

**PHOTODETECTEUR COMPORTANT UNE STRUCTURE A CRISTAL
PHOTONIQUE COUPLE OPTIQUEMENT A UNE COUCHE ACTIVE A
RENDEMENT QUANTIQUE AMELIORE**

DOMAINE TECHNIQUE

Le domaine de l'invention est celui des photodétecteurs, par exemple des photodétecteurs matriciels, comportant une structure à réseau et une couche active adaptée à absorber le rayonnement lumineux à détecter.

ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

Les photodétecteurs d'un rayonnement électromagnétique sont adaptés à recevoir et détecter le rayonnement électromagnétique en le convertissant en un signal lumineux ou électrique de sortie, comme, par exemple, un signal de sortie formé de porteurs de charge photogénérés dans une couche active.

Le document WO2014/056550 décrit un exemple d'un photodétecteur de rayonnement électronique, tel qu'un tube intensificateur d'image ou un tube photomultiplicateur. Comme l'illustre la figure 1, le photodétecteur A1 comporte une fenêtre d'entrée A10 transparente au rayonnement à détecter, et une couche active photoémissive A30 disposée sur une face arrière de la fenêtre d'entrée A10. Celle-ci est adaptée à recevoir le rayonnement électromagnétique incident et à émettre en réponse un flux de photoélectrons. Un dispositif de sortie (non représenté) reçoit les photoélectrons et génère en réponse un signal de sortie, ici après avoir multiplié les photoélectrons en un flux d'électrons secondaires.

Le rendement quantique de la couche active A30 correspond au rapport entre le nombre de photoélectrons émis sur le nombre de photons incidents reçus. Il dépend notamment du taux d'absorption du photon incident, du taux de transport du photoélectron jusqu'à la face d'émission (face arrière de la couche active), et du taux d'émission du photoélectron hors de la couche active A30.

Comme les taux d'absorption et de transport dépendent de l'épaisseur de la couche active A30 selon des tendances opposées, à savoir que le taux d'absorption augmente avec l'épaisseur alors que le taux de transport diminue, il existe donc une épaisseur optimale permettant de maximiser le produit de ces deux taux. Cependant, il apparaît que le taux

d'absorption diminue fortement pour les grandes longueurs d'onde, notamment ici à partir de 800nm environ. Pour améliorer les performances du photodétecteur A1, une solution naturelle serait alors d'augmenter l'épaisseur de la couche active A30 pour augmenter le taux d'absorption, mais, comme on l'a vu, cela conduirait à une dégradation du taux de transport.

Aussi, le photodétecteur A1 comporte une structure à réseau A20 formant un réseau de diffraction en transmission, située entre la fenêtre d'entrée A10 et la couche active A30. Aussi, un photon incident transmis par ce réseau de diffraction pénètre dans la couche active A30 avec un angle de diffraction non nul vis-à-vis de la normale à la face avant de la couche active A30. L'épaisseur apparente de la couche active A30, vue par le photon, est donc plus élevée, ce qui améliore le taux d'absorption sans que soit dégradé le taux de transmission. Ainsi, le rendement quantique de la couche active A30 est amélioré.

Cependant, il existe un besoin d'améliorer les performances d'un tel photodétecteur, et plus largement de tout photodétecteur formé d'une couche support transparente, d'une structure à réseau, et d'une couche active absorbante.

EXPOSE DE L'INVENTION

Pour cela, l'objet de l'invention est un photodétecteur comportant une couche support transparente, une structure à réseau (structure à cristal photonique) et une couche active absorbante, ce photodétecteur présentant des performances améliorées, du fait notamment d'une augmentation du rendement quantique de la couche active.

Pour cela, l'objet de l'invention est un photodétecteur adapté à détecter un rayonnement lumineux dans une bande spectrale de détection prédéfinie, comportant un empilement formé de :

- une couche support, réalisée en un matériau transparent, adaptée à recevoir le rayonnement lumineux par une face avant et à le transmettre par une face arrière ;
- une structure à réseau, disposée sur la face arrière de la couche support, comportant des motifs agencés dans un plan principal parallèle à la face avant de la couche support ;
- une couche active, disposée sur une face arrière de la structure à réseau, réalisée en un matériau semiconducteur adapté à absorber le rayonnement lumineux.

Selon l'invention, la structure à réseau comporte une couche structurée, laquelle est formée desdits motifs et d'une sous-couche continue d'épaisseur constante e_{cs} non nulle, les motifs

étant orientés vers la couche support et présentant un profil s'élargissant le long d'une direction orientée vers la sous-couche continue.

De plus, la structure à réseau, dite structure à cristal photonique, présente des dimensions telles que la couche structurée forme un cristal photonique qui supporte au moins un mode guidé apte à être excité par le rayonnement lumineux d'intérêt incident, le cristal photonique étant couplé optiquement à la couche active de sorte que le mode guidé est confiné optiquement dans la couche structurée et la couche active.

Certains aspects préférés mais non limitatifs de ce photodétecteur sont les suivants.

Les motifs peuvent présenter une hauteur h , entre leur sommet et leur base, comprise entre un dixième et trois quarts de l'épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue de la couche structurée.

La structure à cristal photonique peut comporter une couche dite de remplissage, située entre la couche support et la couche structurée, réalisée en un matériau diélectrique présentant un indice de réfraction n_L inférieur à un indice de réfraction n_H de la couche structurée et présentant un écart $n_H - n_L$ au moins égal à 0,2.

L'indice de réfraction n_L de la couche de remplissage peut présenter un écart en valeur absolue

$|n_L - n_{\text{cs}}|$ avec un indice de réfraction de la couche support au plus égal à 0,1.

Un indice de réfraction n_H de la couche structurée peut présenter un écart en valeur absolue

$|n_H - n_{\text{ca}}|$ avec un indice de réfraction de la couche active au plus égal à 0,5.

La somme d'une hauteur h des motifs, d'une épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue de la couche structurée et d'une épaisseur e_{ca} de la couche active, peut être au moins égale à $\lambda_r / (2 \times \langle n'_H \rangle)$, où λ_r est une longueur d'onde du mode guidé, et où $\langle n'_H \rangle$ est un indice moyen égale à une moyenne des indices de réfraction de la couche structurée et de la couche active pondérée par les épaisseurs respectives.

Les motifs peuvent présenter un profil parabolique.

La couche active peut présenter une face arrière opposée à la structure à cristal photonique (20), en contact avec du vide.

La couche de remplissage peut être réalisée en un oxyde, voire en un oxyde de silicium.

La couche active peut être une couche photoémissive réalisée en un matériau à base de SbNaKCs, SbNa₂KCs, SbNaK, SbKCs, SbRbKCs ou SbRbCs, ou en un matériau à base d'AgOCs.

Le photodétecteur peut être un tube intensificateur d'image ou un tube photomultiplicateur.

- 5 L'invention porte également sur un procédé de fabrication d'un photodétecteur selon l'une quelconque des caractéristiques précédentes, comportant les étapes suivantes :
- réalisation d'un empilement formé d'une couche épaisse, d'une couche dite de remplissage, et d'une couche mince supérieure ;
 - réalisation d'ouvertures traversantes dans la couche mince supérieure et débouchant sur
 - 10 la couche de remplissage, agencées régulièrement au pas p des motifs ;
 - gravure humide isotrope partielle de la couche de remplissage à partir des ouvertures traversantes, de manière à former des zones gravées périodiques destinées à former les motifs ; puis retrait de la couche mince supérieure ;
 - dépôt sur la couche de remplissage d'une couche formant la couche structurée ;
 - 15 ○ dépôt sur la couche structurée de la couche active ;
 - retrait de la couche épaisse, et assemblage de la couche support sur la face rendue libre de la couche de remplissage.

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

- 20 D'autres aspects, buts, avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :
- la figure 1, déjà décrite, est une vue schématique et partielle, en coupe transversale, d'un photodétecteur selon un exemple de l'art antérieur ;
- 25 la figure 2A est une vue schématique et partielle, en coupe transversale, d'un photodétecteur selon un mode de réalisation ;
- la figure 2B illustre plus en détail la structure à cristal photonique du photodétecteur de la fig.2A ;
- la figure 2C est une vue de dessus de la couche structurée du photodétecteur de la fig.2A ;
- 30 la figure 3A illustre des exemples de spectres d'absorption et de réflexion d'un photodétecteur similaire à celui de la fig.2A ;

la figure 3B illustre des exemples de spectres d'absorption et de réflexion d'un photodétecteur selon une variante de celui de la fig.2A ;

la figure 3C illustre un exemple de densité spectrale de puissance d'un rayonnement lumineux en vision nocturne ;

- 5 les figures 4A à 4F illustrent des étapes d'un procédé de fabrication d'un photodétecteur similaire à celui de la fig.2A.

EXPOSE DETAILLE DE MODES DE REALISATION PARTICULIERS

- Sur les figures et dans la suite de la description, les mêmes références représentent les
10 éléments identiques ou similaires. De plus, les différents éléments ne sont pas représentés à l'échelle de manière à privilégier la clarté des figures. Par ailleurs, les différents modes de réalisation et variantes ne sont pas exclusifs les uns des autres et peuvent être combinés entre eux. Sauf indication contraire, les termes « sensiblement », « environ », « de l'ordre de » signifient à 10% près, et de préférence à 5% près. Par ailleurs, les termes « compris entre ...
15 et ... » et équivalents signifient que les bornes sont incluses, sauf mention contraire.

- L'invention porte sur un photodétecteur adapté à détecter un rayonnement lumineux dans une bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$ prédéfinie. Il comporte un empilement formé de, suivant une direction principale, une couche support transparente, une structure à réseau
20 (appelée par la suite 'structure à cristal photonique'), et une couche active adaptée à absorber le rayonnement lumineux incident.

- La direction principale est une direction parallèle ou inclinée vis-à-vis de la normale à la face avant de la couche support transparente par laquelle entre le rayonnement lumineux à détecter dans le photodétecteur. Elle définit également l'axe optique du photodétecteur
25 suivant lequel le rayonnement lumineux incident se propage. On peut définir un plan principal comme étant un plan parallèle à la face avant de la couche support transparente. Dans la suite de la description, la direction principale est parallèle au plan principal, mais une inclinaison de quelques degrés, de préférence au plus 10°, reste possible.

- Comme détaillé par la suite, les performances du photodétecteur sont améliorées par le fait
30 que la structure à cristal photonique présente des dimensions telles que la couche structurée forme un cristal photonique qui supporte au moins un mode guidé apte à être excité par le

rayonnement lumineux d'intérêt incident, lequel s'étend dans le plan du cristal photonique. De plus, le cristal photonique est couplé optiquement à la couche active, de sorte que le mode guidé est confiné optiquement dans le cristal photonique et la couche active.

Pour cela, le mode guidé est excité en incidence normale ou incliné (suivant l'axe optique) par un effet de résonance dit de mode guidé (GMR, pour *Guided-Mode Resonance* en anglais), à une grande longueur d'onde prédéterminée de la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, appelée longueur d'onde de résonance λ_r , où le taux d'absorption de la couche active est habituellement relativement faible en l'absence d'une telle structure à cristal photonique. Le taux d'absorption est donc particulièrement élevé à cette longueur d'onde de résonance λ_r , alors que le taux de transport reste inchangé.

Le cristal photonique est formé par les motifs d'une couche structurée réalisée en un diélectrique de haut indice de réfraction n_H . Ces motifs sont de préférence arrangés de manière périodique, mais un arrangement quasi-périodique, voire non périodique, comme par exemple du désordre corrélé, est également possible. Le cristal photonique donne naissance à des bandes interdites de propagation de la lumière selon certaines directions et à certaines longueurs d'onde, similairement aux bandes interdites électroniques dans les semiconducteurs. Le cristal photonique est ici de préférence à deux dimensions, dans le sens où les motifs sont arrangés suivant deux axes distincts du plan principal dans lequel s'étend la couche structurée. Par ailleurs, comme décrit plus loin il est possible de ralentir la lumière dans le cristal photonique, et celle-ci est confinée latéralement dans le plan de la couche structurée.

Comme détaillé par la suite, les performances du photodétecteur sont améliorées par le fait que le taux de réflexion, défini à l'interface entre la couche support et la structure à cristal photonique, est réduit. Ceci est obtenu par le fait que les motifs du cristal photonique, qui s'étendent verticalement à partir d'une sous-couche continue d'épaisseur constante vers la couche support, présentent un profil qui s'élargit le long de la direction principale, de sorte que le facteur de remplissage associé aux motifs augmente suivant la direction principale d'une valeur nulle à au moins 80%, voire au moins 90% ou davantage. Par ce profil des motifs, qui est de préférence parabolique, l'indice de réfraction, associé aux motifs (et donc à leur facteur de remplissage) (explicité plus bas), présente une valeur qui augmente suivant la direction principale, passant d'une valeur basse n_L sensiblement égale à l'indice de réfraction d'une couche de remplissage et de la couche support jusqu'à une valeur haute sensiblement égale, à au moins 10%, à l'indice élevé n_H du matériau de la couche structurée

de la structure à réseau. Il apparaît que cette réduction du taux de réflexion est large bande, ce qui améliore les performances du photodétecteur.

La figure 2A est une vue en coupe transversale, schématique et partielle, d'un photodétecteur 1 selon un mode de réalisation. La figure 2B illustre une partie de la structure à cristal photonique 20, et la figure 2C est une vue de dessus de la couche structurée 22 de la structure à cristal photonique 20.

Dans cet exemple, le photodétecteur 1 est un tube intensificateur d'image (par ex. de type EB-CCD ou EBCMOS) ou un tube photomultiplicateur, et la couche active 30 est une photocathode semi-transparente. Le rayonnement lumineux à détecter présente une gamme spectrale qui couvre la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, qui va ici de $0,5\mu\text{m}$ à $1\mu\text{m}$ environ.

Selon l'invention, le photodétecteur 1 comporte *a minima* un empilement formé, suivant la direction principale, d'une couche support 10 transparente, d'une structure à cristal photonique 20, et d'une couche active 30. Un dispositif de sortie (non représenté) est situé en aval de la couche active 30, et est adapté à recevoir les porteurs de charge photogénérés dans la couche active 30 pour générer en réponse un signal optique ou électrique de sortie.

Dans le cas ici où le photodétecteur 1 est un tube intensificateur d'image ou un tube photomultiplicateur, le dispositif de sortie peut alors comporter un dispositif multiplicateur des photoélectrons (par ex. une galette de micro-canaux) suivi d'un écran phosphore et/ou, le cas échéant, d'un capteur matriciel CMOS ou CCD. Cependant, l'invention n'est pas limitée à ce type de photodétecteurs ni aux photocathodes.

On définit ici et pour la suite de la description un repère direct tridimensionnel orthogonal XYZ, où les axes X et Y forment un plan principal suivant lequel les couches s'étendent, et où l'axe Z est orienté suivant l'épaisseur des couches. La direction +Z est orientée de la couche support 10 en direction de la couche active 30. Elle forme la direction principale suivant laquelle le rayonnement lumineux à détecter entre dans le photodétecteur (la direction principale peut toutefois être inclinée vis-à-vis de la normale au plan principal XY, de préférence d'au plus 10° environ). Par ailleurs, les termes « avant » et « arrière » s'entendent comme étant relatifs à un positionnement croissant suivant la direction principale +Z.

La couche support 10 forme une fenêtre d'entrée du rayonnement lumineux à détecter dans le photodétecteur 1. Elle présente une face avant 10av par laquelle le rayonnement lumineux

est reçu, et une face arrière 10ar, opposée à la face avant 10av, par laquelle le rayonnement lumineux reçu est transmis en direction de la structure à cristal photonique 20. Les faces avant 10av et arrière 10ar sont ici sensiblement parallèles au plan principal XY.

5 La couche support 10 est réalisée en un matériau transparent dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, c'est-à-dire que sa transmittance (taux de transmission) est très élevée, par exemple proche de 100%. Elle est réalisée en un matériau choisi en fonction de la gamme spectrale du rayonnement lumineux à détecter. Dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$ allant de 0,5 à 1 μm environ, le matériau peut être, par exemple, du quartz ou du verre borosilicate.

10 La couche support 10 peut présenter une épaisseur allant de quelques centaines de microns à quelques millimètres. A titre d'exemple, la couche support 10 est réalisée en quartz, et présente une épaisseur de 2mm environ. Elle présente un indice de réfraction noté n_{cs} .

La structure à cristal photonique 20 est disposée sur la face arrière 10ar de la couche support 10. Elle comporte des motifs 22.1 agencés dans le plan principal XY, ici de manière
15 périodique. Elle est dimensionnée pour former un cristal photonique permettant d'améliorer l'absorption dans la couche active 30, et les motifs 22.1 présentent un profil qui s'élargit du sommet vers la base de manière à réduire le taux de réflexion à l'interface entre la couche support 10 et la structure à cristal photonique 20.

La structure à cristal photonique 20 comporte une première couche 21, dite couche de remplissage, réalisée en un matériau diélectrique, transparent dans la bande spectrale de
20 détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, et présentant un faible indice de réfraction n_{L} . Elle s'étend ici dans le plan principal XY au contact de la couche support 10, mais une couche intercalaire (non représentée), réalisée également en un matériau transparent et de faible indice de réfraction, peut être située entre et au contact de la couche support 10 et de la couche de remplissage
25 21.

L'indice de réfraction n_{L} présente un écart en valeur absolue $|n_{\text{L}} - n_{\text{cs}}|$ à l'indice de réfraction n_{cs} de la couche support 10 de préférence inférieur ou égal à 0,1, défini à la longueur d'onde de résonance λ_{r} du mode guidé supporté par le cristal photonique, comprise dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, de manière à limiter la réflexion du rayonnement lumineux à
30 l'interface entre la couche support 10 et la couche de remplissage 21. De préférence, l'indice de réfraction n_{L} est sensiblement égal à celui de la couche support 10. A titre d'exemple, la

couche de remplissage est réalisée en un oxyde de silicium, par exemple en SiO_2 , dont l'indice de réfraction n_L varie de 1,4623 à 1,4504 dans la bande spectrale $\Delta\lambda_{\text{det}} = [0,5 ; 1\mu\text{m}]$.

La couche de remplissage 21 comporte ici une sous-couche continue 21.1 d'épaisseur constante e_{ccr} , ici non nulle mais qui peut être nulle, à partir de laquelle s'étendent suivant la direction principale +Z des portions 21.2 qui remplissent l'espace situé entre les motifs 22.1 de la structure à cristal photonique 20. L'épaisseur e_{ccr} est définie ici suivant l'axe Z entre la face avant 20av de la structure à cristal photonique 20 et un plan passant par le sommet des motifs 22.1. A titre d'exemple, dans le cas de $\Delta\lambda_{\text{det}} = [0,5 ; 1\mu\text{m}]$, l'épaisseur e_{ccr} peut être de l'ordre de $0,5\mu\text{m}$ environ. Comme décrit plus loin, cette valeur peut être optimisée de manière à améliorer le taux d'absorption dans la couche active 30 par effet de résonance des modes guidés, et de manière à réduire le taux de réflexion à l'interface entre la couche support 10 et la structure à cristal photonique 20.

La structure à cristal photonique 20 comporte également une deuxième couche 22, dite couche structurée, réalisée en un matériau diélectrique, transparent dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$, et présentant un haut indice de réfraction n_H supérieur à n_L . Elle s'étend dans le plan principal XY, et est formée des motifs 22.1 et d'une sous-couche continue 22.2 d'épaisseur constante e_{ccs} non nulle, à partir de laquelle s'étendent les motifs 22.1 en direction de la couche support 10.

L'indice de réfraction n_H présente un écart $n_H - n_L$ vis-à-vis de l'indice n_L de la couche de remplissage 21 de préférence supérieur ou égal à 0,2 à la longueur d'onde de résonance λ_r , de manière à assurer un confinement optique du mode guidé dans le cristal photonique. A titre d'exemple, la couche structurée 22 est réalisée en un oxyde de titane, par exemple en TiO_2 , dont l'indice de réfraction n_H varie de 2,7114 à 2,4856 dans la bande spectrale $\Delta\lambda_{\text{det}} = [0,5 ; 1\mu\text{m}]$, de sorte que l'écart $n_H - n_L$ varie entre 1,2491 à 1,0352. Cet écart est de 1,0794 à la longueur d'onde de résonance λ_r de $0,75\mu\text{m}$. De plus, l'indice n_H présente un écart en valeur absolue $|n_H - n_{\text{ca}}|$ vis-à-vis de l'indice de réfraction n_{ca} de la couche active 30 inférieur ou égal à 0,5, et de préférence est sensiblement égal à ce dernier, de sorte que le mode guidé supporté dans la couche structurée 22 (le cristal photonique) recouvre suffisamment la couche active 30 (on parle alors de supermode).

De préférence, la somme des épaisseurs des milieux de haut indice, à savoir la hauteur h des motifs 22.1, l'épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue 22.2 et l'épaisseur e_{ca} de la couche active 30 est telle que : $h + e_{\text{ccs}} + e_{\text{ca}}$ est au moins égale à $\lambda_r/2 < n'_H >$, et de préférence au moins égale à $\lambda_r/2 < n'_H >$, voire au moins égale à $3\lambda_r/2 < n'_H >$. Ainsi, on améliore les conditions

pour que la couche structurée 22 et la couche active 30 supportent au moins un supermode. L'indice de réfraction $\langle n'_H \rangle$ est ici une moyenne de l'indice n_H de la couche structurée 22 et de l'indice n_{ca} de la couche active 30, pondérée par les épaisseurs respectives ($h+n_{ccs}$ pour la couche structurée 22 ; e_{ca} pour la couche active 30), ou, de manière plus précise, une

5 moyenne des permittivités des couches 22 et 30 pondérée par les fractions volumiques respectives (selon le modèle de Bruggeman des milieux effectifs).

La sous-couche continue 22.2 présente une épaisseur e_{ccs} définie suivant l'axe Z entre un plan passant par la base des motifs 22.1 et la face arrière 20ar de la structure à cristal photonique 20. A titre d'exemple, dans le cas de $\Delta\lambda_{det} = [0,5 ; 1\mu m]$, l'épaisseur e_{ccs} peut

10 être de l'ordre de $0,35\mu m$ environ. Comme décrit plus loin, cette valeur peut être optimisée pour minimiser le taux de réflexion dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{det}$ et maximiser le taux d'absorption à la longueur d'onde de résonance λ_r .

Les motifs 22.1 s'étendent à partir de la sous-couche continue 22.2 en direction de la couche support 10. Ils présentent une hauteur h suivant l'axe Z, définie entre un plan passant par leur sommet et un plan passant par leur base (à l'interface avec la sous-couche 22.2). Ils sont

15 agencés régulièrement dans le plan XY avec un pas p (constant si agencement périodique). L'agencement des motifs 22.1 est de préférence bidimensionnelle, dans le sens où elle s'étend suivant deux axes distincts dans le plan XY, comme l'illustre la fig.2C. Elle permet de rendre le photodétecteur 1 insensible à la polarisation du rayonnement lumineux incident.

20 De plus, un cristal photonique bidimensionnel est susceptible de supporter plusieurs modes guidés à différentes longueurs d'onde de résonance (plusieurs résonances dans la bande spectrale $\Delta\lambda_{det}$). Dans un tel cas, on considère essentiellement la longueur d'onde de résonance λ_r qui améliore le plus efficacement l'absorption en bord de bande interdite de la couche active 30.

25 La hauteur h est de préférence comprise entre $e_{ccs}/10$ et $3e_{ccs}/4$ pour que la résonance ait un effet significatif sur le taux d'absorption. De plus, elle est définie en tenant compte des épaisseurs e_{ccs} et e_{ca} , et des indices de réfraction n_H et n_{ca} pour que le supermode soit supporté et s'étale correctement dans la couche active 30. A titre d'exemple, la hauteur h peut être égale à $0,35\mu m$ environ, et est une valeur à optimiser pour minimiser le taux de réflexion

30 bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{det}$ et maximiser le taux d'absorption à la longueur d'onde de résonance λ_r .

Par ailleurs, les motifs 22.1 présentent un profil dont la largeur l_H augmente suivant la direction principale +Z. Le profil est défini comme l'enveloppe d'une section transversale

des motifs 22.1 selon un plan passant par le sommet du motif et parallèle à l'axe Z. Autrement dit, la largeur l_H des motifs 22.1 augmente en allant du sommet jusqu'à la base des motifs 22.1. Les motifs 22.1 peuvent présenter une forme de cône, au sommet tronqué ou non, et à la base circulaire, ovale, polygonale etc. Le profil des motifs 22.1 peut être
 5 triangulaire ou courbe, de préférence parabolique. Aussi, cela permet de réduire le taux de réflexion à l'interface entre la couche support 10 et la structure à cristal photonique 20, sur toute la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{det}$.

Ainsi, lorsqu'on considère un volume élémentaire V_{elem} de la structure à cristal photonique 20 dans un plan XY, qui passe par le centre des motifs 22.1 comme l'illustrent les fig.2B et
 10 2C, on peut définir un indice de réfraction moyen comme étant la moyenne de l'indice de réfraction n_L et de l'indice de réfraction n_H moyennant le facteur de remplissage ff (*fill factor* en anglais) des motifs 22.1 présents dans le volume élémentaire V_{elem} . Autrement dit : $\langle n(z) \rangle = n_H \times ff(z) + n_L \times (1 - ff(z))$. Le facteur de remplissage $ff(z)$ varie suivant la direction principale +Z comme étant le rapport de la surface $s_H(z)$ des motifs dans le plan XY à l'ordonnée z sur
 15 la surface totale $S_{elem,tot}$ du volume élémentaire V_{elem} . La valeur de l'indice de réfraction moyen augmente suivant la direction +Z, en passant de la valeur basse n_L au niveau du sommet des motifs 22.1 à une valeur haute proche de n_H au niveau de la base des motifs 22.1, ou de préférence au moins égal à 90% de n_H .

De préférence, le profil des motifs 22.1 est parabolique de sorte que l'indice de réfraction
 20 moyen $\langle n(z) \rangle$ augmente de manière linéaire. En effet, il apparaît qu'un profil parabolique assure une réduction optimale du taux de réflexion dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{det}$.

Par ailleurs, comme indiqué précédemment, le pas d'agencement p et la hauteur h sont choisies, ainsi que l'épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue 22.2, et de préférence également l'épaisseur e_{ccr} de la sous-couche continue 21.1, de sorte que la couche structurée
 25 22 forme un cristal photonique qui supporte au moins un mode guidé apte à être excité par le rayonnement lumineux d'intérêt incident. De plus, le cristal photonique est couplé optiquement à la couche active 30, de sorte que le mode guidé est confiné optiquement dans le cristal photonique et la couche active 30.

Plus précisément, le rayonnement lumineux incident sur la structure à cristal photonique 20
 30 excite un ou plusieurs modes supportés par le cristal photonique, par un effet de résonance de mode guidé (GMR, pour *Guided-Mode resonance*, en anglais). Une description de cet effet de résonance de mode guidé se trouve notamment dans l'article de Magnusson & Ko intitulé *Guided-mode resonance nanophotonics: Fundamentals and applications*, SPIE

9927, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices XIII, 992702 (15 September 2016). Aussi, un mode guidé, de longueur d'onde λ_r prédéfinie, est présent dans le guide d'onde formé par la couche structurée 22 et est orienté dans le plan XY. La longueur d'onde de résonance λ_r est évidemment comprise dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$,
5 et est située dans les grandes longueurs d'onde, par exemple autour de 850nm ou 900nm environ, où le taux d'absorption de la couche active 30 chute normalement, i.e. en l'absence de la structure à cristal photonique 20 selon l'invention.

Pour cela, l'épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue 22.2 est choisie de sorte que le mode guidé résonant s'étale transversalement sur la couche active 30 (supermode), de sorte que le
10 taux d'absorption de la couche active 30 est alors amélioré à la longueur d'onde de résonance λ_r , sans que ne soit dégradé le taux de transport (du fait d'une augmentation de l'épaisseur de la couche active 30).

De plus, le pas d'agencement p est choisi de sorte que la constante de propagation du mode guidé du nième ordre de diffraction, défini comme $\beta_n = n \times 2\pi/p$, est comprise entre l'indice
15 de réfraction n_L et la valeur minimale parmi l'indice de réfraction n_H et celui de la couche active 30. De plus, la hauteur h , ainsi que le pas d'agencement p , sont choisis de manière à obtenir cet effet de résonance de mode guidé. Lorsque cet effet de résonance de mode guidé est obtenu, le mode guidé résonant satisfait une condition de Bloch, de sorte que sa vitesse de groupe $\partial\omega/\partial k$ est sensiblement nulle (ω est la pulsation et k est le vecteur d'onde). Aussi,
20 le mode guidé résonant forme une onde stationnaire, et peut être qualifié de « mode de Bloch lent ». Aussi, le mode guidé résonant reste situé, dans le plan XY, à l'endroit où il a été excité par le rayonnement lumineux incident. Il est ensuite absorbé dans la couche active 30 dans cette même zone dans le plan XY, ce qui améliore le contraste du photodétecteur 1, voire permet de limiter les effets de *diaphonie* (*crosstalk* en anglais) ou de halo dans le cas d'un
25 photodétecteur matriciel 1. A titre d'exemple, le pas p peut être égal à 0,55 μm environ, et est également une valeur à optimiser pour minimiser le taux de réflexion dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$ et maximiser le taux d'absorption à la longueur d'onde de résonance λ_r .

La couche active 30 repose sur la face arrière 20ar de la structure à cristal photonique 20.
30 Elle est adaptée à absorber le rayonnement lumineux d'intérêt dans la bande spectrale de détection $\Delta\lambda_{\text{det}}$. Elle est réalisée en un matériau semiconducteur adapté à absorber le rayonnement lumineux d'intérêt, dont le mode guidé résonant orienté dans le plan XY et

confiné optiquement dans la couche structurée 22 (cristal photonique) et dans la couche active 30. Elle présente une épaisseur e_{ca} sensiblement constante dans le plan XY.

Dans le cas d'une photocathode, il peut s'agir, par exemple, d'un matériau cristallin à base antimoine et métal alcalin, ou à base d'oxyde d'argent, par exemple un matériau choisi parmi
 5 SbNaKCs, SbNa₂KCs, SbNaK, SbKCs, SbRbKCs ou SbRbCs. Le matériau de la photocathode peut également être formé à base de AgOCs. Comme indiqué précédemment, le matériau semiconducteur présente un indice de réfraction n_{ca} sensiblement égal à celui du matériau de la couche structurée, ou présentant un écart en valeur absolue $|n_{ca}-n_H|$ au plus égal à 0,5. Elle présente une épaisseur de préférence inférieure ou égale à 300nm, par
 10 exemple égale à 140nm environ.

Ainsi, le photodétecteur 1 présente des performances améliorées grâce à la structure à cristal photonique 20 qui assure, d'une part une réduction large bande de la réflexion à l'interface entre la couche support 10 et la structure à cristal photonique 20, et d'autre part une excitation résonante d'au moins un mode guidé supporté dans la couche structurée 22 qui
 15 forme un cristal photonique, ce mode guidé résonant étant également confiné optiquement dans la couche active.

Le photodétecteur 1 peut être matriciel, et peut comporter un capteur matriciel CMOS (non représenté), situé en aval de la couche active, et plus précisément en aval d'un écran phosphore. Ainsi, la face arrière de la couche active peut être en contact avec du vide, et un
 20 dispositif multiplicateur peut être situé entre la couche active, pour multiplier les photoélectrons en un flux élevé d'électrons secondaires orientés vers l'écran phosphore. Les photons générés par l'écran phosphore sont ensuite détectés par le capteur matriciel CMOS. De préférence, chaque pixel de détection du capteur CMOS présente une dimension, dans le plan XY, égale à un nombre entier de périodes p .

25 Notons ici qu'une approche pour déterminer les valeurs du pas p , de la hauteur h , et des épaisseurs e_{ccr} et e_{ccs} , de manière à former le cristal photonique et la résonance de mode guidé, peut consister à résoudre les équations de Maxwell par une méthode d'analyse rigoureuse des ondes couplées (RCWA, pour *Rigorous coupled-wave analysis* en anglais), en faisant une étude paramétrique.

30 Ainsi, chacun des paramètres p , h , e_{ccr} et e_{ccs} varie sur une plage prédéfinie, et on calcule la réponse spectrale du photodétecteur en absorption $A(\lambda)$ et en réflexion $R(\lambda)$. La présence d'un pic d'absorption au niveau de la longueur d'onde de résonance λ_r peut ainsi être vérifiée.

Ensuite, pour obtenir les valeurs optimales, deux figures de mérite peuvent être calculées, à savoir une figure de mérite FOM_A associée au spectre d'absorption, qui est définie comme étant l'intégrale sur la bande spectrale de détection d'une corrélation du spectre d'absorption $A(\lambda)$ avec un spectre d'intensité $NV(\lambda)$ prédéfini (densité spectrale de puissance d'un rayonnement lumineux en vision nocturne). De même, on définit une figure de mérite FOM_R associée au spectre de réflexion, comme étant l'intégrale de la corrélation du spectre de réflexion $R(\lambda)$ avec le spectre d'intensité $NV(\lambda)$. Les deux figures de mérite s'écrivent donc :

$$FOM_A = \int_{0,5\mu m}^{1\mu m} (A \cdot NV) d\lambda ; FOM_R = \int_{0,5\mu m}^{1\mu m} (R \cdot NV) d\lambda$$

Les valeurs optimales qui maximisent le taux d'absorption A au niveau de la longueur d'onde de résonance tout en minimisant le taux de réflexion R sur la bande spectrale de détection peuvent ainsi être choisies sur la base de l'une et/ou l'autre des figures de mérite.

A ce titre, les figures 3A et 3B illustrent des exemples des spectres d'absorption $A(\lambda)$ et de réflexion $R(\lambda)$ du photodétecteur, pour deux exemples de dimensionnement de la structure à cristal photonique. Ces spectres sont obtenus par résolution numérique des équations de Maxwell, ici par une technique RCWA. La bande spectrale de détection s'étend ici de 0,5 à 1 μm . Par ailleurs, la figure 3C illustre un exemple d'une densité spectrale de puissance d'un rayonnement lumineux en vision nocturne.

Dans ces exemples, le photodétecteur 1 est réalisé d'une couche support 10 transparente en un oxyde de silicium, d'une structure à cristal photonique 20 formée d'une première couche de remplissage 21 en SiO_2 et d'une deuxième couche structurée 22 en TiO_2 , puis d'une couche mince d' Al_2O_3 , et enfin d'une couche active 30 telle qu'une photocathode réalisée à base d'antimoine et d'au moins un métal alcalin (de type S25).

La couche de remplissage 21 comporte une sous-couche continue 21.1 d'épaisseur constante e_{ccr} , et la couche structurée 22 comporte une sous-couche continue 22.2 d'épaisseur constante e_{ccs} et des motifs 22.1 agencés régulièrement suivant deux axes distincts contenus dans le plan XY. Les motifs 22.1 présentent une hauteur h , un pas p et un facteur de remplissage maximal ff_{max} défini au niveau de la base des motifs 22.1. Les motifs 22.1 présentent une forme parabolique à base circulaire, de sorte que le facteur de remplissage ff , et donc l'indice de réfraction moyen, varie de manière linéaire suivant la direction +Z.

L'étude paramétrique est réalisée en faisant varier ici les paramètres p , h , e_{ccr} et e_{ccs} sur les plages suivantes : pour p , de 0,5 à 0,63 μm , pour h de 0,25 à 0,55 μm , pour e_{ccr} de 0,23 à 0,55 μm et pour e_{ccs} de 0,23 à 0,45 μm .

La fig.3A illustre les spectres d'absorption $A(\lambda)$ et de réflexion $R(\lambda)$, dans le cas où la structure à cristal photonique 20 a été dimensionnée de manière à maximiser la figure de mérite FOM_A . Dans ce cas, le pas p est égal à $0,6\mu\text{m}$, la hauteur h est égale à $0,39\mu\text{m}$, l'épaisseur e_{b1} de la région amont est égale à $0,49\mu\text{m}$ et l'épaisseur e_{b2} de la région aval est égale à $0,29\mu\text{m}$. Il apparaît que la figure de mérite FOM_A est égale à 8,9966 sur la bande spectrale de détection de $0,5\text{-}1\mu\text{m}$. Cette valeur élevée est due au fait que le spectre d'absorption présente un pic d'absorption autour de 875nm , représentatif de la présence d'une résonance de mode guidé dans le cristal photonique et donc dans la couche active. De plus, la réflexion est particulièrement faible sur toute la bande spectrale de détection, avec une figure de mérite FOM_R égale à 1,8846.

La fig.3B illustre les spectres d'absorption $A(\lambda)$ et de réflexion $R(\lambda)$, dans le cas où la structure à cristal photonique 20 a été dimensionnée de manière à maximiser la figure de mérite FOM_B . Dans ce cas, le pas p est égal à $0,53\mu\text{m}$, la hauteur h est égale à $0,33\mu\text{m}$, l'épaisseur e_{b1} de la région amont est égale à $0,55\mu\text{m}$ et l'épaisseur e_{b2} de la région aval est égale à $0,35\mu\text{m}$. Il apparaît que la figure de mérite FOM_A reste élevée, avec une valeur de 7,4456, du fait de la présence d'un pic d'absorption autour de 850nm lié à une résonance de mode guidé dans le cristal photonique et donc dans la couche active. De plus, la réflexion est davantage diminuée, avec une figure de mérite FOM_R égale à 1,2261.

Aussi, le photodétecteur 1 présente un rendement quantique particulièrement élevé, du fait que la structure à cristal photonique 20 permet à la fois d'optimiser le taux d'absorption dans la couche active, notamment à la longueur d'onde de résonance, et de réduire le taux de réflexion sur la bande spectrale de détection, sans pour autant dégrader le taux de transport.

Les figures 4A à 4F illustrent des étapes d'un procédé de fabrication d'un photodétecteur 1 identique ou similaire à celui de la fig.2A.

En référence à la fig.4A, on fournit tout d'abord un empilement formé, de bas en haut, d'une couche épaisse 40 de silicium (par exemple une plaque, ou *wafér*, de silicium d'une épaisseur de plusieurs centaines de microns), d'une couche 21 d'oxyde enterré d'une épaisseur de $2\mu\text{m}$ environ, d'une couche mince 41 de silicium amorphe d'une épaisseur de 100nm , et d'une couche mince 42 d'oxyde de silicium d'une épaisseur de 100nm environ. L'oxyde enterré est de préférence réalisé par oxydation du silicium de la couche épaisse.

En référence à la fig.4B, on forme des ouvertures périodiques 43 au travers de la couche mince 42 d'oxyde et la couche mince 41 de silicium, qui débouchent sur la face supérieure de la couche 21 d'oxyde enterré. Les ouvertures 43 sont réalisées au pas p voulu pour la couche structurée. Pour cela, on dépose un masque dur sur la couche mince 42 d'oxyde, que
5 l'on structure pour former des ouvertures traversantes. Puis on réalise les ouvertures 43 au travers de la couche mince 42 d'oxyde par gravure sèche de type RIE. Puis on réalise les ouvertures au travers de la couche mince 41 de silicium par gravure sèche de type RIE.

En référence à la fig.4C, on supprime la couche mince 42 d'oxyde, par exemple par gravure sèche RIE. La face supérieure de la couche mince 41 de silicium structurée est alors rendue
10 libre.

En référence à la fig.4D, on réalise une gravure partielle de la couche 21 d'oxyde enterré, à partir des ouvertures périodiques présentes dans la couche mince 41 de silicium, de manière à former de zones gravées 44 ayant un profil périodique voulu. La gravure est ici une gravure humide isotrope, par exemple de type gravure BOE (oxyde gravant tamponné, ou *buffered oxide etch* en anglais). La profondeur de gravure correspond à la hauteur h voulue des motifs de la structure à cristal photonique. Le rapport entre la vitesse de gravure verticale et la vitesse de gravure horizontale permet de contrôler le profil des zones gravées 44. On peut définir dans la couche 21 d'oxyde enterré une partie inférieure continue d'épaisseur constante e_{cer} .
15

En référence à la fig.4E, on supprime ensuite la couche mince 41 de silicium structurée, pour donner accès à la face supérieure de la couche 21 d'oxyde enterré. On dépose ensuite une couche 22 d'un matériau de haut indice de réfraction, par exemple ici en TiO_2 , de manière à remplir les zones gravées 44, ce qui forme les motifs, et à former une sous-couche continue d'épaisseur constante e_{ccs} , et on planifie la face supérieure de la couche 22 de haut indice,
25 par exemple par une planarisation mécano-chimique. On peut déposer une couche mince intermédiaire 45 (facultative), par exemple en Al_2O_3 . Ensuite, on dépose la couche active 30 de manière à recouvrir la couche 22 de haut indice.

En référence à la fig.4F, on retourne l'empilement obtenu, puis on retire la couche épaisse 40 de silicium, et on fixe une couche support 10 en quart ou en verre borosilicate sur la face
30 rendue libre de la couche 21 d'oxyde enterré.

Ainsi, on obtient ainsi un photodétecteur 1 identique ou similaire à celui illustré sur la fig.2A, qui comporte la couche support 10 transparente, la structure à cristal photonique 20, et la couche active 30.

Des modes de réalisation particuliers viennent d'être décrits. Différentes variantes et
5 modifications apparaîtront à l'homme du métier.

REVENDICATIONS

1. Photodétecteur (1) adapté à détecter un rayonnement lumineux dans une bande spectrale de détection prédéfinie, comportant un empilement formé de :
 - 5 ○ une couche support (10), réalisée en un matériau transparent, adaptée à recevoir le rayonnement lumineux par une face avant (10av) et à le transmettre par une face arrière (10ar) ;
 - 10 ○ une structure à réseau (20), disposée sur la face arrière (10ar) de la couche support (10), comportant des motifs (22.1) agencés dans un plan principal parallèle à la face avant (10av) de la couche support (10) ;
 - 15 ○ une couche active (30), disposée sur une face arrière (20ar) de la structure à réseau (20), réalisée en un matériau semiconducteur adapté à absorber le rayonnement lumineux ;caractérisé en ce que :
 - 15 • la structure à réseau (20) comporte une couche structurée (22), laquelle est formée desdits motifs (22.1) et d'une sous-couche continue (22.2) d'épaisseur constante e_{ccs} non nulle, les motifs (22.1) étant orientés vers la couche support (10) et présentant un profil s'élargissant le long d'une direction orientée vers la sous-couche continue (22.2) ;
 - 20 • la structure à réseau (20), dite structure à cristal photonique, présente des dimensions telles que la couche structurée (22) forme un cristal photonique qui supporte au moins un mode guidé apte à être excité par le rayonnement lumineux d'intérêt incident, le cristal photonique étant couplé optiquement à la couche active (30) de sorte que le mode guidé est confiné optiquement dans la couche structurée (22) et la couche active (30).
 - 25
2. Photodétecteur (1) selon la revendication 1, dans lequel les motifs (22.1) présentent une hauteur h , entre leur sommet et leur base, comprise entre un dixième et trois quarts de l'épaisseur e_{ccs} de la sous-couche continue (22.2) de la couche structurée (22).
3. Photodétecteur (1) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la structure à cristal photonique (20) comporte une couche dite de remplissage (21), située entre la couche support (10) et la couche structurée (22), réalisée en un matériau diélectrique
- 30

présentant un indice de réfraction n_L inférieur à un indice de réfraction n_H de la couche structurée (22) et présentant un écart $n_H - n_L$ au moins égal à 0,2.

4. Photodétecteur (1) selon la revendication 3, dans lequel l'indice de réfraction n_L de la couche de remplissage (21) présente un écart en valeur absolue $|n_L - n_{cs}|$ avec un indice de réfraction de la couche support (10) au plus égal à 0,1.
5. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel un indice de réfraction n_H de la couche structurée (22) présente un écart en valeur absolue $|n_H - n_{ca}|$ avec un indice de réfraction de la couche active (30) au plus égal à 0,5.
6. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la somme d'une hauteur h des motifs (22.1), d'une épaisseur e_{cs} de la sous-couche continue (22.2) de la couche structurée (22) et d'une épaisseur e_{ca} de la couche active (30) est au moins égale à $\lambda_r / (2 \times \langle n'_H \rangle)$, où λ_r est une longueur d'onde du mode guidé, et où $\langle n'_H \rangle$ est un indice moyen égale à une moyenne des indices de réfraction de la couche structurée (22) et de la couche active (30) pondérée par les épaisseurs respectives.
7. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel les motifs (22.1) présentent un profil parabolique.
8. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel la couche active (30) présente une face arrière opposée à la structure à cristal photonique (20), en contact avec du vide.
9. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 et de la revendication 3, dans lequel la couche de remplissage (21) est réalisée en un oxyde.
10. Photodétecteur (1) selon la revendication 9, dans lequel la couche de remplissage (21) est en un oxyde de silicium.
11. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel la couche active (30) est une couche photoémissive réalisée en un matériau à base de SbNaKCs, SbNa₂KCs, SbNaK, SbKCs, SbRbKCs ou SbRbCs, ou en un matériau à base d'AgOCs.

12. Photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, celui-ci étant un tube intensificateur d'image ou un tube photomultiplicateur.
13. Procédé de fabrication d'un photodétecteur (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant les étapes suivantes :
- 5 ○ réalisation d'un empilement formé d'une couche épaisse (40), d'une couche dite de remplissage (21), et d'une couche mince supérieure (41) ;
- réalisation d'ouvertures traversantes (43) dans la couche mince supérieure (41) et débouchant sur la couche de remplissage (21), agencées régulièrement au pas p des motifs (22.1) ;
- 10 ○ gravure humide isotrope partielle de la couche de remplissage (21) à partir des ouvertures traversantes (43), de manière à former des zones gravées périodiques (44) destinées à former les motifs (22.1) ; puis retrait de la couche mince supérieure (41) ;
- dépôt sur la couche de remplissage (21) d'une couche (22) formant la couche structurée ;
- 15 ○ dépôt sur la couche structurée (22) de la couche active (30) ;
- retrait de la couche épaisse (40), et assemblage de la couche support (10) sur la face rendue libre de la couche de remplissage (21).