

DESCRIPTION**TITRE : PHOTOCATHODE À RENDEMENT QUANTIQUE AMÉLIORÉ****Domaine technique**

5 La présente invention concerne le domaine général des photocathodes telles que celles utilisées dans les tubes intensificateurs d'image ou les tubes photomultiplicateurs.

Etat de la technique antérieure

10 Les détecteurs de rayonnement électromagnétique, tels que les tubes intensificateurs d'image ou les tubes photomultiplicateurs, permettent de détecter un rayonnement électromagnétique dans une bande spectrale donnée en le convertissant en un signal de sortie lumineux ou électrique.

 Ces détecteurs comportent généralement une photocathode pour recevoir le rayonnement électromagnétique et émettre en réponse un flux de photoélectrons, un
15 dispositif multiplicateur d'électrons pour recevoir ledit flux de photoélectrons et émettre en réponse un flux d'électrons, dits secondaires, et enfin un dispositif de sortie pour recevoir ledit flux d'électrons et le convertir en un signal de sortie.

 La Fig. 1 représente un détecteur de rayonnement électromagnétique connu de
20 l'état de la technique.

 Comme illustré sur la figure, un tel détecteur, 100, comprend une fenêtre d'entrée en matériau transparent, 110, généralement en verre, servant de support à une couche photoémissive ou photocathode, 120, réalisée en un matériau semiconducteur. La fenêtre d'entrée présente une face avant, 111, destinée à recevoir le flux de photons
25 incidents et une face arrière, 112 opposée à la face avant. La couche photoémissive comporte une face amont, 121, en contact avec la face arrière de la fenêtre d'entrée et une face aval 122, à partir de laquelle les photoélectrons sont émis.

 La photocathode est portée à un potentiel négatif par rapport à celui appliqué au dispositif multiplicateur d'électrons 130, le dispositif multiplicateur d'électrons étant lui-

même à un potentiel négatif par rapport à celui appliqué au dispositif de sortie 140, par exemple un écran phosphore ou une matrice CCD.

Les photons arrivant sur la face avant 111, traversent la fenêtre transparente 110 et pénètrent dans la couche photoémissive 120, où, ils génèrent des paires électrons-trous s'ils possèdent une énergie supérieure à la largeur de bande interdite du matériau semiconducteur. Les photoélectrons migrent vers la face aval, 122, de la photocathode où ils sont émis dans le vide, avant d'être multipliés par le dispositif multiplicateur d'électrons, 130, et convertis en un signal lumineux ou électrique par le dispositif de sortie, 140.

Le rendement quantique de la photocathode est classiquement défini comme le rapport entre le nombre de photoélectrons émis par la photocathode et le nombre de photons reçus. Le rendement quantique de la photocathode est un paramètre essentiel du détecteur, il conditionne à la fois sa sensibilité et son rapport signal sur bruit. Il dépend notamment de la longueur d'onde des photons incidents et de l'épaisseur de la couche photoémissive.

Le rendement quantique peut être sensiblement dégradé par la présence de défauts à l'interface entre la photocathode, 120, et la fenêtre transparente, 110. Plus précisément, ces défauts créent des états de surface piégeant les photoélectrons générés dans la photocathode. Les photoélectrons ainsi piégés ne peuvent plus migrer vers la face aval de la photocathode et ne participent donc pas au photocourant généré par les photoélectrons émis par la photocathode.

Cette détérioration du rendement quantique de la photocathode se fait particulièrement sentir dans les faibles longueurs d'onde. En effet, les photons de plus forte énergie interagissent plus tôt avec le semiconducteur le long de leur trajectoire au sein de la photocathode. Les photoélectrons générés par ces photons ont par conséquent une probabilité plus élevée d'être piégés à l'interface.

Pour combattre cette détérioration du rendement quantique, il a été proposé d'introduire, à l'interface entre la fenêtre d'entrée et de la photocathode, une couche intermédiaire de matériau semiconducteur possédant une bande interdite plus large que celle de la photocathode. Ainsi, par exemple, si la photocathode est réalisée dans un

matériau semiconducteur III-V tel que GaAs de type p, on peut introduire une couche intermédiaire de GaAlAs de type p à l'interface. La plus grande largeur de bande interdite de GaAlAs par rapport à GaAs crée une courbure de bandes vers le haut (*upward band bending*) du côté de la photocathode comme on peut le voir dans le diagramme de bandes de la Fig. 2. Ainsi, lorsqu'un photon génère une paire électron-trou à proximité de l'interface, le photoélectron est extrait hors de la zone de recombinaison par le champ électrique local.

Cette solution n'est toutefois pas transposable à tous les types de photocathode, en particulier à celles réalisées dans un matériau polycristallin, par exemple dans un composé bi- ou multi-alcalin tel que SbK_2Cs , SbRb_2Cs , SbCs_3 , SbNa_3 , SbNaKRbCs , SbNaKCs , SbNa_2KCs . Du fait de leur structure polycristalline, ces photocathodes ne possèdent pas un diagramme de bandes bien défini et il est difficile de prévoir une couche intermédiaire en un second matériau semiconducteur permettant d'obtenir la courbure de bandes souhaitée à l'interface avec le matériau polycristallin.

De manière plus générale, même pour des photocathodes réalisées dans un matériau semiconducteur monocristallin, il n'est pas toujours aisé de trouver un second matériau semiconducteur adapté permettant à la fois d'obtenir un accord de maille et la courbure de bandes souhaitée avec le matériau semiconducteur constitutif de la photocathode. Ceci est notamment problématique pour les photocathodes réalisées dans un matériau semiconducteur II-VI, tel que CdTe.

Un but de la présente invention est par conséquent de proposer un détecteur de rayonnement électromagnétique possédant une photocathode en un premier matériau semiconducteur, présentant un rendement quantique élevé sans pour autant nécessiter une couche intermédiaire en un second matériau semiconducteur adapté, entre la fenêtre d'entrée et la photocathode.

Présentation de l'invention

La présente invention est définie par un détecteur de rayonnement électromagnétique comprenant une fenêtre d'entrée en verre possédant une face amont destinée à recevoir un flux de photons incidents ainsi qu'une face aval opposée à la face

amont, une photocathode sous la forme d'une couche semiconductrice, destinée à générer des photoélectrons à partir des photons incidents et à émettre lesdits photoélectrons ainsi générés, un dispositif multiplicateur d'électrons configuré pour recevoir les photoélectrons émis par la photocathode et à générer pour chaque
 5 photoélectron reçu une pluralité d'électrons secondaires et un dispositif de sortie configuré pour générer un signal de sortie à partir desdits électrons secondaires, le détecteur de rayonnement étant spécifique en ce qu'une couche conductrice transparente est déposée sur la face aval de la fenêtre d'entrée et qu'une couche mince isolante est disposée entre ladite couche conductrice et la couche semiconductrice, la
 10 couche conductrice étant reliée électriquement à une première électrode et la couche semiconductrice étant reliée électriquement à une seconde électrode, la première électrode étant destinée à être portée à un potentiel inférieur à celui appliqué à la seconde électrode.

La couche semiconductrice peut notamment être réalisée dans un matériau
 15 semiconducteur polycristallin. Ce matériau peut être choisi parmi SbK_2Cs , SbRb_2Cs , SbRb_2Cs , SbCs_3 , SbNa_3 , SbNaKRbCs , SbNaKCs , SbNa_2KCs .

Alternativement, la couche semiconductrice peut être réalisée dans un matériau semiconducteur monocristallin III-IV ou II-VI.

La couche conductrice transparente est typiquement réalisée en ITO ou ZnO.

20 La couche mince isolante est avantageusement réalisée dans un matériau diélectrique présentant une tension de claquage supérieure à 1 V/ 10 nm. Cette couche mince isolante a généralement une épaisseur de 100 à 200 nm. Le matériau diélectrique est avantageusement choisi parmi Al_2O_3 , SiO_2 , HfO_3 .

La différence de potentiel appliquée entre la seconde électrode et la première
 25 électrode est avantageusement choisie supérieure ou égale à $\frac{4\delta\sqrt{\varepsilon_s\Delta U_{bb}eN_a}}{\varepsilon_d}$ où ε_s et ε_d sont respectivement les constantes diélectriques de la couche semiconductrice et de la couche isolante, δ est l'épaisseur de la couche isolante, ΔU_{bb} est l'amplitude de la courbure de bande en absence de différence de potentiel appliquée, N_a est la

concentration d'accepteurs dans la couche semiconductrice et e est la charge de l'électron.

Brève description des figures

5 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention, décrit en référence aux figures jointes parmi lesquelles :

La Fig. 1, déjà décrite représente schématiquement la structure d'un détecteur de rayonnement électromagnétique connu de l'état de la technique ;

10 La Fig. 2 représente le diagramme de bandes d'une photocathode à rendement quantique élevé, connue de l'état de la technique ;

La Fig. 3 représente schématiquement la structure d'un détecteur de rayonnement électromagnétique selon un mode de réalisation de l'invention ;

La Fig. 4 représente le diagramme de bandes d'une photocathode utilisée dans le
15 détecteur de rayonnement électromagnétique de la Fig. 3.

Description des modes de réalisation

L'idée à la base de l'invention est d'introduire entre la fenêtre d'entrée du détecteur électromagnétique et la photocathode, une structure capacitive formée d'une
20 couche conductrice mince servant d'électrode de polarisation, et d'une couche mince de diélectrique. L'électrode de polarisation est destinée à être polarisée à un potentiel inférieur à celui appliqué à la photocathode de manière à chasser hors de la zone de recombinaison les photoélectrons générés à proximité de l'interface.

25 La Fig. 3 représente de manière schématique la structure d'un détecteur de rayonnement électromagnétique selon un mode de réalisation de l'invention.

Le détecteur comprend comme précédemment une fenêtre d'entrée, 310, en un matériau transparent dans la bande spectrale d'intérêt, par exemple une fenêtre en quartz ou en verre borosilicate.

La fenêtre d'entrée présente une face amont, 311, destinée à recevoir le flux de photons incidents et une face aval, 312, opposée à la face amont.

Une couche conductrice, 316, transparente dans la bande spectrale d'intérêt, est déposée sur la face aval de la fenêtre d'entrée. Elle est en outre reliée électriquement à une première électrode 315. La couche conductrice transparente peut être
5 avantageusement réalisée en ZnO ou en ITO. Son épaisseur est choisie dans la gamme 50 à quelques centaines de nm et avantageusement égale à 150 nm.

Une couche isolante, 317, réalisée en un matériau diélectrique, est disposée entre la couche conductrice 316 et la couche semiconductrice de la photocathode, 320.
10 Le matériau diélectrique est choisi pour présenter une tension de claquage élevée, par exemple supérieure à 1V/ 10 nm. L'épaisseur de la couche diélectrique est typiquement de 100 à 200 nm. Le matériau diélectrique pourra notamment être de l'alumine (Al_2O_3), de la silice (SiO_2), ou un oxyde d'Hafnium (HfO_3). Selon une variante, la couche isolante pourra être réalisée sous la forme d'une structure diélectrique multicouche faisant
15 intervenir les matériaux diélectriques précités.

La photocathode 320 est réalisée sous la forme d'une couche semiconductrice déposée sur la couche isolante 317. Le semiconducteur peut être monocristallin, par exemple un semiconducteur III-V, tel que GaAs ou II-VI, tel que CdTe. Alternativement il peut avoir une structure polycristalline, comme ce peut être notamment le cas pour les
20 composés bi- ou multi-alcalins tels que SbK_2Cs , SbRb_2Cs , SbRb_2Cs , SbCs_3 , SbNa_3 , SbNaKRbCs , SbNaKCs , SbNa_2KCs .

Dans tous les cas, la photocathode est reliée électriquement à une seconde électrode, 325.

Les électrons primaires émis par la photocathode sont émis dans le vide et
25 multipliés par un dispositif de multiplication d'électrons, 330, par exemple une galette de microcanaux (GMC) ou une couche de diamant nanocristallin comme décrit dans la demande publiée FR-A-2961628 déposée au nom de la présente Demanderesse, voire encore un multiplicateur à dynodes discrètes dans le cas des photomultiplicateurs classiques.

Le dispositif de multiplication d'électrons est relié à une troisième électrode (non représentée).

Les photoélectrons ainsi multipliés, dénommés électrons secondaires, sont reçus par le dispositif de sortie, 340. Le dispositif de sortie peut comporter un écran phosphore, assurant une conversion directe en image comme dans un intensificateur d'image ou bien une matrice CCD ou CMOS pour fournir un signal électrique représentatif de la distribution du flux de photons incidents, comme dans un système EB-CCD (*Electron Bombarded CCD*) ou EBCMOS (*Electron Bombarded CMOS*), ou une simple anode métallique dans le cas des photomultiplicateurs classiques.

Le dispositif de sortie est relié à une quatrième électrode jouant le rôle d'anode.

La fenêtre d'entrée 310, la photocathode 320, le dispositif de multiplication d'électrons, 330 et le dispositif de sortie sont avantageusement montés dans un corps de tube compact, les connexions électriques des électrodes avec l'alimentation extérieures étant assurées par des bagues de connexion séparées par des entretoises diélectriques. Selon une variante avantageuse de réalisation, le corps de tube pourra se présenter sous la forme d'un substrat céramique multicouche sur lequel sera fixée le dispositif de multiplication d'électrons comme décrit dans la demande publiée FR-A-2925218 déposée au nom de la présente Demanderesse.

Bien entendu, comme dans une photocathode conventionnelle, l'extraction des photoélectrons et leur accélération est assurée en appliquant une haute tension entre l'anode et la cathode. Toutefois, de manière originale, il est appliqué une tension négative entre la première électrode et la seconde électrode de sorte que la couche conductrice est portée à un potentiel inférieur à celui de la photocathode. Plus précisément si l'on note respectivement V_m, V_{pk}, V_a les potentiels respectifs de la couche conductrice, de la photocathode et l'anode, on a $V_m < V_{pk} \ll V_a$. En d'autres termes, la différence de potentiel entre la couche conductrice et l'anode est essentiellement due à celle entre la photocathode et l'anode. En pratique, la différence de potentiel $V_{pk} - V_m$ sera comprise entre 1 et 50 V alors que la différence de potentiel $V_a - V_{pk}$ est de l'ordre de plusieurs centaines de V.

L'application de cette tension sur la première électrode a pour effet de chasser les photoélectrons générés dans la zone de recombinaison 321 vers la surface d'émission 322 de la photocathode. La zone de recombinaison de la photocathode est située à l'interface avec la couche diélectrique. L'homme du métier comprendra en effet que les
5 dislocations et défauts à l'interface avec la couche diélectrique jouent le rôle de centre de recombinaison des photoélectrons. Le temps de séjour des photoélectrons dans la zone de recombinaison est très court du fait du champ électrique appliqué entre la couche conductrice et la photocathode et réduit d'autant leur probabilité de recombinaison.

En outre, le transport des photoélectrons au sein de la photocathode n'est plus
10 dû principalement à la diffusion mais également au champ électrique interne. Il en résulte une réduction du temps moyen de parcours des électrons dans la photocathode et une amélioration du temps de réponse du photodétecteur.

La Fig. 4 représente le diagramme de bandes d'une photocathode utilisée dans le
15 détecteur de rayonnement électromagnétique de la Fig. 3.

On a indiqué par 410 la couche conductrice, par 420 la couche isolante et par 430 la couche semiconductrice de la photocathode.

La partie haute de la figure, désignée par (A), correspond à la situation où aucune différence de potentiel n'est appliquée entre la couche conductrice et la couche
20 semiconductrice (de type p).

On remarque que les bandes de conduction et de valence de la couche semiconductrice sont incurvées vers le bas à l'interface avec la couche isolante. Autrement dit dans une telle situation, un gaz de photoélectrons se forme à l'interface, dans la cuvette de potentiel 424. On a désigné par ailleurs par 425 la zone de
25 recombinaison où se trouvent les états de surface.

Les photoélectrons générés à ou près de l'interface ont une probabilité de recombinaison élevée avec les états de surface, ce d'autant qu'un photoélectron présent dans la cuvette de potentiel aura tendance à migrer vers la zone de recombinaison.

La partie basse de la figure, désignée par (B), correspond à la situation où la
30 couche conductrice est portée à un potentiel inférieur à celui de la couche

semiconductrice. Plus précisément la différence de potentiel $V_{pk} - V_m$ est choisie ici supérieure à une valeur de seuil ΔV_{th} comme explicité plus loin.

On remarque que les bandes de conduction et de valence de la couche semiconductrice sont cette fois-ci incurvées vers le haut à l'interface avec la couche
5 isolante. Autrement dit dans une telle situation, les photoélectrons générés à l'interface sont chassés de la zone de recombinaison 425 par le champ électrique présent dans la zone de courbure des bandes.

La différence de potentiel $V_{pk} - V_m$ à appliquer peut être estimée comme suit :
en l'absence de tension appliquée (situation (A)), la charge d'espace (négative)
10 correspondant à la courbure de bandes équilibre la charge (positive) des états de surface.
Cette charge d'espace peut être approximée par :

$$Q_b \simeq -eN_a x_{dt} \quad (1)$$

15 où e est la charge de l'électron, N_a est la concentration d'accepteurs dans la photocathode (de type p) et x_{dt} est la largeur de la zone de déplétion.

La largeur de la zone de déplétion peut être estimée par :

$$x_{dt} \simeq \sqrt{\frac{4\varepsilon_s \Delta U_{bb}}{eN_a}} \quad (2)$$

20

où ε_s est la constante diélectrique du semiconducteur et ΔU_{bb} est la courbure de bande en absence de différence de potentiel. Il en résulte que $Q_b \simeq -\sqrt{4\varepsilon_s \Delta U_{bb} eN_a}$.

La différence de potentiel à appliquer entre la couche conductrice et la photocathode permettant de simplement équilibrer cette charge par effet capacitif dans
25 la photocathode est donc de :

$$(V_m - V_{pk})^{FF} = -\frac{Q_b}{C} = -\frac{Q_b}{\varepsilon_d} \delta \quad (3)$$

où l'indice FF correspond à une situation où les bandes sont plates à l'interface, δ est l'épaisseur de la couche isolante et ε_d sa constante diélectrique. Si l'on veut au moins inverser la courbure de bandes, il conviendra alors d'appliquer une différence de
 5 potentiel $(V_m - V_{pk}) \leq -\Delta V_{th}$ avec :

$$\Delta V_{th} \approx \frac{4\delta \sqrt{\varepsilon_s \Delta U_{bb} e N_a}}{\varepsilon_d} \quad (4)$$

L'homme du métier comprendra toutefois qu'une amélioration du rendement
 10 quantique sera obtenue dès lors que $V_m < V_{pk}$, dans la mesure où toute réduction de la courbure de bandes, avant même son inversion, réduira la largeur de la cuvette de potentiel à l'interface et diminuera par conséquent la probabilité de recombinaison des photoélectrons.

REVENDEICATIONS

1. Détecteur de rayonnement électromagnétique comprenant une fenêtre
5 d'entrée en verre (310) possédant une face amont (311) destinée à recevoir un flux de
photons incidents ainsi qu'une face aval (312) opposée à la face amont, une
photocathode sous la forme d'une couche semiconductrice (320), destinée à générer des
photoélectrons à partir des photons incidents et à émettre lesdits photoélectrons ainsi
10 générés, un dispositif multiplicateur d'électrons (330) configuré pour recevoir les
photoélectrons émis par la photocathode et à générer pour chaque photoélectron reçu
une pluralité d'électrons secondaires et un dispositif de sortie (340) configuré pour
générer un signal de sortie à partir desdits électrons secondaires, caractérisé en ce qu'une
couche conductrice transparente (316) est déposée sur la face aval (312) de la fenêtre
15 d'entrée et qu'une couche mince isolante (317) est disposée entre ladite couche
conductrice (316) et la couche semiconductrice (320), la couche conductrice étant reliée
électriquement à une première électrode (315) et la couche semiconductrice étant reliée
électriquement à une seconde électrode (325), la première électrode étant destinée à
être portée à un potentiel inférieur à celui appliqué à la seconde électrode.

20 2. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon la revendication 1,
caractérisé en ce que la couche semiconductrice est réalisée dans un matériau
semiconducteur polycristallin.

3. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon la revendication 2,
25 caractérisé en ce que le matériau semiconducteur polycristallin est choisi parmi SbK_2Cs ,
 SbRb_2Cs , SbRb_2Cs , SbCs_3 , SbNa_3 , SbNaKRbCs , SbNaKCs , SbNa_2KCs .

4. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon la revendication 1,
caractérisé en ce que la couche semiconductrice est réalisée dans un matériau
30 semiconducteur monocristallin III-IV ou II-VI.

5. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche conductrice transparente est réalisée en ITO ou ZnO.

5 6. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche mince isolante est réalisée dans un matériau diélectrique présentant une tension de claquage supérieure à 1 V/ 10 nm.

10 7. Détecteur de rayonnement électromagnétique, selon la revendication 6, caractérisé en ce que la couche mince isolante a une épaisseur de 100 à 200 nm.

8. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le matériau diélectrique est choisi
15 parmi Al_2O_3 , SiO_2 , HfO_3 .

9. Détecteur de rayonnement électromagnétique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la différence de potentiel appliquée entre la seconde électrode et la première électrode est choisie supérieure ou égale à
20 $\frac{4\delta\sqrt{\epsilon_s\Delta U_{bb}eN_a}}{\epsilon_d}$ où ϵ_s et ϵ_d sont respectivement les constantes diélectriques de la couche semiconductrice et de la couche isolante, δ est l'épaisseur de la couche isolante, ΔU_{bb} est l'amplitude de la courbure de bande en absence de différence de potentiel appliquée, N_a est la concentration d'accepteurs dans la couche semiconductrice et e est la charge de l'électron.

25