

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

①① N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 107 627

②① N° d'enregistrement national : **20 01884**

⑤① Int Cl⁸ : **H 03 K 17/687** (2019.12), G 01 J 1/44

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Circuit de contrôle d'une photodiode SPAD.

②② Date de dépôt : 26.02.20.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 27.08.21 Bulletin 21/34.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 25.02.22 Bulletin 22/08.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public — FR.*

⑦② Inventeur(s) : AYEL François.

⑦③ Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public.*

⑦④ Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

FR 3 107 627 - B1



Description

Titre de l'invention : *Circuit de contrôle d'une photodiode SPAD*

Domaine technique

[0001] La présente description concerne les circuits électroniques de façon générale, et vise plus particulièrement un circuit de contrôle d'une photodiode à avalanche pour la détection de photons uniques, aussi appelée photodiode SPAD (de l'anglais "Single Photon Avalanche Diode").

Technique antérieure

[0002] Une photodiode SPAD est essentiellement constituée par une jonction PN polarisée en inverse à une tension supérieure à son seuil d'avalanche. Lorsqu'aucune charge électrique n'est présente dans la zone de déplétion ou zone de charge d'espace de la jonction PN, la photodiode est dans un état pseudo-stable, non conducteur. Lorsqu'une charge électrique photogénérée est injectée dans la zone de déplétion, si la vitesse de déplacement de cette charge dans la zone de déplétion est suffisamment élevée, c'est-à-dire si le champ électrique dans la zone de déplétion est suffisamment intense, la photodiode est susceptible d'entrer en avalanche. Un seul photon est ainsi capable de générer un signal électrique mesurable, et ce avec un temps de réponse très court. Les photodiodes SPAD permettent de détecter des rayonnements de très faible intensité lumineuse, et sont notamment utilisées pour la détection de photons uniques et le comptage de photons.

[0003] Une photodiode SPAD est classiquement associée à un circuit électronique de contrôle, ayant notamment pour fonction de polariser la jonction PN de la photodiode, de détecter des déclenchements d'avalanche de la photodiode, et d'éteindre – c'est-à-dire interrompre – les avalanches de la photodiode une fois celles-ci déclenchées.

[0004] On s'intéresse ici plus particulièrement à l'implémentation de la fonction d'extinction ("quenching" en anglais) d'une photodiode SPAD.

Résumé de l'invention

[0005] Un mode de réalisation prévoit un circuit de contrôle d'une photodiode SPAD, comportant :

- une première source de courant ;
- un miroir de courant comportant un transistor d'entrée en série avec la première source de courant et un transistor de sortie en série avec la photodiode SPAD ; et
- une deuxième source de courant en série avec le transistor d'entrée du miroir de courant et en parallèle de la première source de courant, la deuxième source de courant étant commandable en alternance dans un état dit inactif dans lequel elle ne délivre pas

de courant, et dans un état dit actif dans lequel elle délivre un courant non nul qui s'additionne, dans le transistor d'entrée du miroir de courant, à un courant délivré par la première source de courant.

- [0006] Selon un mode de réalisation, le circuit de contrôle comporte en outre un circuit de rétroaction configuré pour, après chaque déclenchement d'une avalanche dans la photodiode SPAD, commander la deuxième source de courant à l'état actif pendant une phase de réarmement de la photodiode SPAD, puis commander la deuxième source de courant à l'état inactif jusqu'au prochain déclenchement d'avalanche dans la photodiode SPAD.
- [0007] Selon un mode de réalisation, le circuit de rétroaction est configuré pour introduire un délai prédéterminé entre le déclenchement d'une avalanche et la commande à l'état actif de la deuxième source de courant.
- [0008] Selon un mode de réalisation, le circuit de rétroaction a un nœud d'entrée relié à une électrode d'anode ou de cathode de la photodiode SPAD, et un nœud de sortie relié à un nœud de commande de la deuxième source de courant.
- [0009] Selon un mode de réalisation, le nœud d'entrée du circuit de rétroaction est directement connecté à l'électrode d'anode ou de cathode de la photodiode.
- [0010] Selon un mode de réalisation, le nœud d'entrée du circuit de rétroaction est connecté à ladite électrode d'anode ou de cathode de la photodiode par l'intermédiaire d'une liaison capacitive.
- [0011] Selon un mode de réalisation, le circuit de rétroaction comprend une chaîne d'inverseurs adaptée à propager sur son nœud de sortie un changement d'état d'un potentiel appliqué sur son nœud d'entrée.
- [0012] Selon un mode de réalisation, la chaîne d'inverseurs comprend un circuit d'inversion à retard.
- [0013] Selon un mode de réalisation, le circuit comprend en outre un transistor de rétroaction directe en série avec le transistor d'entrée du miroir de courant et en parallèle des première et deuxième sources de courant, le transistor de rétroaction directe ayant un nœud de commande connecté au nœud d'entrée du circuit de rétroaction.
- [0014] Selon un mode de réalisation, la deuxième source de courant est un transistor MOS commandable à l'état actif et à l'état inactif par l'intermédiaire de sa grille.
- [0015] Selon un mode de réalisation, les transistors d'entrée et de sortie du miroir de courant sont des transistors MOS, les grilles des transistors d'entrée et de sortie du miroir de courant étant connectées l'une à l'autre et le drain et la grille du transistor d'entrée du miroir de courant étant connectés l'un à l'autre.

Brève description des dessins

- [0016] Ces caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres, seront exposés en détail dans la

description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

- [0017] [fig.1] la figure 1 représente de façon schématique et partielle un exemple d'un circuit de contrôle d'une photodiode SPAD ;
- [0018] [fig.2] la figure 2 est un diagramme illustrant le fonctionnement du circuit de la figure 1 ;
- [0019] [fig.3] la figure 3 représente de façon schématique et partielle un exemple d'un circuit de contrôle d'une photodiode SPAD selon un mode de réalisation ;
- [0020] [fig.4] la figure 4 est un diagramme illustrant le fonctionnement du circuit de la figure 3 ;
- [0021] [fig.5] la figure 5 illustre un exemple de réalisation du circuit de contrôle de la figure 3 ;
- [0022] [fig.6] la figure 6 illustre un autre exemple de réalisation du circuit de contrôle de la figure 3 ; et
- [0023] [fig.7] la figure 7 illustre encore un autre exemple de réalisation du circuit de contrôle de la figure 3.

Description des modes de réalisation

- [0024] De mêmes éléments ont été désignés par de mêmes références dans les différentes figures. En particulier, les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différents modes de réalisation peuvent présenter les mêmes références et peuvent disposer de propriétés structurelles, dimensionnelles et matérielles identiques.
- [0025] Par souci de clarté, seuls les étapes et éléments utiles à la compréhension des modes de réalisation décrits ont été représentés et sont détaillés. En particulier, la structure des photodiodes SPAD susceptibles d'être utilisées en combinaison avec les circuits de contrôle décrits n'a pas été détaillée, les modes de réalisation étant compatibles avec toutes ou la plupart des structures de photodiodes SPAD connues. De plus, l'implémentation des fonctions du circuit de contrôle autres que la fonction d'extinction, par exemple la fonction de lecture (détection d'avalanche), la fonction de polarisation, etc., n'a pas été détaillée, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec les implémentations usuelles de ces fonctions.
- [0026] Sauf précision contraire, lorsque l'on fait référence à deux éléments connectés entre eux, cela signifie directement connectés sans éléments intermédiaires autres que des conducteurs, et lorsque l'on fait référence à deux éléments reliés (en anglais "coupled") entre eux, cela signifie que ces deux éléments peuvent être connectés ou être reliés par l'intermédiaire d'un ou plusieurs autres éléments.
- [0027] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.

- [0028] La figure 1 représente de façon schématique et partielle un exemple d'un circuit 100 de contrôle d'une photodiode SPAD PD.
- [0029] Le circuit 100 comprend une source de courant 101, et un miroir de courant ayant une branche d'entrée 103 connectée en série avec la source de courant 101 et une branche de sortie 105 connectée en série avec la photodiode SPAD PD.
- [0030] Plus particulièrement, dans cet exemple, la branche d'entrée 103 du miroir de courant comprend un transistor MOS à canal N 107, aussi appelé transistor d'entrée, dont la source est reliée, par exemple connectée, à un nœud GND d'application d'un potentiel de référence, par exemple la masse, et dont le drain est relié à un nœud d'application d'un potentiel d'alimentation positif VALIM1 par l'intermédiaire de la source de courant 101. Le transistor 107 est monté en diode, c'est-à-dire que son drain et sa grille sont connectés l'un à l'autre. Dans l'exemple représenté, la source de courant 101 a un premier nœud ou nœud d'alimentation a1 relié, par exemple connecté, au nœud VALIM1, et un deuxième nœud ou nœud de sortie a2 relié, par exemple connecté, au drain du transistor 107.
- [0031] Dans l'exemple de la figure 1, la branche de sortie 105 du miroir de courant comprend un transistor MOS à canal N 109, aussi appelé transistor de sortie, dont la source est reliée, par exemple connectée, au nœud GND, et dont le drain est relié, par exemple connecté à un nœud Vm. Le nœud Vm est relié, par exemple connecté, à l'anode de la photodiode SPAD PD. Les grilles des transistors d'entrée 107 et de sortie 109 du miroir de courant sont reliées, par exemple connectées, l'une à l'autre.
- [0032] La cathode de la photodiode SPAD PD est quant à elle reliée, par exemple connectée, à un nœud d'application d'un potentiel de polarisation positif VHV, supérieur à la tension d'avalanche de la photodiode. A titre d'exemple, le potentiel du nœud VHV est supérieur à la tension d'avalanche de la photodiode d'une valeur comprise entre 0,5 et 10 volts. Le potentiel du nœud VHV est par exemple compris entre 10 et 50 volts, par exemple de l'ordre de 25 volts.
- [0033] Le potentiel du nœud VALIM1 peut quant à lui être nettement plus faible, par exemple compris entre 1,8 et 5 volts, par exemple de l'ordre de 3,3 volts.
- [0034] La figure 2 est un diagramme illustrant schématiquement le fonctionnement du circuit de la figure 1. Le diagramme de la figure 2 illustre plus particulièrement l'évolution, en fonction du temps t (en abscisse), du potentiel du nœud Vm (en ordonnée) lors du déclenchement d'une avalanche dans la photodiode PD.
- [0035] A un instant t_0 précédant le déclenchement de l'avalanche, le potentiel du nœud Vm est à un niveau bas, par exemple sensiblement égal au potentiel du nœud GND, par exemple égal à 0 volt. En effet, à ce stade, la photodiode PD est bloquée, et le courant imposé par la source de courant 101, via le miroir de courant, tire le potentiel du nœud Vm sensiblement au potentiel du nœud GND.

- [0036] A un instant t_1 , la photodiode PD entre en avalanche sous l'effet de l'injection d'une charge photogénérée dans sa zone de déplétion. Un fort courant traverse alors la photodiode. Ce courant d'avalanche, très supérieur au courant imposé dans le transistor 109 par la source de courant 101, entraîne une brusque montée du potentiel du nœud V_m . La tension aux bornes de la photodiode SPAD PD passe alors très rapidement sous la tension d'avalanche de la photodiode, ce qui conduit à interrompre l'avalanche. L'implémentation de la fonction de détection de l'avalanche n'a pas été détaillée, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec les circuits usuels de détection d'avalanche. A titre d'exemple, la détection de l'avalanche peut être basée sur une détection de la brusque montée du potentiel du nœud V_m . A titre de variante, la détection de l'avalanche peut être basée sur une détection d'une variation de potentiel du côté de la cathode de la photodiode.
- [0037] Après l'instant t_1 , le potentiel du nœud V_m décroît à nouveau sous l'effet du courant imposé par la source de courant 101, jusqu'à atteindre, à un instant t_2 , un potentiel sensiblement égal à celui du nœud GND. Pendant cette phase, les charges piégées dans la photodiode SPAD PD au moment de l'interruption de l'avalanche sont évacuées vers le nœud de référence. A l'instant t_2 , la photodiode SPAD PD est à nouveau déplétée et polarisée à une tension supérieure à sa tension d'avalanche. Autrement dit, la photodiode SPAD PD est à nouveau prête à entrer en avalanche sous l'effet d'une injection de charge photogénérée dans sa zone de déplétion.
- [0038] La durée de la phase de réarmement de la photodiode, allant de l'instant t_1 à l'instant t_2 , est directement liée à l'intensité du courant I_b délivré par la source de courant 101 et imposé sur le nœud V_m via le miroir de courant. Plus le courant I_b est élevé, plus les charges piégées dans la photodiode au moment de l'interruption de l'avalanche sont évacuées rapidement, et plus la phase de réarmement est brève. Ainsi, plus le courant I_b est élevé, plus le nombre d'évènements pouvant être détecté par le dispositif par unité de temps est élevé. Augmenter le courant I_b conduit cependant à ralentir la montée du potentiel V_m en cas d'avalanche (voire à empêcher la montée du potentiel V_m à une valeur suffisamment élevée pour interrompre l'avalanche dans le cas où la valeur du courant I_b est du même ordre que la valeur du courant d'avalanche ou supérieure à la valeur du courant d'avalanche). Il en résulte une augmentation du temps requis pour détection de l'avalanche, ainsi qu'une augmentation de la consommation électrique, liée au fait que l'avalanche n'est pas interrompue immédiatement après son déclenchement. Un compromis est donc à trouver entre la vitesse de détection des avalanches, la consommation électrique, et la vitesse de réarmement après détection d'une avalanche.
- [0039] La figure 3 représente de façon schématique et partielle un exemple d'un circuit 300 de contrôle d'une photodiode SPAD PD selon un mode de réalisation.

- [0040] Le circuit de contrôle 300 de la figure 3 comprend les mêmes éléments que le circuit de contrôle 100 de la figure 1, agencés sensiblement de la même manière. Ces éléments ne seront pas détaillés à nouveau ci-après.
- [0041] Le circuit de contrôle 300 de la figure 3 comprend en outre une deuxième source de courant 301 connectée en série avec la branche d'entrée 103 du miroir de courant, en parallèle de la source de courant 101. Plus particulièrement, dans cet exemple, la source de courant 301 a un premier nœud ou nœud d'alimentation a1 relié, par exemple connecté, au nœud VALIM1, et un deuxième nœud ou nœud de sortie a2 relié, par exemple connecté, au drain du transistor 107.
- [0042] La source de courant 301 est commandable, pour, dans une première configuration, appelée état inactif, délivrer un courant sensiblement nul, et, dans une deuxième configuration, appelée état actif, délivrer un courant positif I_f , non nul. Lorsque la source de courant 301 est inactive, le courant injecté dans la branche d'entrée 103 du miroir de courant est sensiblement égal au courant I_b délivré par la source de courant 101. Le courant imposé par le miroir de courant sur le nœud V_m est alors lui aussi sensiblement égal au courant I_b . Lorsque la source de courant 301 est active, le courant injecté dans la branche d'entrée 103 du miroir de courant est sensiblement égal à la somme du courant I_b délivré par la source de courant 101 et du courant I_f délivré par la source de courant 301. Le courant imposé par le miroir de courant sur le nœud V_m est alors lui aussi sensiblement égal à la somme des courants I_b et I_f . La source de courant 301 présente un nœud de commande e1 adapté à recevoir un signal de commande pour commander la source 301 à l'état actif ou inactif.
- [0043] Le circuit de contrôle 300 de la figure 3 comprend en outre un circuit de rétroaction 303 ayant un nœud d'entrée e1 relié, par exemple connecté, au nœud V_m et un nœud de sortie e2 relié, par exemple connecté, au nœud de commande e1 de la source de courant 301. Le circuit de rétroaction 303 est configuré pour, en l'absence d'avalanche, commander la source de courant 301 à l'état inactif. En cas d'avalanche, le circuit 303 est adapté à détecter le franchissement d'un seuil de tension V_{TH} prédéterminé par le nœud V_m , puis, après un délai prédéterminé à compter du franchissement du seuil V_{TH} , commander la source de courant 301 à l'état actif. Lorsque la tension sur le nœud V_m redescend sous le seuil V_{TH} , le circuit de rétroaction 303 commande à nouveau la source de courant 301 à l'état inactif, jusqu'à la prochaine avalanche.
- [0044] La figure 4 est un diagramme illustrant schématiquement le fonctionnement du circuit de la figure 3. Le diagramme de la figure 4 illustre plus particulièrement l'évolution, en fonction du temps t (en abscisse), du potentiel du nœud V_m (en ordonnée) lors du déclenchement d'une avalanche dans la photodiode PD.
- [0045] Comme dans l'exemple décrit en relation avec les figures 1 et 2, à un instant t_0 précédant le déclenchement de l'avalanche, le potentiel du nœud V_m est à un niveau

bas, par exemple sensiblement égal au potentiel du nœud GND, par exemple égal à 0 volt. En effet, à ce stade, la photodiode PD est bloquée, et le courant I_b imposé par la source de courant 101, via le miroir de courant, tire le potentiel du nœud V_m sensiblement au potentiel du nœud GND. A ce stade, la source de courant 301 est inactive.

- [0046] A un instant t_1 , la photodiode PD entre en avalanche sous l'effet de l'injection d'une charge photogénérée dans sa zone de déplétion. Un fort courant traverse alors la photodiode. Ce courant d'avalanche, très supérieur au courant I_b imposé dans le transistor 109 par la source de courant 101, entraîne une brusque montée du potentiel du nœud V_m . Le potentiel du nœud V_m passe notamment presque instantanément au-dessus du seuil V_{TH} de déclenchement du circuit de rétroaction 303. La tension aux bornes de la photodiode SPAD PD passe en outre très rapidement sous la tension d'avalanche de la photodiode, ce qui conduit à interrompre l'avalanche.
- [0047] Après un délai prédéfini Δt à compter du franchissement du seuil V_{TH} par le potentiel du nœud V_m , soit à un instant t_2 sensiblement égal à $t_1 + \Delta t$, le circuit de rétroaction 303 commande l'activation de la source de courant 301.
- [0048] Après l'instant t_1 , le potentiel du nœud V_m décroît sous l'effet du courant I_b imposé par la source de courant 101 et le miroir de courant.
- [0049] A partir de l'instant t_2 , le courant I_f fourni par la source de courant 301 s'additionne au courant I_b délivré par la source de courant 101, et le courant imposé par le miroir de courant sur le nœud V_m devient sensiblement égal à la somme des courants I_b et I_f . Il en résulte une accélération de la décroissance du potentiel du nœud V_m .
- [0050] A un instant t_3 postérieur à l'instant t_2 , le potentiel du nœud V_m retombe sous le seuil V_{TH} de déclenchement du circuit de rétroaction 303.
- [0051] Après un délai prédéfini $\Delta t'$ à compter de l'instant t_3 , soit à un instant t_4 sensiblement égal à $t_3 + \Delta t'$, le circuit de rétroaction 303 commande la désactivation de la source de courant 301.
- [0052] Le potentiel du nœud V_m continue alors de décroître, sous l'effet du seul courant I_b , jusqu'à atteindre, à un instant t_5 , un potentiel sensiblement égal à celui du nœud GND.
- [0053] A l'instant t_5 , la photodiode SPAD PD est réarmée, c'est-à-dire à nouveau déplétée et polarisée à une tension supérieure à sa tension d'avalanche, et prête à entrer en avalanche sous l'effet d'une injection de charge photogénérée dans sa zone de déplétion.
- [0054] L'activation de la source de courant 301 après le déclenchement de l'avalanche permet de diminuer la durée de la phase de réarmement de la photodiode (allant dans cet exemple de l'instant t_1 à l'instant t_5) par rapport à l'exemple des figures 1 et 2. De plus, la source de courant 301 étant inactive au début de l'avalanche, la montée du potentiel du nœud V_m à une valeur suffisamment élevée pour interrompre l'avalanche n'est pas ralentie par rapport à l'exemple des figures 1 et 2.

- [0055] Plus généralement, le mode de réalisation décrit en relation avec les figures 3 et 4 permet de bénéficier d'un degré de liberté supplémentaire pour contrôler la durée de la phase de réarmement de la photodiode, ainsi que la forme d'onde appliquée. Ceci permet aux charges accumulées dans la photodiode SPAD lors du déclenchement, d'éventuellement se recombinaisonner, et d'éviter des phénomènes de re-déclenchements parasites liés à la présence de charges résiduelles dans la photodiode SPAD. En effet, lorsque le potentiel du nœud Vm diminue, le champ électrique n'augmente pas nécessairement de façon uniforme à l'intérieur de la photodiode SPAD. Il peut alors se créer localement des poches de potentiel qui retiennent brièvement les charges. Celles-ci peuvent redéclencher une avalanche si le champ électrique augmente trop vite. Il faut donc maîtriser la remontée en champ, en veillant à bien éliminer toutes les charges. En pratique, la forme d'onde à appliquer pourra être adaptée au cas par cas en fonction de la technologie de SPAD considérée.
- [0056] La figure 5 est un schéma électrique illustrant plus en détail un exemple de réalisation du circuit de contrôle 300 de la figure 3. La figure 5 illustre plus particulièrement un exemple de réalisation de la source de courant 101, un exemple de réalisation de la source de courant 301, et un exemple de réalisation du circuit de rétroaction 303 du circuit de contrôle 300 de la figure 3.
- [0057] Dans l'exemple de la figure 5, la source de courant 101 comprend un miroir de courant comprenant un transistor d'entrée 501 et un transistor de sortie 503. Dans l'exemple représenté, les transistors 501 et 503 sont des transistors MOS à canal P. Le transistor 501 a sa source reliée, par exemple connectée, au nœud d'alimentation a1 de la source de courant 101, et son drain relié au nœud GND par l'intermédiaire d'une source de courant 505. La source de courant 505 est par exemple une résistance ayant une première extrémité reliée, par exemple connectée, au drain du transistor 501 et une deuxième extrémité reliée, par exemple connectée, au nœud GND. A titre de variante, la source de courant 505 peut être un transistor MOS ayant un premier nœud de conduction (source ou drain) relié, par exemple connecté, au drain du transistor 501, et un deuxième nœud de conduction (drain ou source) relié, par exemple connecté, au nœud GND. Le transistor 501 est monté en diode, c'est-à-dire que son drain et sa grille sont connectés l'un à l'autre. Dans cet exemple, le transistor 503 a sa source reliée, par exemple connectée, au nœud d'alimentation a1 de la source de courant 101, et son drain relié, par exemple connecté, au nœud de sortie a2 de la source de courant 101. Les grilles des transistors 501 et 503 sont connectées l'une à l'autre.
- [0058] A titre de variante, la source de courant fixe 505 peut être disposée entre la source du transistor 501 et le nœud a1, ou entre le drain du transistor 503 et le nœud a2.
- [0059] Dans l'exemple de la figure 5, la source de courant 301 comprend un transistor MOS 507 relié, par ses nœuds de conduction, respectivement aux nœuds a1 et a2 de la

source de courant 301. Dans l'exemple représenté, le transistor 507 est un transistor MOS à canal P dont la source est reliée, par exemple connecté, au nœud d'alimentation a1 de la source de courant 301, et dont le drain est relié, par exemple connecté, au nœud de sortie a2 de la source de courant 301. La grille du transistor 507 est reliée, par exemple connectée, au nœud de commande e1 de la source de courant 301.

[0060] Dans l'exemple de la figure 5, le circuit de rétroaction 303 comprend trois inverseurs I1, I2 et I3 connectés en série entre le nœud d'entrée e1 et le nœud de sortie e2 du circuit de rétroaction. Le seuil de déclenchement V_{TH} du circuit de rétroaction correspond au seuil de commutation de l'inverseur I1. Lorsque le potentiel du nœud V_m est à un état bas, c'est-à-dire inférieur au seuil V_{TH} , la sortie de l'inverseur I3 est à un état haut, correspondant à un signal de commande à l'état bloqué du transistor 507. Le courant délivré par le transistor 507 est alors sensiblement nul. La source de courant 301 est alors à l'état inactif. Lorsque le potentiel du nœud V_m est à un état haut, c'est-à-dire supérieur au seuil V_{TH} , la sortie de l'inverseur I3 est à un état bas, correspondant à un signal de commande à l'état passant du transistor 507. Le transistor 507 délivre alors un courant fonction de ses dimensions et notamment de sa largeur de canal, correspondant au courant de sortie I_f de la source de courant 301. La source de courant 301 est alors à l'état actif. Le délai Δt entre l'instant de franchissement du seuil V_{TH} par le potentiel du nœud V_m et l'instant d'activation de la source de courant 301 correspond dans cet exemple au temps de propagation de l'état haut du nœud V_m à travers la chaîne d'inverseurs.

[0061] Dans l'exemple représenté, chacun des inverseurs I1, I2 et I3 comprend un transistor MOS à canal P MP en série avec un transistor MOS à canal N MN. Le transistor MP a sa source reliée, par exemple connectée, à un nœud a3 d'application d'un potentiel d'alimentation positif VALIM2, par exemple égal au potentiel VALIM1, et son drain relié, par exemple connecté, au drain du transistor MN. La source du transistor MN est quant à elle reliée, par exemple connectée, au nœud GND. Les grilles des transistors MP et MN sont reliées, par exemple connectées, à un même nœud i1 d'entrée de l'inverseur. Les drains des transistors MP et MN sont quant à eux reliés, par exemple connectés, à un même nœud o1 de sortie de l'inverseur. Le nœud d'entrée i1 de l'inverseur I1 est relié, par exemple connecté, au nœud d'entrée e1 du circuit 303.

[0062] Le nœud de sortie o1 de l'inverseur I1 est relié, par exemple connecté, au nœud d'entrée i1 de l'inverseur I2. Le nœud de sortie o1 de l'inverseur I2 est relié, par exemple connecté, au nœud d'entrée i1 de l'inverseur I3. Le nœud de sortie o1 de l'inverseur I3 est relié, par exemple connecté, au nœud de sortie e2 du circuit 303.

[0063] Le délai Δt entre le passage à l'état haut du potentiel du nœud V_m et l'activation de la source de courant 301 est fixé notamment par les temps de commutation du transistor MN de l'inverseur I1, du transistor MP de l'inverseur I2, et du transistor MN de

l'inverseur I3. Le dimensionnement de ces transistors peut être choisi de façon à obtenir le délai Δt souhaité, notamment pour s'assurer de l'interruption de l'avalanche avant l'activation de la source de courant 301. Les temps de commutation du transistor MP de l'inverseur I1, du transistor MN de l'inverseur I2, et du transistor MP de l'inverseur I3 déterminent quant à eux le délai $\Delta t'$ entre le passage à l'état bas du potentiel du nœud Vm et la désactivation de la source de courant 301. Ce délai peut être différent du délai Δt , par exemple inférieur au délai Δt .

- [0064] Bien entendu, en fonction de la valeur du délai Δt souhaité, le nombre d'inverseurs reliés en série entre les nœuds e1 et e2 du circuit de rétroaction 303 peut être différent de trois. De plus, si le nombre d'inverseurs reliés en série entre les nœuds e1 et e2 du circuit de rétroaction 303 est un nombre pair, le transistor 507 de la source de courant 301 peut être remplacé par un transistor MOS à canal N.
- [0065] La figure 6 est un schéma électrique illustrant un autre exemple de réalisation du circuit de contrôle 300 de la figure 3. Le circuit de contrôle 300 de la figure 6 diffère du circuit de contrôle 300 de la figure 5 essentiellement par l'implémentation du circuit de rétroaction 303.
- [0066] Plus particulièrement, le circuit de rétroaction 303 de la figure 6 diffère du circuit de rétroaction 303 de la figure 5 en ce que, dans l'exemple de la figure 6, l'inverseur I1 du circuit de rétroaction 303 de la figure 5 est remplacé par un circuit d'inversion à retard ID1.
- [0067] Le circuit ID1 comprend un miroir de courant comprenant un transistor d'entrée 601 et un transistor de sortie 603. Dans l'exemple représenté, les transistors 601 et 603 sont des transistors MOS à canal N. Le transistor 601 a sa source reliée, par exemple connectée, au nœud GND, et son drain relié au nœud d'alimentation a3 par l'intermédiaire d'une source de courant 605. La source de courant 605 est par exemple une résistance ayant une première extrémité reliée, par exemple connectée au drain du transistor 601 et une deuxième extrémité reliée, par exemple connectée au nœud a3. A titre de variante, la source de courant 605 peut être un transistor MOS ayant un premier nœud de conduction (source ou drain) relié, par exemple connecté, au drain du transistor 601, et un deuxième nœud de conduction (drain ou source) relié, par exemple connecté, au nœud a3. Le transistor 601 est monté en diode, c'est-à-dire que son drain et sa grille sont connectés l'un à l'autre.
- [0068] Dans cet exemple, le transistor 603 a sa source reliée, par exemple connectée, au nœud GND, et son drain relié au nœud a3 par l'intermédiaire d'un transistor MOS à canal P 607. Plus particulièrement, dans cet exemple, le transistor 607 a sa source reliée, par exemple connectée, au nœud a3 et son drain relié, par exemple connecté, au drain du transistor 603.
- [0069] Les grilles des transistors 601 et 603 sont connectées l'une à l'autre.

- [0070] De plus, dans cet exemple, la grille du transistor 607 est reliée, par exemple connectée, au nœud d'entrée e1 du circuit de rétroaction 303. Les drains des transistors 607 et 603 sont quant à eux reliés, par exemple connectés, au nœud d'entrée i1 de l'inverseur I2.
- [0071] Le fonctionnement du circuit de rétroaction 303 de la figure 6 est similaire à celui du circuit de rétroaction 303 de la figure 5, à ceci près que, dans l'exemple de la figure 6, lorsque le potentiel du nœud Vm passe de l'état bas (inférieur au seuil VTH) à l'état haut (supérieur au seuil VTH), le courant dans le transistor 603 est limité à une valeur imposée par la source de courant 605. Un délai est ainsi introduit entre l'instant de commutation du potentiel du nœud Vm de l'état bas à l'état haut, et l'instant de passage du potentiel du nœud d'entrée i1 de l'inverseur I2 de l'état haut à l'état bas. Ce délai est d'autant plus long que le courant fixé par la source de courant 605 est faible.
- [0072] La figure 7 est un schéma électrique illustrant un autre exemple de réalisation du circuit de contrôle 300 de la figure 3. Le circuit de contrôle 300 de la figure 7 comprend les mêmes éléments que le circuit de contrôle de la figure 6, agencés sensiblement de la même manière.
- [0073] Le circuit de contrôle 300 de la figure 7 diffère du circuit de contrôle 300 de la figure 6 en ce qu'il comprend en outre un transistor MOS 701 connecté en série avec la branche d'entrée 103 du miroir de courant formé par les transistors 107 et 109, en parallèle des sources de courant 101 et 301. Plus particulièrement, dans cet exemple, le transistor 701 est un transistor à canal N dont le drain est relié, par exemple connecté, au nœud d'alimentation a1 de la source de courant 101, et dont la source est reliée, par exemple connectée, au nœud de sortie a2 de la source de courant 101. La grille du transistor 701 est connectée au nœud Vm.
- [0074] Le transistor 701 est commandé à l'état passant lorsque le potentiel sur le nœud Vm est à un état haut, et à l'état bloqué lorsque le potentiel sur le nœud Vm est à un état bas. Ainsi, le transistor 701 est commandé par rétroaction directe (sans délai) en fonction du potentiel du nœud Vm. Ceci permet d'accélérer l'évacuation des charges piégées dans la photodiode PD au début de la phase de réarmement de la photodiode. Plus particulièrement, le courant dans le transistor 701 augmente brusquement lors du déclenchement de la photodiode SPAD, puis diminue après le blocage de la photodiode SPAD, lors de la redescende du potentiel du nœud Vm. La source de courant 301 et le circuit de rétroaction 303 permettent, après un délai Δt fixé par le circuit 303, de réaugmenter le courant de réarmement de la photodiode SPAD.
- [0075] On notera qu'un transistor de rétroaction directe tel que le transistor 701 décrit dans l'exemple de la figure 7 peut être prévu quelle que soit l'implémentation retenue du circuit de rétroaction 303, par exemple avec l'implémentation du circuit 303 décrite en relation avec la figure 5.

- [0076] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. La personne du métier comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à la personne du métier. En particulier, les modes de réalisation décrits ne se limitent pas aux exemples décrits ci-dessus d'implémentation du circuit de rétroaction 303. Plus généralement, la personne du métier saura prévoir d'autres réalisations du circuit 303 adaptées à commander l'activation de la source de courant 301 après un délai Δt à compter du déclenchement d'une avalanche.
- [0077] En outre, bien que l'on ait représenté sur les figures uniquement des exemples de réalisation dans lesquels le nœud d'entrée du circuit de rétroaction 303 est directement connecté à l'anode de la photodiode SPAD PD, les modes de réalisation décrits ne se limitent pas à ce cas particulier. A titre de variante, le nœud d'entrée e1 du circuit de rétroaction 303 peut être relié à l'anode de la photodiode SPAD PD par l'intermédiaire d'une liaison capacitive.
- [0078] Dans une autre variante, le nœud d'entrée e1 du circuit de rétroaction 303 peut être relié non pas à l'anode mais à la cathode de la photodiode SPAD PD. A titre d'exemple, la cathode de la photodiode SPAD peut être reliée au nœud d'application du potentiel VHV par l'intermédiaire d'un élément résistif (par exemple une résistance), et le nœud d'entrée e1 du circuit de rétroaction 303 peut être relié à un nœud intermédiaire entre l'élément résistif et la cathode de la photodiode par l'intermédiaire d'un élément capacitif (par exemple un condensateur).
- [0079] De plus, les modes de réalisation décrits ne se limitent pas aux exemples décrits ci-dessus de réalisation de la source de courant 101 et de la source de courant commandable 301.
- [0080] On notera en particulier qu'en variante, tous les types de conductivité des transistors MOS des circuits décrits, peuvent être inversés, avec les circuits 303, 301 et, le cas échéant, 701, reliés, par exemple connectés, non plus à l'anode mais à la cathode de la photodiode SPAD PD. Dans ce cas, les tensions VHV, VALIM1 et VALIM2 peuvent être des tensions négatives (référencées par rapport au potentiel du nœud GND).
- [0081] On notera par ailleurs que le transistor 109 peut être cascodé avec un ou plusieurs autres transistors. Dans ce cas, le nœud Vm peut, de façon préférentielle, correspondre au nœud de drain du transistor 109.

Revendications

- [Revendication 1] Circuit (300) de contrôle d'une photodiode SPAD, comportant :
- une première source de courant (101) ;
 - un miroir de courant comportant un transistor d'entrée (107) en série avec la première source de courant (101) et un transistor de sortie (109) en série avec la photodiode SPAD (PD) ; et
 - une deuxième source de courant (301) en série avec le transistor d'entrée (107) du miroir de courant et en parallèle de la première source de courant (101), la deuxième source de courant (301) étant commandable en alternance dans un état dit inactif dans lequel elle ne délivre pas de courant, et dans un état dit actif dans lequel elle délivre un courant (I_f) non nul qui s'additionne, dans le transistor d'entrée (107) du miroir de courant, à un courant (I_b) délivré par la première source de courant (101).
- [Revendication 2] Circuit (300) selon la revendication 1, comportant en outre un circuit de rétroaction (303) configuré pour, après chaque déclenchement d'une avalanche dans la photodiode SPAD, commander la deuxième source de courant (301) à l'état actif pendant une phase de réarmement de la photodiode SPAD, puis commander la deuxième source de courant (301) à l'état inactif jusqu'au prochain déclenchement d'avalanche dans la photodiode SPAD.
- [Revendication 3] Circuit (300) selon la revendication 2, dans lequel le circuit de rétroaction (303) est configuré pour introduire un délai (Δt) prédéterminé entre le déclenchement d'une avalanche et la commande à l'état actif de la deuxième source de courant (301).
- [Revendication 4] Circuit (300) selon la revendication 2 ou 3, dans lequel le circuit de rétroaction (303) a un nœud d'entrée (e1) relié à une électrode d'anode ou de cathode de la photodiode SPAD, et un nœud de sortie (e2) relié à un nœud de commande (e1) de la deuxième source de courant (301).
- [Revendication 5] Circuit (300) selon la revendication 4, dans lequel le nœud d'entrée (e1) du circuit de rétroaction (303) est directement connecté à ladite électrode d'anode ou de cathode de la photodiode.
- [Revendication 6] Circuit (300) selon la revendication 4, dans lequel le nœud d'entrée (e1) du circuit de rétroaction (303) est connecté à ladite électrode d'anode ou de cathode de la photodiode par l'intermédiaire d'une liaison capacitive.
- [Revendication 7] Circuit (300) selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, dans lequel le circuit de rétroaction (303) comprend une chaîne d'inverseurs

- (ID1 ; I1, I2, I3) adaptée à propager sur son nœud de sortie (e2) un changement d'état d'un potentiel appliqué sur son nœud d'entrée (e1).
- [Revendication 8] Circuit (300) selon la revendication 7, dans lequel la chaîne d'inverseurs comprend un circuit d'inversion à retard (ID1).
- [Revendication 9] Circuit (300) selon l'une quelconque des revendications 4 à 8, comprenant en outre un transistor de rétroaction directe (701) en série avec le transistor d'entrée (107) du miroir de courant et en parallèle des première (101) et deuxième (301) sources de courant, ledit transistor de rétroaction directe (701) ayant un nœud de commande connecté au nœud d'entrée (e1) du circuit de rétroaction (303).
- [Revendication 10] Circuit (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel la deuxième source de courant (301) est un transistor MOS (507) commandable à l'état actif et à l'état inactif par l'intermédiaire de sa grille.
- [Revendication 11] Circuit (300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans lequel les transistors d'entrée (107) et de sortie (109) du miroir de courant sont des transistors MOS, les grilles des transistors d'entrée (107) et de sortie (109) du miroir de courant étant connectées l'une à l'autre et le drain et la grille du transistor d'entrée (107) du miroir de courant étant connectés l'un à l'autre.

[Fig. 1]

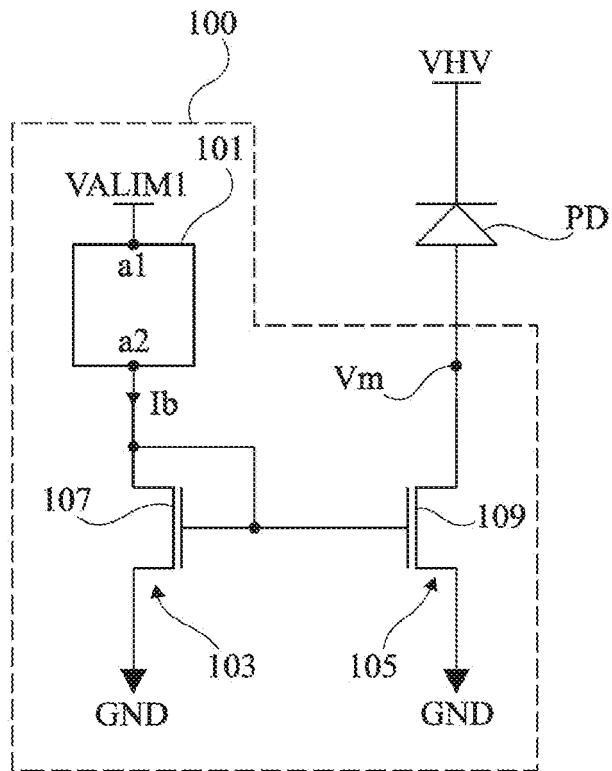


Fig 1

[Fig. 2]

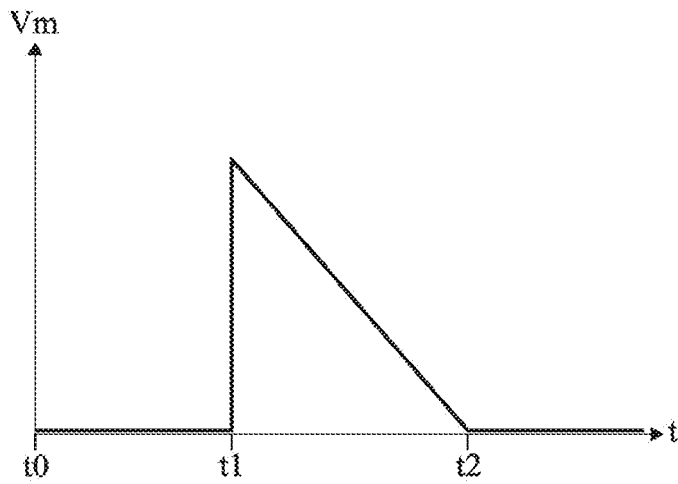


Fig 2

[Fig. 3]

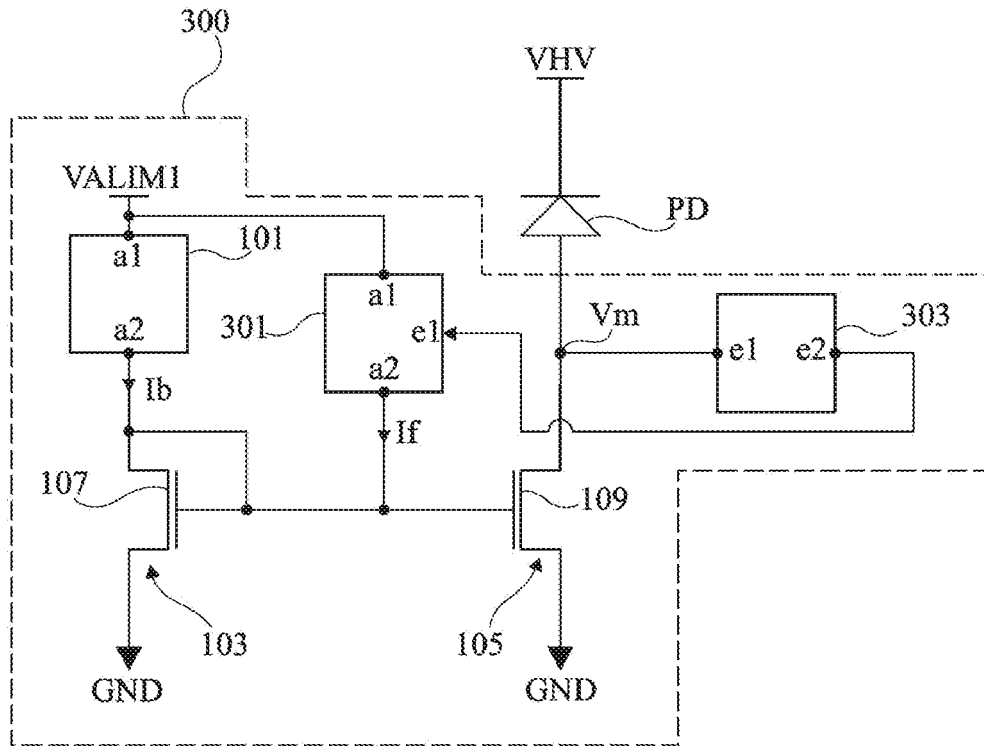


Fig 3

[Fig. 4]

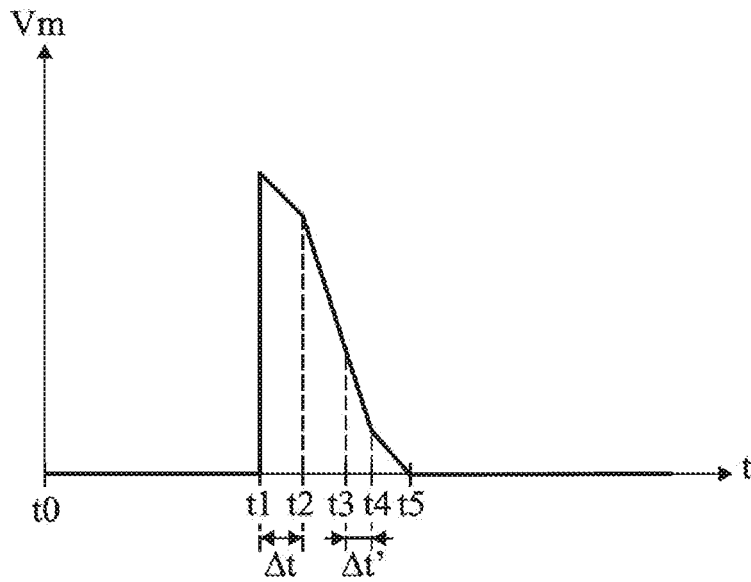


Fig 4

[Fig. 7]

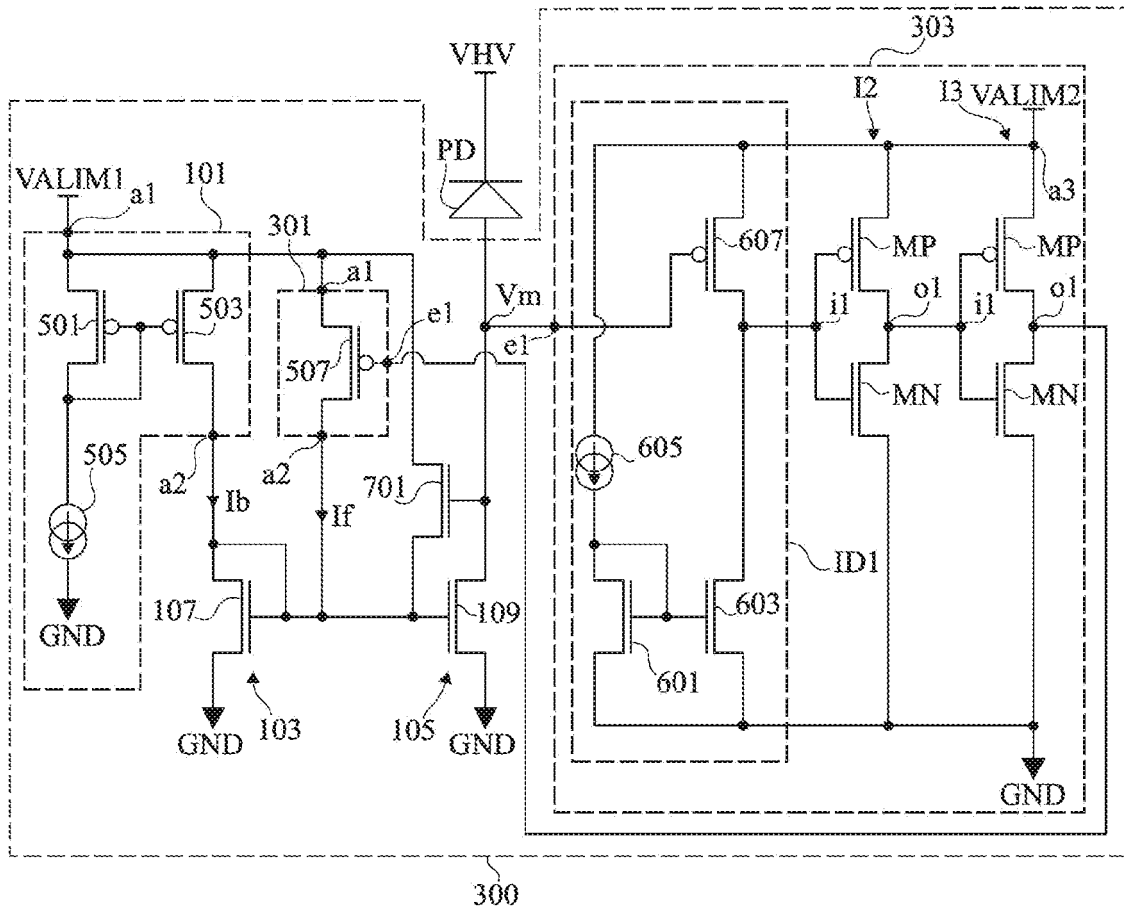


Fig 7

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

NEANT

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

US 2006/027736 A1 (ICHINO MORIYASU [JP] ET AL) 9 février 2006 (2006-02-09)

YU YUE ET AL: "A Review of Quenching Circuit Design Based on Geiger-Mode APD", 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION (ICMA), IEEE, 5 août 2018 (2018-08-05), pages 28-33, XP033416009, DOI: 10.1109/ICMA.2018.8484615 ISBN: 978-1-5386-6074-4 [extrait le 2018-10-05]

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

NEANT