

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 janvier 2017 (12.01.2017)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2017/005511 A1

- (51) Classification internationale des brevets :
G01J 3/28 (2006.01) H01L 31/103 (2006.01)
H01L 27/146 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2016/064718
- (22) Date de dépôt international :
24 juin 2016 (24.06.2016)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1556480 8 juillet 2015 (08.07.2015) FR
- (71) Déposant : CENTRE NATIONAL DE LA RE-
CHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS [FR/FR]; 3 rue Mi-
chel Ange, 75794 Paris Cedex 16 (FR).
- (72) Inventeur : DUBOZ, Jean-Yves; Mas des Vignes, 585 G
Chemin de Villebruc, 06560 Valbonne (FR).
- (74) Mandataires : CAMUS, Olivier et al.; 25 rue de mau-
beuge, 75009 Paris (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, 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))

(54) Title : MULTICHANNEL SPECTROMETER EQUIPPED WITH A PHOTSENSITIVE LAYER WITH A LATERAL COMPOSITION GRADIENT

(54) Titre : SPECTROMÈTRE MULTICANAL MUNI D'UNE COUCHE PHOTOSENSIBLE À GRADIENT LATÉRAL DE COMPOSITION

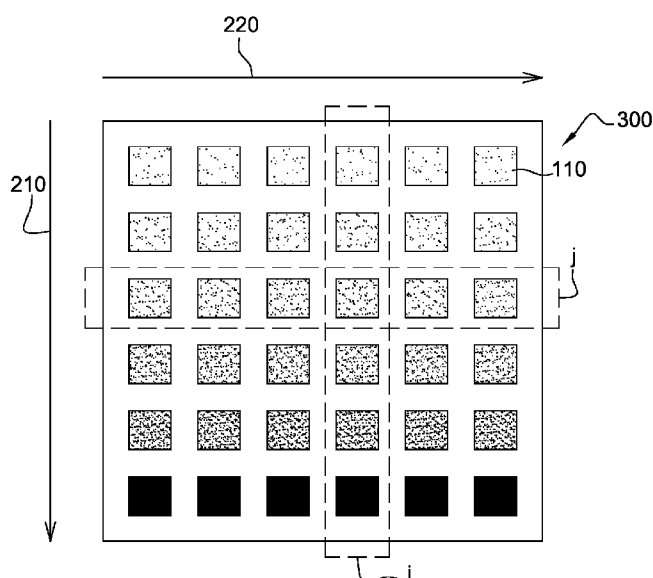


Fig. 3

(57) Abstract : The present invention relates to a spectrometer (100) comprising: a photosensitive layer made of a semiconductor alloy, which layer is divided into a plurality of photodetectors (110), the photodetectors being organised into at least one column extending in a first direction (210); and a circuit for processing the signals delivered by the photodetectors (110) in response to incident electromagnetic radiation, and wherein the semiconductor alloy of the photosensitive layer has a composition gradient in the first direction (210) so that at least some of the photodetectors (110) of said column have spectral responses to the incident electromagnetic radiation that are shifted in wavelength.

(57) Abrégé : La présente invention concerne un spectromètre (100) comprenant une couche photosensible en un alliage semi-conducteur divisée en une pluralité de photodétecteurs (110), les photodétecteurs étant organisés en au moins une colonne s'étendant dans une première direction (210) et un circuit de traitement de signaux délivrés par les photodétecteurs (110) en réponse à un rayonnement électromagnétique incident, et dans lequel l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présente un gradient de composition dans la première direction (210) de sorte qu'une partie au moins des photodétecteurs (110) de ladite colonne aient des réponses spectrales au rayonnement électromagnétique incident décalées en longueur d'onde.

WO 2017/005511 A1

SPECTROMÈTRE MULTICANAL MUNI D'UNE COUCHE PHOTSENSIBLE À GRADIENT LATÉRAL DE COMPOSITION

5 **DOMAINE TECHNIQUE**

La présente invention est relative à un spectromètre multicanal, c'est-à-dire un spectromètre permettant de détecter simultanément plusieurs composantes spectrales d'un rayonnement électromagnétique. Plus particulièrement, l'invention
10 concerne un spectromètre comprenant une pluralité de photodétecteurs, en forme de barrette ou de matrice, et dépourvu d'élément dispersif.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE

15

Une technique classique pour analyser le spectre d'un rayonnement électromagnétique consiste à disperser (ou « étaler ») le rayonnement électromagnétique à l'aide d'un élément dispersif, afin de séparer les différentes composantes du spectre, puis à mesurer l'intensité de chaque composante à l'aide
20 d'un détecteur optique. Par exemple, un prisme ou un réseau de diffraction optique peut être utilisé pour disperser la lumière visible.

La détection des composantes spectrales peut être réalisée de façon séquentielle. Une fente isole une composante quasi-monochromatique du spectre dispersé et un
25 photodétecteur unique mesure l'intensité de cette composante. La rotation de l'élément dispersif permet au photodétecteur de recueillir successivement toutes les composantes du spectre. L'inconvénient de cette technique est qu'il faut beaucoup de temps pour mesurer l'ensemble du spectre du rayonnement électromagnétique.

30 Les matrices de photodétecteurs ont permis de réduire drastiquement le temps de mesure d'un spectre électromagnétique. Le rayonnement incident, polychromatique, est toujours dispersé par un élément dispersif mais les faisceaux monochromatiques, issus de l'élément dispersif, sont tous transmis vers la matrice de photodétecteurs. Il

n'est donc plus fait usage de la fente et du mécanisme de rotation de l'élément dispersif pour sélectionner un par un les faisceaux. Les photodétecteurs de la matrice sont positionnés de sorte que chaque photodétecteur capte un seul faisceau monochromatique. Ainsi, à chaque photodétecteur correspond un angle d'incidence du faisceau reçu par le photodétecteur, et donc une longueur d'onde (l'angle d'incidence varie de façon monotone avec la longueur d'onde). On peut alors détecter simultanément toutes les longueurs d'onde correspondant à la gamme d'angles disponibles. Plus la matrice de photodétecteurs est étendue, plus la bande des longueurs d'onde détectées est large.

Des spectromètres dépourvus d'élément dispersif ont été développés afin d'en réduire l'encombrement et le poids. Ces spectromètres comprennent également une matrice de photodétecteurs, au-dessus de laquelle est disposé un ensemble de filtres. Chaque photodétecteur est ainsi équipé d'un filtre, afin de capter une partie seulement du spectre. Les filtres ont des fréquences de coupure différentes, de sorte que les photodétecteurs puissent détecter différentes bandes spectrales.

Le document US5166755 décrit un exemple de spectromètre à filtres, dans lequel les filtres sont de type passe-bande, passe-haut ou passe-bas. Un circuit de traitement associé à la matrice de photodétecteurs calcule l'intensité d'une composante spectrale en réalisant une soustraction des signaux issus de deux photodétecteurs adjacents. On répète ensuite l'opération pour chaque paire de photodétecteurs adjacents afin de déterminer l'ensemble du spectre.

Les filtres sont par exemple de type interférentiel. Ils sont constitués d'une alternance de couches diélectriques et métalliques déposées sur la matrice de photodétecteurs et dont les épaisseurs varient selon leur position au sein de la matrice. Leur fabrication est complexe, car chaque filtre a une géométrie particulière, et requiert un grand nombre d'étapes technologiques. Les spectromètres munis de filtres ont donc un coût de fabrication important.

RÉSUMÉ DE L'INVENTION

Il existe donc un besoin de prévoir un spectromètre compact et léger à moindre coût.

5 Selon l'invention, on tend à satisfaire ce besoin en prévoyant un spectromètre comprenant :

- une couche photosensible en un alliage semi-conducteur divisée en une pluralité de photodétecteurs, les photodétecteurs étant organisés en au moins une colonne s'étendant dans une première direction ; et

10 - un circuit de traitement de signaux délivrés par les photodétecteurs en réponse à un rayonnement électromagnétique incident ;

caractérisé en ce que l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présente un gradient de composition dans la première direction de sorte qu'une partie au moins des photodétecteurs de ladite colonne aient des réponses spectrales au rayonnement électromagnétique incident décalées en longueur d'onde.

Plutôt que d'utiliser des filtres qui « sélectionnent » des plages restreintes de longueurs d'onde, et donc d'exposer les photodétecteurs sous-jacents à une partie seulement du rayonnement électromagnétique incident, l'invention propose d'agir directement sur la sensibilité des photodétecteurs pour que leur détection soit limitée à ces mêmes plages de longueurs d'onde. Autrement dit, les photodétecteurs du spectromètre selon l'invention sont exposés simultanément à l'ensemble du rayonnement électromagnétique et remplissent eux-mêmes cette fonction de sélection.

25

Les photodétecteurs appartenant à une même colonne ont des réponses spectrales décalées en longueur d'onde grâce au fait que la composition de l'alliage semi-conducteur formant les photodétecteurs varie d'un pixel à l'autre de la colonne. En effet, en faisant varier la composition de l'alliage semi-conducteur, c'est-à-dire en modifiant la répartition entre au moins deux des constituants de l'alliage, on modifie la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Les photodétecteurs de la colonne n'ont donc pas tous le même seuil de détection, i.e. le seuil (en énergie ou en longueur d'onde) à partir duquel les photons du rayonnement électromagnétique sont

30

absorbés par le matériau.

Grâce à cette colonne de photodétecteurs non-uniforme, on parvient à mesurer les différentes composantes spectrales du rayonnement électromagnétique incident en s'affranchissant des filtres. La fabrication du spectromètre selon l'invention est simplifiée, et par conséquent, moins coûteuse.

Avantageusement, l'alliage semi-conducteur est un matériau semi-conducteur à bande interdite directe, de préférence un alliage ternaire III-V ou II-VI. Un matériau III-V (respectivement II-VI) est un alliage d'un ou plusieurs éléments de la colonne III (respectivement II) du tableau de Mendeleïev avec un ou plusieurs éléments de la colonne V (respectivement VI) du tableau de Mendeleïev. Cet alliage est dit ternaire lorsqu'il comprend deux éléments en compétition appartenant à une même colonne (par exemple l'indium (In) et le gallium (Ga) - colonne III) et un troisième élément de l'autre colonne (par exemple l'azote (N) - colonne V).

De préférence, la composition de l'alliage semi-conducteur varie de façon monotone d'une extrémité à l'autre de la colonne de photodétecteurs.

Dans un mode de réalisation du spectromètre selon l'invention, les photodétecteurs sont organisés en une matrice comprenant plusieurs colonnes s'étendant dans la première direction et plusieurs rangées s'étendant dans une deuxième direction, l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présentant un gradient de composition dans la première direction pour chaque colonne de photodétecteurs et une composition constante dans la deuxième direction pour chaque rangée de photodétecteurs.

Dans une variante de réalisation, les photodétecteurs sont organisés en une matrice comprenant plusieurs colonnes s'étendant dans la première direction et plusieurs rangées s'étendant dans une deuxième direction, l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présentant un gradient de composition dans la première direction pour chaque colonne de photodétecteurs et un gradient de composition dans la deuxième direction pour chaque rangée de photodétecteurs.

Le circuit de traitement est avantageusement configuré pour calculer une différence de signaux entre deux photodétecteurs consécutifs de chaque colonne, ce qui permet de déterminer l'intensité de chaque composante du spectre électromagnétique.

5

De préférence, le circuit de traitement est configuré pour mesurer l'intensité de plusieurs composantes spectrales du rayonnement électromagnétique incident.

BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

10

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- 15 - la figure 1 représente un premier mode de réalisation d'un spectromètre multicanal selon l'invention ;
- la figure 2 montre les réponses spectrales des photodétecteurs appartenant au spectromètre multicanal de la figure 1 ;
- la figure 3 représente un deuxième mode de réalisation de spectromètre multicanal selon l'invention ;
- 20 - la figure 4 représente schématiquement une première méthode d'obtention d'une couche photosensible à gradient latéral de composition ; et
- la figure 5 représente schématiquement une deuxième méthode d'obtention d'une couche photosensible à gradient latéral de composition.

25

Pour plus de clarté, les éléments identiques ou similaires sont repérés par des signes de références identiques sur l'ensemble des figures.

30 DESCRIPTION DÉTAILLÉE D'AU MOINS UN MODE DE RÉALISATION

Dans la description qui suit, on appelle « barrette » une colonne ou rangée de pixels et « matrice » un agencement défini par plusieurs colonnes et plusieurs rangées de

pixels. Chaque pixel constitue un photodétecteur unitaire, ou élément photosensible, capable de mesurer une bande plus ou moins étendue du spectre d'un rayonnement électromagnétique incident. On pourra donc parler indifféremment de barrette/matrice de pixels ou de barrette/matrice de photodétecteurs.

5

La figure 1 représente un premier mode de réalisation de spectromètre multicanal 100, dans lequel les différents photodétecteurs 110 sont organisés en forme de barrette. La barrette 100 de photodétecteurs 110 s'étend ici dans une direction 210 verticale, c'est-à-dire dans la direction des colonnes.

10

La barrette 100 comprend un nombre M de photodétecteurs 110 (dans l'exemple représenté, $M = 6$). Le photodétecteur de rang n est noté « 110_n », n étant un nombre entier positif variant de 1 à M. Le photodétecteur de rang n+1, c'est-à-dire le photodétecteur qui suit le photodétecteur de rang n dans la direction 210, porte la

15 référence « 110_{n+1} ».

Les photodétecteurs 110 de la barrette 100 sont formés à partir d'un substrat sur lequel est déposée une couche photosensible en un alliage semi-conducteur. La couche photosensible constitue la couche active des photodétecteurs 110, où se produit

20 l'absorption des photons.

L'alliage semi-conducteur de la couche photosensible comprend au moins deux matériaux semi-conducteurs dont la répartition est susceptible de varier. La couche photosensible est divisée en plusieurs portions, de préférence en y gravant des

25 tranchées 130. Chaque portion ainsi obtenue constitue la zone d'absorption des photons d'un photodétecteur 110. Les tranchées 130 sont remplies de matériau diélectrique, afin d'isoler électriquement les photodétecteurs 110 les uns des autres.

Les photodétecteurs 110 sont, de préférence, constitués de diodes PN, de diodes Schottky (Métal/Semi-conducteur) ou de diodes MSM (Métal/Semi-conducteur/Métal).

30

L'alliage semi-conducteur de la couche photosensible est de préférence un matériau à bande interdite directe, comme la plupart des matériaux semi-conducteurs III-V ou

II-VI. Dans ce type de matériau semi-conducteur, un photon est absorbé dès que son énergie est supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite du matériau. Par conséquent, un photodétecteur dont la couche active est constituée d'un tel matériau peut uniquement capter des photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite, soit des rayonnements ayant une longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde, dite de coupure, correspondant à la bande interdite du matériau semi-conducteur (à chaque énergie E correspond une longueur d'onde λ , d'après la relation $E = \frac{hc}{\lambda}$).

La composition de l'alliage semi-conducteur au sein de la barrette 100 varie de sorte qu'une partie au moins des photodétecteurs 110 aient des longueurs d'onde de coupure différentes. Lorsqu'il est choisi dans la famille des matériaux III-V et II-VI, l'alliage semi-conducteur est avantageusement un alliage ternaire comportant deux éléments d'une même colonne de la classification périodique. Ces deux éléments, en compétition l'un avec l'autre, permettent de faire varier la composition de l'alliage semi-conducteur en jouant sur leur répartition. Selon le domaine de longueurs d'onde que l'on souhaite détecter, c'est-à-dire selon la nature du rayonnement électromagnétique incident (par exemple ultraviolet, visible, proche infrarouge, infrarouge lointain...), l'alliage ternaire pourra être choisi parmi $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$, $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ (certains des alliages cités ont des bandes interdites indirectes pour certaines compositions)...

La figure 2 représente la réponse spectrale R des photodétecteurs 110 de la barrette 100 en fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement incident. La réponse spectrale d'un photodétecteur est définie comme le rapport du courant électrique en sortie du photodétecteur (en A.cm^{-2}) sur la puissance du rayonnement électromagnétique en entrée (en W.cm^{-2}), à une longueur d'onde λ donnée. Elle s'exprime donc habituellement en ampère par A.W^{-1} . Sur la figure 2, les réponses spectrales des photodétecteurs 110 ont été normalisées et sont donc exprimées en valeur relative.

Comme expliqué précédemment, les photodétecteurs 110 ont tous un comportement de type passe-bas en longueur d'onde : la réponse spectrale $R(\lambda)$ de chaque

photodétecteur 110 est maximale ($R=1$) pour les longueurs d'onde λ inférieures à la longueur d'onde de coupure λ_G . Pour des longueurs d'onde supérieures à la longueur d'onde de coupure λ_G , la réponse spectrale $R(\lambda)$ des photodétecteurs 110 décroît brusquement. Par exemple, pour une couche photosensible en $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, l'intensité du courant électrique en sortie des photodétecteurs 110 est divisée par 10 tous les 8 nm de longueur d'onde après la longueur d'onde de coupure λ_G .

Comme cela est illustré sur la figure 2, les photodétecteurs 110 de la barrette 100 ont de préférence des longueurs d'onde de coupure toutes différentes. La longueur d'onde de coupure des photodétecteurs varie en outre de façon monotone d'une extrémité à l'autre de la barrette 100. Par exemple, le photodétecteur 110_n (de rang n) a une longueur d'onde de coupure λ_{Gn} inférieure à la longueur d'onde de coupure λ_{Gn+1} du photodétecteur 110_{n+1} (de rang n+1), quelle que soit la valeur de n.

En dehors de la longueur d'onde de coupure λ_G , les réponses spectrales $R(\lambda)$ sont, de préférence, sensiblement identiques d'un photodétecteur à l'autre. Elles sont donc simplement décalées les unes des autres en abscisse, selon l'axe des longueurs d'onde λ (figure 2).

L'extraction des différentes bandes spectrales du rayonnement électromagnétique incident s'effectue au moyen d'un circuit de traitement, qui soustrait les signaux des photodétecteurs de la colonne, par groupe de deux pixels consécutifs ayant un gradient de composition.

Le courant électrique du photodétecteur de rang n pour un rayonnement de flux ϕ en fonction de longueur d'onde λ est donné par la relation suivante :

$$I_n = \int_0^{\infty} R_n(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda$$

où $R_n(\lambda)$ est la réponse spectrale du photodétecteur de rang n.

De la même façon, le courant électrique du photodétecteur de rang n+1 s'écrit :

$$I_{n+1} = \int_0^{\infty} R_{n+1}(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda$$

où $R_{n+1}(\lambda)$ est la réponse spectrale du photodétecteur de rang $n+1$.

La différence entre les courants de deux pixels consécutifs vaut donc :

$$\Delta I_n = I_{n+1} - I_n = \int_0^{\infty} (R_{n+1}(\lambda) - R_n(\lambda)) \phi(\lambda) d\lambda$$

Sachant, comme décrit ci-dessus en relation avec la figure 2, que les réponses spectrales de deux pixels consécutifs sont juste décalées en longueur d'onde d'un écart $\Delta\lambda$, tel que $R_{n+1}(\lambda) = R_n(\lambda + \Delta\lambda)$, l'équation précédente devient :

$$\Delta I_n = \int_0^{\infty} (R_n(\lambda + \Delta\lambda) - R_n(\lambda)) \phi(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{\partial R_n(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot \phi(\lambda) d\lambda$$

En première approximation, la réponse spectrale $R_n(\lambda)$ du photodétecteur 110_n peut être assimilée à une fonction de Heaviside $H(\lambda)$, c'est-à-dire une fonction telle que $H = 1$ pour $\lambda \leq \lambda_{Gn}$ et $H = 0$ pour $\lambda > \lambda_{Gn}$, λ_{Gn} étant la longueur d'onde de coupure du photodétecteur de rang n . La dérivée de la fonction de Heaviside $H(\lambda)$ est une impulsion de Dirac $\delta(\lambda)$ centrée sur la longueur d'onde de coupure λ_{Gn} . On obtient alors :

$$\Delta I_n = \int_0^{\infty} \delta(\lambda_{Gn}) \cdot \Delta\lambda \cdot \phi(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \cdot \phi(\lambda_{Gn})$$

où $\phi(\lambda_{Gn})$ est le flux reçu par le pixel n à la longueur d'onde de coupure λ_{Gn} .

20

Avec cette approximation, le circuit de traitement calcule donc une valeur moyenne du flux reçu par le pixel n dans une plage de longueur d'onde comprise entre λ_{Gn} et λ_{Gn+1} , c'est-à-dire sur une plage de largeur $\Delta\lambda$. L'écart $\Delta\lambda$ définit également la résolution spectrale du spectromètre. Il dépend du gradient de composition de l'alliage semi-conducteur dans la direction verticale 210 et de l'écart entre deux pixels consécutifs de la barrette 100. Ainsi, pour un même gradient de composition, plus le nombre de

25

pixels dans la barrette 100 est grand, plus le paramètre de résolution $\Delta\lambda$ est faible (et donc plus le pouvoir de séparation du spectromètre est fort).

Plutôt qu'une fonction de Heaviside, on peut considérer une réponse spectrale $R_n(\lambda)$ ayant une coupure moins abrupte, par exemple une fonction caractérisée par une décroissance exponentielle pour les longueurs d'onde supérieures à la longueur d'onde de coupure telle que :

$$R_n(\lambda) = 1 \text{ pour } \lambda \leq \lambda_{Gn} ;$$

$$R_n(\lambda) = \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_{Gn}}{\beta}\right) \text{ pour } \lambda_{Gn} < \lambda \leq \lambda_{Gn} + 2\beta ; \text{ et}$$

$$R_n(\lambda) \approx 0 \text{ pour } \lambda > \lambda_{Gn} + 2\beta ;$$

où 2β désigne la largeur de coupure ($R_n(2\beta) = 1/e^2$) et vaut typiquement quelques nanomètres (pour l'AlGaIn, $2\beta=8$ nm).

Dans ce cas, la différence des signaux entre deux pixels consécutifs vaut :

$$\begin{aligned} \Delta I_n &= \int_0^\infty \frac{\partial R_n(\lambda)}{\partial \lambda} \cdot \Delta\lambda \cdot \phi(\lambda) d\lambda \\ &= \frac{\Delta\lambda}{\beta} \int_{\lambda_{Gn}}^{\lambda_{Gn}+2\beta} \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_{Gn}}{\beta}\right) \phi(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

On voit alors que le circuit de traitement intègre le flux lumineux sur une bande spectrale allant de λ_{Gn} à $\lambda_{Gn} + 2\beta$. Par conséquent, il est inutile de choisir un paramètre de résolution $\Delta\lambda$ inférieur à 2β , car la différence des signaux intègre le flux sur une largeur égale à 2β , même si $\Delta\lambda$ est plus petit. Dans ce cas, ce n'est pas $\Delta\lambda$ qui limite la résolution mais 2β . Au mieux, le paramètre de résolution spectrale $\Delta\lambda$ sera choisi égal à 2β . Ceci illustre l'intérêt d'avoir des matériaux avec des coupures abruptes, d'où l'utilisation préférée des semi-conducteurs à bande interdite directe.

En remplaçant le flux $\phi(\lambda)$ par sa valeur moyenne $\langle \phi(\lambda) \rangle$ sur une largeur $\Delta\lambda$

entre λ_{Gn} et $\lambda_{Gn} + 2\beta$, on obtient :

$$\Delta I_n = \frac{\Delta\lambda}{\beta} \cdot \langle \phi(\lambda) \rangle \cdot \int_{\lambda_{Gn}}^{\lambda_{Gn}+2\beta} \exp\left(-\frac{\lambda - \lambda_{Gn}}{\beta}\right) d\lambda \approx \Delta\lambda \cdot \langle \phi(\lambda) \rangle$$

Lorsque le flux est constant, on obtient donc la même valeur qu'avec la première approximation, avec la restriction que le paramètre de résolution spectrale $\Delta\lambda$ est limité à 2β (soit 8 nm dans le cas de l'AlGaIn).

En répétant ce calcul pour chaque paire de pixels consécutifs de la colonne, le circuit de traitement est capable de déterminer l'intensité de chaque bande spectrale (de largeur $\Delta\lambda$) entre les deux longueurs d'onde de coupure extrêmes de la colonne, λ_{G1} et λ_{GM} .

Avec le système $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ par exemple, il est facile d'obtenir des fréquences de coupure variant de 400 nm à 500 nm, en faisant varier la concentration x d'indium (In) de 7 % à 20 % environ. Avec le système $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, les longueurs d'onde de coupure atteignables sans rencontrer de difficultés de fabrication sont comprises entre 250 nm et 350 nm, soit une concentration x d'aluminium (Al) variant de 70 % à 0 % environ. Etant donné que le paramètre de résolution spectrale $\Delta\lambda$ est limité à 8 nm, une ou deux dizaines de pixels environ sont suffisantes pour balayer les plages de longueurs d'onde ci-dessus.

A défaut de pouvoir diminuer le paramètre de résolution spectrale $\Delta\lambda$, la barrette 100 peut contenir un plus grand nombre de pixels afin d'augmenter la qualité du signal du spectromètre. Ces pixels sont avantageusement répartis en groupe de pixels consécutifs ayant sensiblement la même longueur d'onde de coupure. La différence des courants électriques, pour l'extraction des différentes bandes spectrales, s'effectue alors non plus entre deux pixels consécutifs de la colonne, mais entre deux groupes de pixels adjacents. Elle porte sur les sommes de courants électriques des pixels appartenant à un même groupe.

A titre d'exemple, la barrette 100 peut comprendre 128 pixels ayant une superficie de

50x50 μm^2 . Elle mesure alors 6,4 mm en longueur, sans tenir compte de l'espacement entre les pixels (tranchées 130). Comme son épaisseur est du même ordre de grandeur que celle du substrat sur laquelle elle est formée, de quelques centaines de micromètres, la barrette 100 occupe un volume très réduit.

5

Dans le spectromètre multicanal de la figure 1, le rayonnement éclaire l'ensemble des pixels de la colonne. Un pixel ne reçoit donc qu'une fraction du flux lumineux total $\phi_{tot}(\lambda)$, cette fraction étant égale à $\frac{1}{M} \cdot \phi_{tot}(\lambda)$ (M est le nombre de photodétecteurs dans la barrette). Le courant produit par ce pixel est alors

10

$$\frac{1}{M} \cdot \phi_{tot}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

A l'inverse, dans un spectromètre matriciel classique doté d'un élément dispersif, l'intégralité du flux lumineux à une longueur λ arrive sur un seul photodétecteur après avoir traversé l'élément dispersif. Le courant électrique produit par ce photodétecteur

15

est proportionnel à :

$$TF \cdot \phi_{tot}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

où TF est le facteur de transmission de l'élément dispersif.

Ainsi, pour déterminer lequel des deux spectromètres a le meilleur rapport signal/bruit, le ratio $1/M$ doit être comparé au facteur de transmission TF . Le facteur de transmission d'un système dispersif peut être grand (une fraction d'unité) et donc supérieure à $1/M$ dès que M est supérieure à une dizaine environ. Le rapport signal/bruit sera donc moins bon dans le spectromètre multicanal de l'invention, à résolution spectrale comparable. Toutefois, les spectromètres matriciels avec dispersion sont généralement conçus pour des fortes résolutions et donc des pixels de petites tailles, et sont par conséquent plus coûteux à produire que le spectromètre selon l'invention.

20

25

30

Si l'on compare le spectromètre selon l'invention avec un spectromètre monocanal utilisant la dispersion et une fente, le facteur de transmission TF correspond au système dispersif et à la fente, et peut toujours être plus grand que M . L'avantage du

spectromètre de l'invention est dans ce cas de mesurer simultanément tout le spectre alors que le système dispersif monocanal le mesure séquentiellement et doit limiter son temps d'acquisition à chaque longueur d'onde.

- 5 La quantité de signal plus faible en sortie du spectromètre de l'invention peut être aisément compensée par un temps d'acquisition plus long, arrivant ainsi à des rapports signal/bruit équivalents.

10 La figure 3 représente un deuxième mode de réalisation du spectromètre multicanal permettant d'augmenter le rapport signal/bruit du spectromètre (si l'on souhaite par exemple conserver une grande rapidité de mesure). Dans ce deuxième mode de réalisation, les photodétecteurs 110 sont agencés en matrice 300. Les colonnes i de la matrice 300, ici au nombre de 6, s'étendent dans la direction verticale 210 alors que les rangées j de la matrice, également au nombre de 6, s'étendent dans la direction
15 horizontale 220.

Comme précédemment, les photodétecteurs 110 de la matrice 300 sont tous formés en découpant une couche photosensible présentant un gradient latéral de composition, ici dans la direction 210 des colonnes. Plusieurs photodétecteurs
20 appartenant à chaque colonne ont des réponses spectrales décalées en longueurs d'ondes, comme cela a été décrit précédemment, notamment en relation avec la figure 2. Par contre, dans la direction 220 des rangées, la composition de l'alliage semi-conducteur formant les photodétecteurs 110 est avantageusement constante. Ainsi, les colonnes i de la matrice 300 sont identiques entre elles.

25

Une telle configuration permet d'augmenter la qualité du signal représentant chaque bande spectrale, car la différence entre deux pixels consécutifs (ayant des longueurs d'onde de coupure différentes) peut être moyennée sur plusieurs colonnes. On améliore ainsi le rapport signal/bruit du spectromètre. Le spectromètre en forme de
30 matrice 300 présente en outre l'avantage de pouvoir être utilisé simultanément pour une analyse spectrale dans la direction 210 des colonnes et pour une analyse géométrique dans la direction 220 des rangées, autrement dit en tant qu'imageur (visible, infrarouge..., selon la nature de l'alliage semi-conducteur).

Dans un troisième mode de réalisation non représentée sur les figures, la matrice de photodétecteurs 110 présente non seulement un gradient de composition dans la direction 210, mais également un gradient de composition dans la direction 220.

5

La couche photosensible en alliage semi-conducteur peut être obtenue par des techniques d'épitaxie connues, en particulier l'épitaxie par jets moléculaires (ou MBE, pour « Molecular Beam Epitaxy » en anglais) et l'épitaxie en phase vapeur. Selon la nature du matériau épitaxié, le substrat sur lequel est déposée la couche

10 photosensible peut être en InP, GaAs, silicium ou saphir. En général, lorsqu'on fait croître une couche d'un alliage ternaire par épitaxie, lors de la fabrication d'un détecteur infrarouge par exemple, on cherche à éviter les gradients de composition. Au contraire, pour fabriquer le spectromètre selon l'invention, le réacteur d'épitaxie est configuré pour favoriser l'obtention d'un gradient de composition.

15

Les figures 4 et 5 représentent schématiquement deux configurations de réacteur d'épitaxie 400 permettant d'obtenir un gradient de composition latéral dans la couche photosensible. L'alliage ternaire formé est, dans cet exemple, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

20

Sur la figure 4, le réacteur 400 comprend trois sources 401, 402 et 403 contenant respectivement les éléments In, Ga et N. Pour que les éléments In et Ga aient des concentrations (respectivement x et $1-x$) variant latéralement dans des sens opposés sur le substrat 410, les sources 401 et 402 sont inclinées par rapport à la direction normale 420 au substrat 410, respectivement à gauche et à droite. Du fait de

25 l'inclinaison de la source 401, le flux d'indium est plus important sur la partie gauche du substrat 410 que sur sa partie droite. Inversement, la source 402 étant inclinée dans l'autre sens, le flux de gallium arrivant sur le substrat 410 est plus important sur la droite que sur la gauche du substrat 410. Il en résulte que la couche photosensible possède une concentration d'indium x plus élevée à gauche qu'à droite et inversement

30 pour la concentration de gallium $1-x$. La source d'azote 403 est avantageusement dirigée dans la direction 420, i.e. perpendiculairement au substrat 410.

Dans la configuration de la figure 5, les trois sources sont regroupées autour de la

direction normale 420, de sorte que les flux soient sensiblement perpendiculaires au substrat 410. Dans ce cas, le gradient de composition provient non pas des différences de flux, mais du fait que le substrat est soumis à un gradient de température, par exemple au moyen d'un porte-substrat chauffant. En effet, certains éléments ne s'incorporent pas avec la même efficacité suivant la température. Par exemple, l'indium (In) s'incorpore moins vite lorsque la température est élevée.

Ainsi, si le substrat 410 présente une augmentation latérale de température 430, de la gauche vers la droite dans l'exemple de la figure 5, la partie droite du substrat 410 est moins riche en indium que sa partie gauche (et, par voie de conséquence, la partie droite du substrat est plus riche en gallium que sa partie gauche).

Dans l'une ou l'autre de ces configurations, le substrat 410 peut être immobile ou entraîné en rotation pendant la croissance, selon qu'on souhaite un gradient de composition dans une seule direction (cas de la barrette 100 ou de la matrice 300 par exemple) ou dans plusieurs directions (les directions 210 et 220 par exemple). Lorsque le substrat 410 tourne sur lui-même à 360° à vitesse constante, il est possible d'obtenir un gradient de composition ayant une symétrie de révolution.

Le spectromètre multicanal décrit ci-dessus peut répondre, avec une résolution spectrale comprise généralement entre 5 nm et 8 nm, à de nombreux besoins. Dans le domaine de l'infrarouge par exemple, il peut servir à la mesure de température d'un objet ou d'une flamme. La mesure classique de température consiste à mesurer l'émission optique de l'objet à deux longueurs d'onde différentes, puis à en déduire sa température à l'aide de la loi d'émission du corps noir. Or la mesure classique est souvent faussée, car l'émissivité du corps peut varier entre les deux longueurs d'onde. La mesure complète du spectre dans l'infrarouge, grâce au spectromètre multicanal selon l'invention, permet de fiabiliser cette mesure de température.

Un autre exemple d'application consiste à analyser le spectre du rayonnement produit par une flamme, afin d'en déduire les produits de combustion, ou le spectre visible d'un rayonnement transmis par des objets en verre, dans le but de les trier par couleur.

Le spectromètre multicanal permet également de repérer une raie laser et de déterminer la longueur d'onde de cette raie (au paramètre de résolution $\Delta\lambda$ près). Du fait qu'en pratique la réponse spectrale des photodétecteurs décroît exponentiellement après la fréquence de coupure, plusieurs pixels émettront un signal en réponse à la
5 raie laser (leur nombre dépend de la résolution spectrale). Un calcul semblable à celui décrit précédemment permettra d'obtenir une signature caractéristique de la raie.

De nombreuses variantes et modification du spectromètre multicanal apparaîtront à l'homme du métier. L'alliage semi-conducteur des photodétecteurs pour être un
10 matériau différent des matériaux III-V et II-VI, et notamment un matériau semi-conducteur à gap indirect, comme l'alliage $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$. Les matériaux à gap direct sont toutefois préférés, car ils ont une meilleure sensibilité que les matériaux gap indirect. En outre, le traitement des signaux est simplifié dans le cas des matériaux à gap direct, car leur mécanisme d'absorption ne fait pas intervenir de phonons et est plus abrupte,
15 ce qui conduit à une meilleure résolution spectrale.

REVENDICATIONS

1. Spectromètre (100, 300) comprenant :

- une couche photosensible en un alliage semi-conducteur divisée en une pluralité de photodétecteurs (110), les photodétecteurs étant organisés en au moins une colonne s'étendant dans une première direction (210) ; et
- un circuit de traitement de signaux délivrés par les photodétecteurs (110) en réponse à un rayonnement électromagnétique incident ;

caractérisé en ce que l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présente un gradient de composition dans la première direction (210) de sorte qu'une partie au moins des photodétecteurs (110) de ladite colonne aient des réponses spectrales ($R(\lambda)$) au rayonnement électromagnétique incident décalées en longueur d'onde.

2. Spectromètre selon la revendication 1, dans lequel l'alliage semi-conducteur est un matériau semi-conducteur à bande interdite directe.

3. Spectromètre selon la revendication 2, dans lequel l'alliage semi-conducteur est un alliage ternaire III-V ou II-VI.

4. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la composition de l'alliage semi-conducteur varie de façon monotone d'une extrémité à l'autre de ladite colonne de photodétecteurs (110).

5. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les photodétecteurs (100) sont organisés en une matrice (300) comprenant plusieurs colonnes (i) s'étendant dans la première direction (210) et plusieurs rangées (j) s'étendant dans une deuxième direction (220), l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présentant un gradient de composition dans la première direction (210) pour chaque colonne (i) de photodétecteurs et une composition constante dans la deuxième direction (220) pour chaque rangée (j) de photodétecteurs.

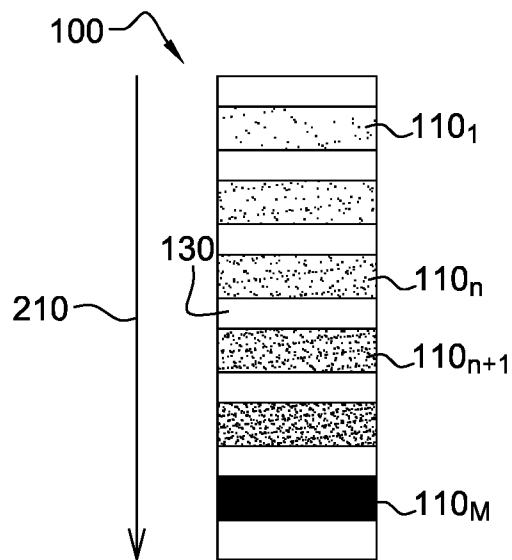
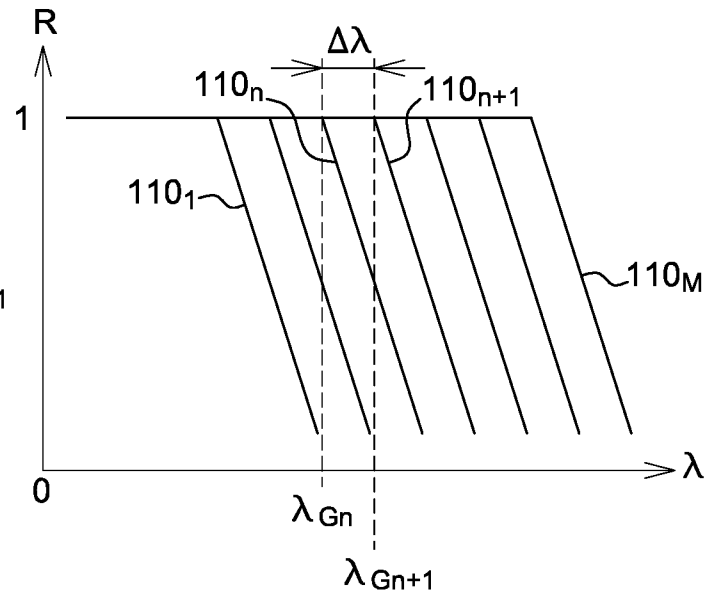
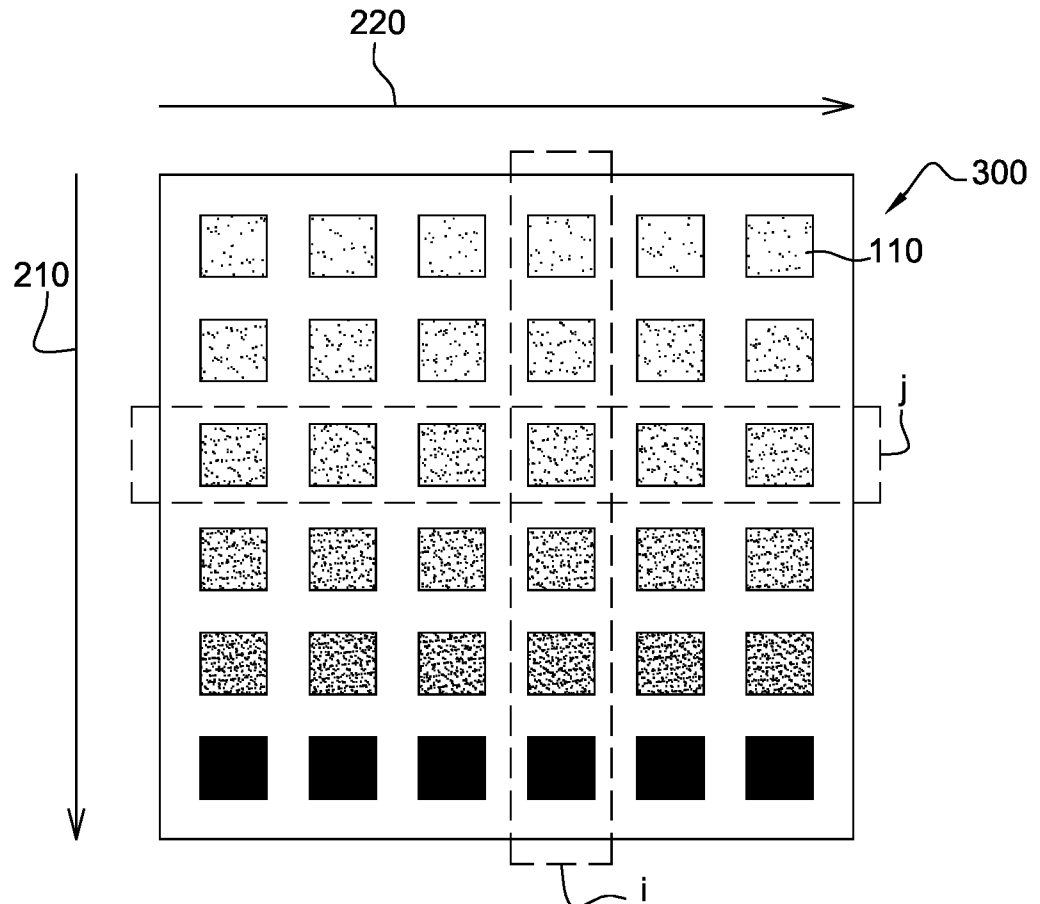
6. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les

photodétecteurs sont organisés en une matrice comprenant plusieurs colonnes (i) s'étendant dans la première direction (210) et plusieurs rangées (j) s'étendant dans une deuxième direction (220), l'alliage semi-conducteur de la couche photosensible présentant un gradient de composition dans la première direction (210) pour chaque
5 colonne (i) de photodétecteurs et un gradient de composition dans la deuxième direction (220) pour chaque rangée (j) de photodétecteurs.

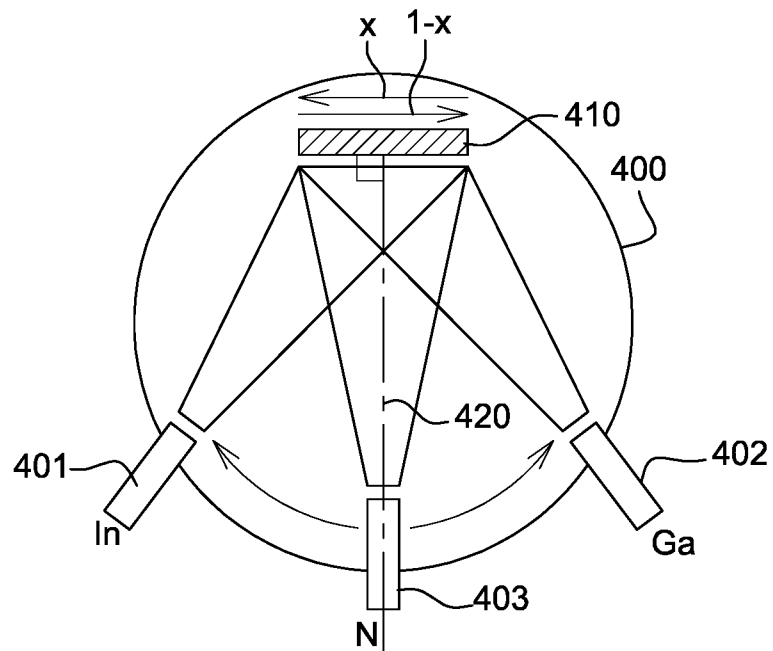
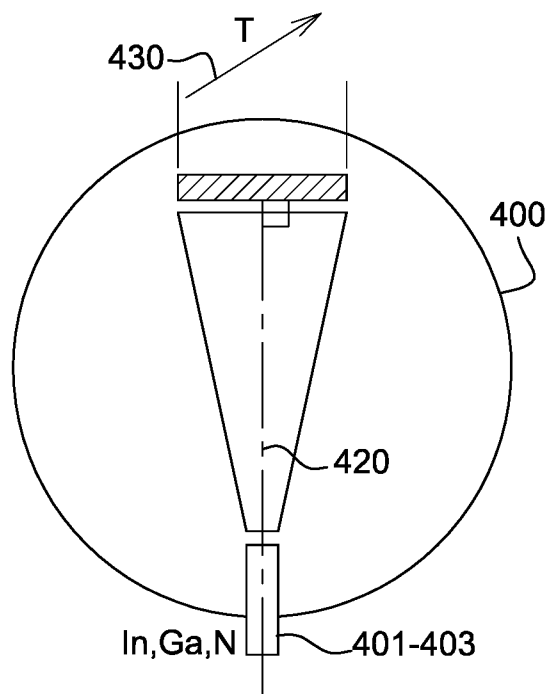
7. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le circuit de traitement est configuré pour calculer une différence de signaux entre deux
10 photodétecteurs (110) consécutifs de chaque colonne (i).

8. Spectromètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le circuit de traitement est configuré pour mesurer l'intensité de plusieurs composantes spectrales du rayonnement électromagnétique incident.

1/2

**Fig. 1****Fig. 2****Fig. 3**

2 / 2

**Fig. 4****Fig. 5**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/064718

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01J3/28 H01L27/146 H01L31/103
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01J H01L

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	FR 2 894 074 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 1 June 2007 (2007-06-01) page 2, line 14 - page 3, line 19 page 4, line 17 - page 5, line 18 page 6, line 5 - line 17 figures 2A,2B	1-4,6-8
X	----- US 2005/205758 A1 (ALMEIDA LEO A [US]) 22 September 2005 (2005-09-22) paragraphs [0006], [0012] - [0014], [0017], [0018], [0020] -----	1,4,5,7, 8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 August 2016

Date of mailing of the international search report

25/08/2016

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

Jacquin, Jérôme

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/064718

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2894074	A1	01-06-2007	NONE

US 2005205758	A1	22-09-2005	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2016/064718

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01J3/28 H01L27/146 H01L31/103 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01J H01L		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	FR 2 894 074 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 1 juin 2007 (2007-06-01) page 2, ligne 14 - page 3, ligne 19 page 4, ligne 17 - page 5, ligne 18 page 6, ligne 5 - ligne 17 figures 2A,2B	1-4,6-8
X	----- US 2005/205758 A1 (ALMEIDA LEO A [US]) 22 septembre 2005 (2005-09-22) alinéas [0006], [0012] - [0014], [0017], [0018], [0020] -----	1,4,5,7,8
☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée "T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets		
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 17 août 2016		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 25/08/2016
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Jacquin, Jérôme

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2016/064718

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2894074	A1	01-06-2007	AUCUN	

US 2005205758	A1	22-09-2005	AUCUN	
