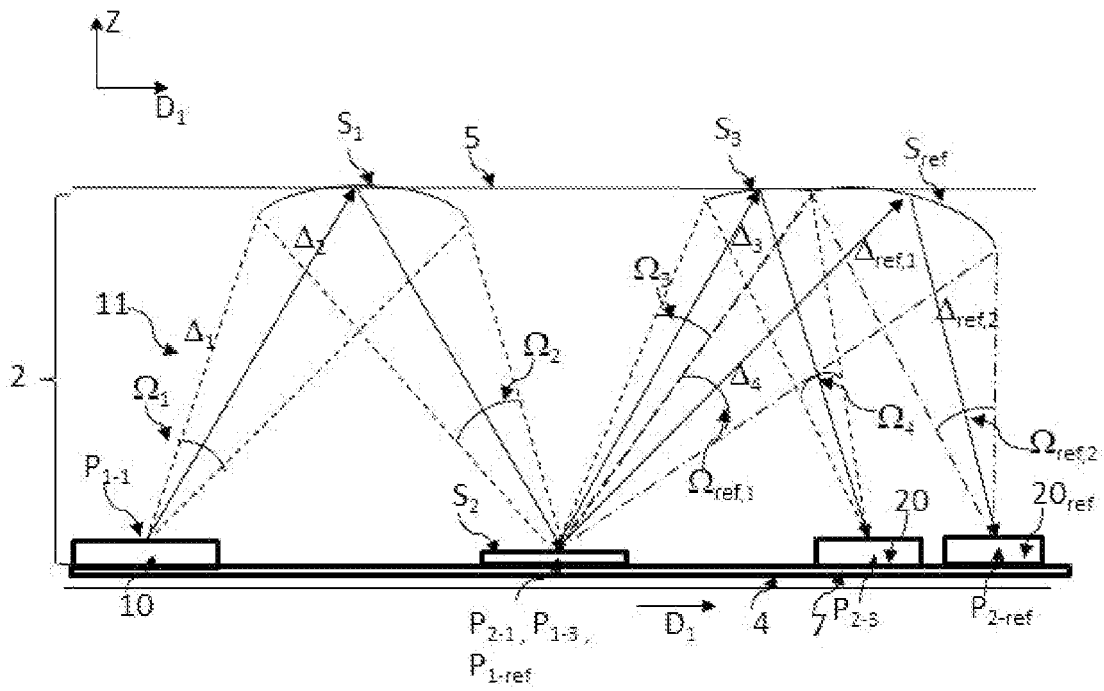


Fig. 2B

[Fig. 3A]

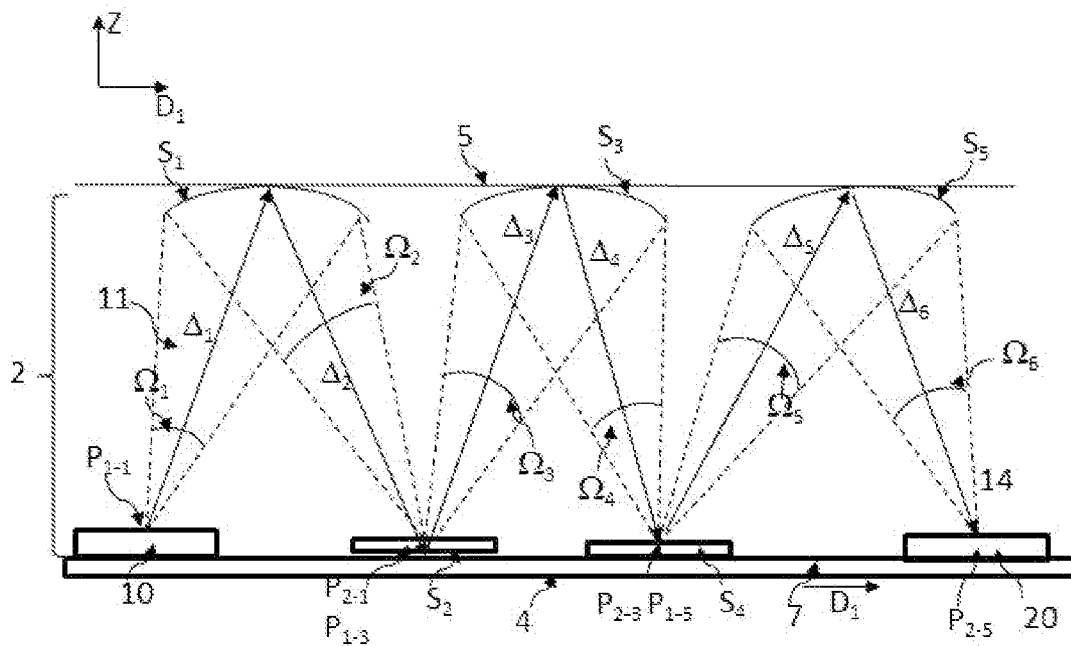


Fig. 3A

[Fig. 3B]

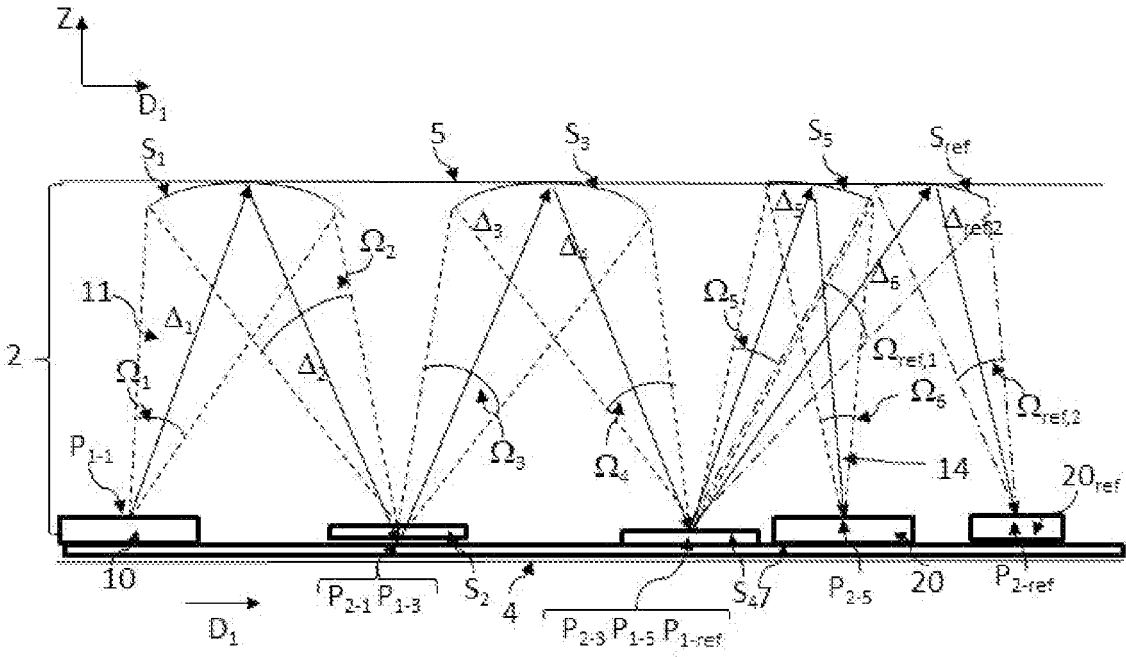
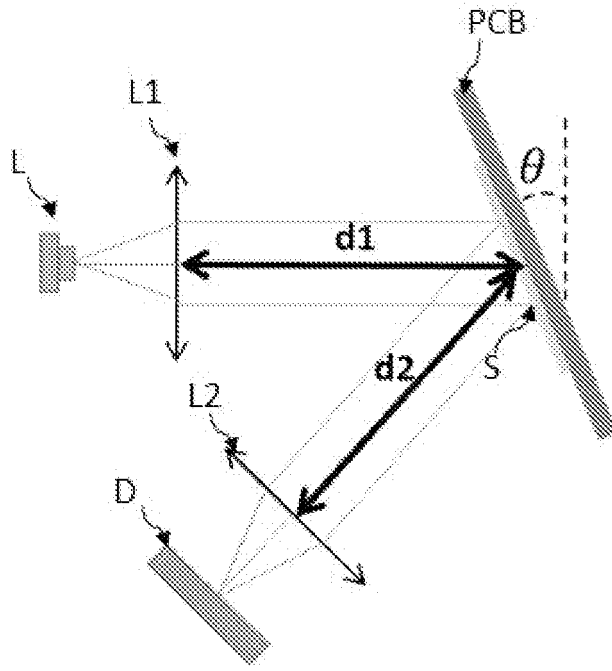


Fig. 3B

[Fig. 4]

Fig. 4

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

NEANT

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

US 2022/128449 A1 (FURUYA TAKAAKI [JP] ET
AL) 28 avril 2022 (2022-04-28)

FR 3 022 999 A1 (SCHNEIDER ELECTRIC IND
SAS [FR]) 1 janvier 2016 (2016-01-01)

FR 3 095 517 A1 (ELICHENS [FR])
30 octobre 2020 (2020-10-30)

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

NEANT