

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 30.03.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 04.10.24 Bulletin 24/40.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : STMicroelectronics International N.V.
Société de droit néerlandais — CH.

72 Inventeur(s) : BIANCHINI Raffaele, BIANCHI Raul
Andres et AL-RAWHANI Mohammed.

73 Titulaire(s) : STMicroelectronics International N.V.
Société de droit néerlandais.

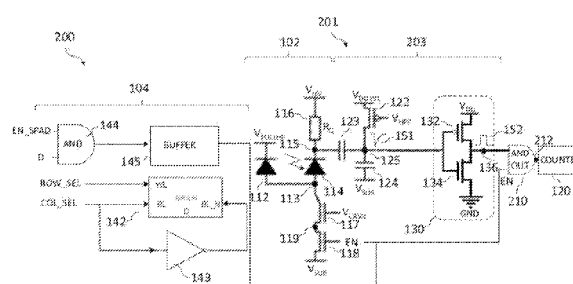
74 Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

54 Pixel à photodiode à avalanche.

57 Pixel à photodiode à avalanche

La présente description concerne un pixel à photodiode à avalanche (201) comprenant : - un transistor (118) adapté à être commandé par un signal d'activation (EN) ayant un premier état pour commander l'activation du pixel et un deuxième état pour commander la désactivation du pixel, le transistor étant configuré pour relier une photodiode à avalanche (114) du pixel à un nœud d'application d'une tension de substrat (VSUB) lorsque le signal d'activation est dans le premier état ; et - un circuit de sortie (210) adapté à être commandé par le signal d'activation et configuré pour fournir un signal de sortie du pixel (152) lorsque le signal d'activation est dans le premier état et pour bloquer le signal de sortie du pixel lorsque le signal d'activation est dans le deuxième état.

Figure pour l'abrégié : Fig. 2



Description

Titre de l'invention : Pixel à photodiode à avalanche

Domaine technique

- [0001] La présente description concerne de façon générale le domaine de matrices de pixels à APD (de l'anglais "Avalanche PhotoDiode", photodiode à avalanche) et en particulier de matrices de pixels à SPAD (de l'anglais "Single-Photon Avalanche Diode", photodiode à avalanche à photon unique).

Technique antérieure

- [0002] Une SPAD, comme une APD, exploite le courant d'une avalanche déclenchée par des photons d'une jonction P-N polarisée en inverse pour détecter une radiation incidente. La différence essentielle entre une SPAD et une APD réside en ce qu'une SPAD est spécifiquement conçue pour fonctionner avec une tension de polarisation inverse supérieure à la tension de claquage, alors qu'une APD fonctionne à une polarisation inférieure à la tension de claquage. Dans une SPAD, un seul porteur photogénéré peut déclencher une avalanche dans la zone désertée par effet d'ionisation par impact. La SPAD est ensuite à l'état Geiger, ou en mode Geiger. Dans une SPAD ou une APD, à chaque fois qu'un photon est absorbé par une région active de la photodiode, une décharge rapide est déclenchée. Les décharges sont comptées en utilisant une (ou une pluralité de) compteur(s).
- [0003] Des photodiodes à avalanche sont généralement incorporées dans des dispositifs électroniques. Un dispositif électronique peut comprendre plusieurs pixels comprenant chacun au moins une photodiode à avalanche. Par exemple, un capteur d'image peut comporter une matrice de pixels, comprenant chacune au moins une photodiode à avalanche qui permet au capteur d'image d'obtenir une image d'une scène à un instant donné. L'image est généralement constituée d'une matrice de pixels, chaque pixel comprenant au moins une photodiode à avalanche.
- [0004] Une telle matrice de pixels peut être utilisée pour une multitude d'applications, incluant par exemple la télémétrie (en anglais "ranging"), l'imagerie 2D ou 3D, la cartographie de profondeur, ou la télédétection par laser (LiDAR, pour "light detection and ranging en anglais").
- [0005] Un dispositif électronique pour de telles applications peuvent comprendre une source de lumière pour émettre une impulsion lumineuse dans la scène d'image. La lumière réfléchiée en retour par un quelconque objet dans la scène d'image est détectée par les photodiodes dans les pixels, et utilisée pour déterminer le temps de vol de l'impulsion lumineuse. La distance allant de l'objet au dispositif électronique peut alors être déduite sur la base de ce temps de vol. La détection par les photodiodes de l'impulsion

lumineuse de retour peut être basée sur un comptage de décharge. En particulier, chaque photodiode peut fournir un compte de décharge ("discharge count", en anglais) lorsqu'un photon est détecté, et en surveillant les comptes de décharge, le temps d'arrivée de l'impulsion lumineuse de retour peut être estimé.

- [0006] De grandes matrices de photodiodes à avalanche peuvent inclure bien plus, par exemple de l'ordre de dix fois ou même d'une centaine de fois plus, de pixels que de compteurs. Les pixels d'une matrice peuvent être répartis en différents sous-ensembles (ou sous-régions) de pixels, chaque sous-ensemble (ou sous-région) devant être relié(e) à un compteur commun, par exemple au moyen d'un arbre OU (en anglais "OR tree"), et les pixels du sous-ensemble peuvent être activés l'un après l'autre pour avoir un seul pixel relié à la fois au même compteur, alors que les autres pixels du sous-ensemble doivent de préférence être désactivés.

Résumé de l'invention

- [0007] Il existe un besoin de pouvoir de façon certaine désactiver chaque pixel, par exemple pour éviter de compromettre le comptage dans un sous-ensemble (ou une sous-région) de pixels par un compteur qui est commun à tous les pixels du sous-ensemble.
- [0008] Un mode de réalisation pallie tout ou partie des inconvénients des pixels à photodiodes à avalanche connus.
- [0009] Un mode de réalisation prévoit un pixel à photodiode à avalanche comprenant :
- un transistor adapté à être commandé par un signal d'activation ayant un premier état pour commander l'activation du pixel et un deuxième état pour commander la désactivation du pixel, le transistor étant configuré pour relier une photodiode à avalanche du pixel à un nœud d'application d'une tension de substrat lorsque le signal d'activation est dans le premier état ; et
 - un circuit de sortie adapté à être commandé par le signal d'activation et configuré pour fournir un signal de sortie du pixel lorsque le signal d'activation est dans le premier état et pour bloquer le signal de sortie du pixel lorsque le signal d'activation est dans le deuxième état.
- [0010] Selon un mode de réalisation, le signal d'activation est une tension d'activation.
- [0011] Selon un mode de réalisation, le pixel à photodiode à avalanche comprend en outre un circuit de détection relié à la photodiode à avalanche et configuré pour générer le signal de sortie du pixel.
- [0012] Selon un mode de réalisation, le circuit de détection comprend un inverseur, par exemple configuré pour convertir un signal analogique généré par la photodiode à avalanche en un signal numérique pour générer le signal de sortie du pixel.
- [0013] Selon un mode de réalisation, le circuit de sortie comprend une porte ET de sortie comprenant un premier nœud d'entrée auquel le signal de sortie du pixel est adapté à

être appliqué, un deuxième nœud d'entrée auquel le signal d'activation est adapté à être appliqué, le nœud de sortie de la porte ET de sortie étant relié, ou correspondant, à un nœud de sortie du pixel.

[0014] Selon un mode de réalisation, le premier nœud d'entrée de la porte ET de sortie est relié, par exemple connecté, à un nœud de sortie de l'inverseur.

[0015] Selon un mode de réalisation, l'inverseur est adapté à être alimenté par une tension d'alimentation dédiée.

[0016] Selon un mode de réalisation, le circuit de sortie comprend l'inverseur, l'inverseur étant adapté à être commandé par le signal d'activation, par exemple le signal d'activation étant appliqué à un nœud d'application d'une tension d'alimentation de l'inverseur.

[0017] Selon un mode de réalisation, un nœud de sortie de l'inverseur est relié, ou correspond, à un nœud de sortie du pixel.

[0018] Selon un mode de réalisation, le circuit de sortie est relié, par exemple connecté, à un compteur, par exemple le compteur étant configuré pour intégrer le signal de sortie du pixel lorsque le signal d'activation est dans le premier état.

[0019] Selon un mode de réalisation, le pixel à photodiode à avalanche comprend en outre un autre inverseur entre l'inverseur et le nœud de sortie du circuit de détection.

[0020] Selon un mode de réalisation, le pixel à photodiode à avalanche comprend en outre un tampon adapté à augmenter la puissance du signal d'activation.

[0021] Un mode de réalisation prévoit une matrice de pixels comprenant une pluralité de pixels à photodiode à avalanche tels que les pixels à photodiode à avalanche décrits ci-dessus, dans laquelle les pixels à photodiode à avalanche sont organisés en différentes sous-régions de pixels à photodiode à avalanche, les pixels à photodiode à avalanche de la même sous-région étant reliés à un compteur commun.

[0022] Selon un mode de réalisation, la matrice comprend en outre un circuit de sélection configuré pour adresser sélectivement le signal d'activation à un pixel à photodiode à avalanche parmi les pixels à photodiode à avalanche d'une sous-région, le circuit de sélection comprenant un nœud de sortie relié au moins au transistor du pixel à photodiode à avalanche.

[0023] Selon un mode de réalisation, le nœud de sortie du circuit de sélection est également relié ou connecté au deuxième nœud d'entrée de la porte ET de sortie.

[0024] Selon un mode de réalisation, le nœud de sortie du circuit de sélection est également relié ou connecté à un nœud d'application d'une alimentation de l'inverseur.

[0025] Selon un mode de réalisation, le tampon est inclus dans le circuit de sélection.

Brève description des dessins

[0026] 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 :

- [0027] la [Fig.1] représente un exemple d'une partie d'une matrice SPAD ;
- [0028] la [Fig.2] représente une partie d'une matrice SPAD comprenant un pixel SPAD selon un mode de réalisation ; et
- [0029] la [Fig.3] représente une partie d'une matrice SPAD comprenant un pixel SPAD selon un autre mode de réalisation.

Description des modes de réalisation

- [0030] 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.
- [0031] 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 mise en œuvre d'un capteur d'image comprenant une source de lumière et une pluralité de pixels, chacun ayant une photodiode à avalanche, n'a pas été décrite en détail, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec des capteurs d'image classiques. Plus généralement, les nombreuses applications dans lesquelles une ou plusieurs photodiodes à avalanche sont prévues pour détecter des photons n'ont pas été décrites en détail, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec des applications classiques de ces photodiodes. En outre, les mises en œuvre pratiques d'une photodiode adaptée à être utilisée en tant que photodiode à avalanche n'ont pas été décrites en détail, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec les mises en œuvre classiques d'une photodiode adaptée à être utilisée en tant que photodiode à avalanche.
- [0032] 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.
- [0033] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à des qualificatifs de position absolue, tels que les termes "avant", "arrière", "haut", "bas", "gauche", "droite", etc., ou relative, tels que les termes "dessus", "dessous", "supérieur", "inférieur", etc., ou à des qualificatifs d'orientation, tels que les termes "horizontal", "vertical", etc., il est fait référence sauf précision contraire à l'orientation des figures.
- [0034] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.
- [0035] Dans la description qui suit, un pixel, ou un pixel APD, désigne un pixel à

photodiode à avalanche, par exemple un pixel à SPAD qui peut être désigné par raccourci par pixel SPAD. Une matrice à SPAD peut être désignée par matrice SPAD.

- [0036] Dans la description qui suit, un premier état du signal d'activation correspond à un état, par exemple un état haut, qui est adapté pour activer un pixel, alors que le deuxième état du signal d'activation correspond à un état, par exemple un état bas, qui est adapté pour désactiver le pixel. Les premier et deuxième états correspondent par exemple à différents niveaux de tension, par exemple respectivement une première tension (haute) et une deuxième tension (basse), inférieure à la première tension.
- [0037] La [Fig.1] représente un exemple d'une partie d'une matrice SPAD 100. La matrice SPAD 100 comporte une pluralité de différentes sous-régions de pixels SPAD, chaque sous-région étant reliée à un compteur commun 120, par exemple au moyen d'un arbre OU (non représenté). Les pixels SPAD de la sous-région peuvent être activés l'un après l'autre pour avoir un seul pixel SPAD actif à la fois relié au même compteur, alors que les autres pixels SPAD de la sous-région doivent de préférence être désactivés. Un seul pixel SPAD d'une sous-région est représenté en [Fig.1].
- [0038] Plus particulièrement, la [Fig.1] représente un exemple d'un circuit SPAD 102 et d'un circuit de détection 103 dans un pixel SPAD 101, et un circuit de sélection 104 configuré pour activer sélectivement un pixel SPAD, par exemple le pixel SPAD 101, dans une sous-région de la matrice SPAD 100.
- [0039] Le circuit SPAD 102 comprend, dans l'exemple de la [Fig.1], une diode de protection 112 et une photodiode SPAD 114. La diode de protection 112 est également appelée diode "de mise à niveau haut" (en anglais "pull-up" diode), ou diode de "verrouillage" (en anglais "clamp" diode). La diode de protection 112 est reliée, de préférence connectée, entre un nœud d'application d'une tension de mise à niveau haut, ou pull-up, (V_{PULLUP}) et un premier nœud 113. L'anode de la diode 112 est reliée, de préférence connectée, au premier nœud 113 et la cathode de la diode 112 est reliée, de préférence connectée, au nœud V_{PULLUP} .
- [0040] La diode de protection 112 est une diode de désactivation, permettant de maintenir le nœud d'anode de la photodiode SPAD 114 à une valeur de tension intermédiaire entre une tension haute (V_{HV}) et une tension basse (V_{SUB}), par exemple égale à environ 7 V ou 8 V, lorsque la photodiode SPAD 114 est bloquée. Par exemple, la tension de mise à niveau haut V_{PULLUP} a une valeur supérieure d'au moins 2 V à la polarisation en excès appliquée à la SPAD au-delà de la tension de claquage.
- [0041] La photodiode SPAD 114 est reliée, de préférence connectée, entre le premier nœud 113 et un deuxième nœud 115. La cathode de la photodiode SPAD 114 est reliée, de préférence connectée, au deuxième nœud 115 et l'anode de la photodiode SPAD 114 est reliée, de préférence connectée, au premier nœud 113.
- [0042] Le circuit SPAD 102 comprend en outre une résistance d'extinction 116 (R_Q), en

anglais "quench resistance", reliée, de préférence connectée, entre le deuxième nœud 115 et un nœud d'application d'une tension (V_{HV}), par exemple une tension haute, par exemple une tension supérieure ou égale à la tension de claquage de la diode, qui est typiquement comprise entre 10 V et 40 V.

- [0043] Le circuit SPAD 102 comprend en outre un transistor d'activation 118 et un transistor monté en cascode 117, en anglais "cascode-mounted transistor", les transistors 117, 118 étant reliés, de préférence connectés, en série entre un nœud d'application d'une tension basse (V_{SUB}), par exemple la masse, et le premier nœud 113. Plus particulièrement, le transistor monté en cascode 117 est relié, de préférence connecté, par ses bornes de conduction, par exemple ses drain et source, entre le premier nœud 113 et un troisième nœud 119. Le transistor d'activation 118 est relié, de préférence connecté, par ses bornes de conduction, par exemple ses drain et source, entre le troisième nœud 119 et le nœud V_{SUB} .
- [0044] La tension basse V_{SUB} correspond de préférence à la tension du substrat sur et dans lequel la photodiode, et les circuits associés, sont formés, et peut être appelée "tension de substrat". Le substrat peut être relié à la masse, et la tension basse peut être sensiblement égale à 0 V.
- [0045] Les transistors 117 et 118 sont de préférence des transistors MOS à effet de champ de type N.
- [0046] Le transistor monté en cascode 117 est polarisé par une tension V_{CASN} , qui est une tension déterminée et, de préférence, a une valeur intermédiaire entre la tension haute V_{HV} et la tension basse V_{SUB} , alors que le transistor d'activation 118 est polarisé par un signal d'activation EN, par exemple une tension d'activation. La tension V_{CASN} est par exemple comprise entre 1 V et 2,5 V.
- [0047] Lorsque le signal d'activation EN est dans le premier état, par exemple a une tension haute d'environ 1,1 V, le transistor d'activation 118 devient passant, reliant l'anode de la SPAD 114 à la tension basse V_{SUB} , par exemple la masse, plaçant la tension de polarisation inverse de la SPAD 114 au-dessus de la tension de claquage, alors que la diode de protection 112 déconnecte l'anode de la SPAD 114 de la tension de mise à niveau haut V_{PULLUP} . Lorsqu'un photon arrivant frappe la SPAD 114, sa tension de cathode diminue entre la tension haute V_{HV} et une tension plus faible, créant une impulsion de courant qui est recueillie par le circuit de détection 103. L'avalanche peut être éteinte par la résistance d'extinction 116, réinitialisant la SPAD 114 pour une nouvelle détection. Lorsque la fonction d'activation/désactivation fonctionne correctement, et que le signal d'activation EN est dans le deuxième état, par exemple a une tension basse d'environ 0 V, le transistor d'activation 118 est adapté pour déconnecter l'anode de la SPAD 114 de la tension basse V_{SUB} , l'anode de la SPAD 114 étant alors reliée à la tension de mise à niveau haut V_{PULLUP} et la SPAD 114 est désactivée.

- [0048] Le transistor d'activation 118 peut former un circuit d'activation/désactivation, par exemple en combinaison avec le transistor monté en cascode 117.
- [0049] L'intérêt d'avoir une tension déterminée V_{CASN} est de polariser le transistor monté en cascode 117 de sorte qu'il limite l'afflux de courant dans le transistor d'activation 118 pendant l'avalanche, protégeant le transistor 118 contre des dégâts.
- [0050] L'intérêt d'avoir une tension de mise à niveau haut intermédiaire V_{PULLUP} peut également être de protéger le transistor d'activation 118 lorsque le signal d'activation EN est dans le deuxième état, car alors le premier nœud 113 est un nœud flottant, c'est-à-dire non connecté à la tension basse V_{SUB} .
- [0051] Le circuit de détection 103 comprend un transistor filtre passe-haut 122 relié, de préférence connecté, par ses bornes de conduction, par exemple ses drain et source, entre un nœud d'application d'une tension d'alimentation (V_{DDIV1}) et le deuxième nœud 115, par exemple au moyen d'un quatrième nœud 125 entre le transistor filtre passe-haut 122 et le deuxième nœud 115. Un nœud de tension de polarisation (V_{HPF}) est relié, de préférence connecté, à la grille du transistor 122. Le transistor 122 est de préférence un transistor MOS à effet de champ du type P. La tension V_{DDIV1} est par exemple comprise entre 0,9 V et 1,3 V. La tension V_{HPF} est par exemple comprise entre 0 V et V_{DDIV1} .
- [0052] Le circuit de détection 103 peut en outre comprendre des éléments capacitifs, par exemple des premier et deuxième condensateurs 123, 124. Le premier condensateur 123 peut être relié, de préférence connecté, entre le deuxième nœud 115 et le quatrième nœud 125, qui peut être appelé "nœud mobile". Le deuxième condensateur 124 peut être relié, de préférence connecté, entre le quatrième nœud 125 et un nœud d'application de la tension basse V_{SUB} .
- [0053] Le circuit de détection 103 comprend également un inverseur 130 relié, de préférence connecté, entre le quatrième nœud 125 et un nœud de sortie 136 (nœud de sortie de l'inverseur). L'inverseur 130 comprend typiquement un transistor MOS à effet de champ du type P 132 en série avec un transistor MOS à effet de champ du type N 134. Le transistor du type P 132 est relié, de préférence connecté, par ses bornes de conduction, par exemple ses drain et source, entre un nœud d'application d'une tension d'alimentation V_{DD} et le nœud de sortie 136. Le transistor du type N 134 est relié, de préférence connecté, par ses bornes de conduction, par exemple ses drain et source, entre le nœud de sortie 136 et un nœud d'application d'une tension basse, par exemple la masse GND. Les grilles des transistors 132, 134 sont reliées, de préférence connectées, au quatrième nœud 125.
- [0054] Lorsqu'une avalanche se produit dans la photodiode SPAD 114, la tension au niveau du quatrième nœud 125 diminue, et le transistor filtre passe-haut 122 augmente la tension au niveau du nœud 125 après l'avalanche, conduisant à un signal de tension en

forme de V 151 (signal analogique), comme cela est illustré au niveau du quatrième nœud 125 en [Fig.1]. L'inverseur 130 convertit ensuite le signal de tension en forme de V 151 en un signal d'impulsion 152 (signal numérique), comme cela est représenté au niveau du nœud de sortie 136 en [Fig.1]. Le signal d'impulsion peut ensuite être appliqué à un compteur 120 (COUNTER), de préférence un compteur numérique, qui est relié au nœud de sortie 136 de l'inverseur. En [Fig.1], le nœud de sortie 136 correspond à un nœud de sortie du pixel SPAD 101 (nœud de sortie du pixel), et le signal d'impulsion 152 constitue un signal numérique de sortie du pixel qui peut ensuite être intégré par le compteur 120.

[0055] Par conséquent, le pixel SPAD 101 alimente un compteur 120.

[0056] Le circuit de sélection 104 du pixel SPAD 101 de la matrice SPAD 100 comprend un registre, ou mémoire, 142 (SRAM) stockant une valeur binaire, ou donnée D, associée au pixel SPAD.

[0057] Le registre 142 reçoit un signal de sélection de colonne COL_SEL provenant d'un circuit de sélection de colonne SPAD (non représenté en [Fig.1]) et un signal de sélection de ligne ROW_SEL provenant d'un circuit de sélection de ligne SPAD (également non représenté en [Fig.1]). Par exemple, le registre 142 est configuré pour programmer la valeur D avec la valeur du signal de sélection de colonne COL_SEL lorsque le signal de sélection de ligne ROW_SEL est activé. Selon l'exemple de la [Fig.1], le registre 142 comprend une entrée de ligne de mot WL recevant le signal de sélection de ligne ROW_SEL, une entrée de ligne de bit positive BL recevant le signal de sélection de colonne COL_SEL, et une entrée de ligne de bit négative BL_N recevant l'inverse du signal de sélection de colonne COL_SEL, généré par un autre inverseur 143.

[0058] Le circuit de sélection 104 comprend par exemple une porte ET 144 (AND) dédiée au pixel SPAD 101 de la matrice. La porte ET 144 fournit un signal d'activation EN à la grille du transistor d'activation 118. Dans certains modes de réalisation, le signal d'activation EN est amplifié par un tampon 145 (BUFFER), par exemple un amplificateur tampon, relié entre la sortie de la porte ET 144 et la grille du transistor d'activation 118. Ainsi, le signal d'activation EN peut correspondre à un signal de sortie de la porte ET 144 ou du tampon 145. La porte ET 144 a un de ses nœuds d'entrée relié à une sortie correspondante du registre 142 sur laquelle la donnée D est présente, et l'autre de ses nœuds d'entrée relié à une ligne d'entrée qui reçoit un signal d'activation commun EN_SPAD pour une sous-région de la matrice SPAD 100.

[0059] Le compteur 120 peut être couplé séquentiellement avec d'autres pixels SPAD d'une même sous-région (non représentés). Lorsqu'un pixel SPAD d'une sous-région est activé (ON), les autres pixels SPAD de la même sous-région sont de préférence désactivés (OFF). Par exemple, un pixel SPAD est activé lorsque le signal d'activation

EN appliqué à son transistor d'activation est dans le premier état, par exemple à environ 1,1 V, et est désactivé lorsque le signal d'activation EN appliqué à son transistor d'activation est dans le deuxième état, par exemple à environ 0 V. Si les autres pixels SPAD de la même sous-région ne sont pas désactivés, cela peut compromettre le comptage dans la sous-région de la matrice qui a des pixels reliés au même compteur.

- [0060] Malheureusement, la fonction d'activation/désactivation d'un pixel SPAD peut ne pas fonctionner correctement. Par exemple, en raison de défauts de fabrication, une isolation par tranchée profonde (DTI, de l'anglais "Deep Trench Isolation") qui est dédiée à isoler une photodiode d'autres circuits tels qu'un circuit d'activation/désactivation, pourrait échouer à atteindre la surface arrière du substrat, formant un chemin résistif. Le circuit d'activation/désactivation, par exemple le transistor d'activation 118, pourrait être court-circuité et l'anode de la photodiode être mise à la masse de façon permanente, c'est-à-dire la photodiode toujours activée. En d'autres mots, un tel défaut de fabrication pourrait compromettre la capacité à désactiver le pixel SPAD. Dans ce cas, le pixel SPAD affecté est en permanence connecté au compteur commun, impactant toute une sous-région de pixels.
- [0061] Selon une procédure standard, un pixel endommagé peut être identifié initialement, en utilisant par exemple un circuit de vérification interne, et devrait être désactivé, par exemple pour éviter de perturber d'autres pixels reliés au même compteur. Cette procédure standard ne fonctionne toutefois pas pour un pixel dont la fonction d'activation/désactivation est endommagée.
- [0062] Les inventeurs proposent un pixel à photodiode à avalanche qui peut remplir les besoins d'amélioration décrits précédemment, et pallier tout ou partie des désavantages des pixels SPAD décrits précédemment. En particulier, les inventeurs proposent une solution pour rendre les pixels à photodiode à avalanche plus robustes vis-à-vis de défauts de fabrication, de préférence sans ajouter de circuit, ni de dispositif, complexe.
- [0063] Des modes de réalisation de pixels SPAD seront décrits dans la suite. Les modes de réalisation décrits le sont à titre non limitatif et de nombreuses variantes de ceux-ci apparaîtront à la personne du métier sur la base des indications de la présente description. Des pixels SPAD sont décrits, mais les modes de réalisation s'appliquent également à d'autres pixels à photodiode à avalanche.
- [0064] La [Fig.2] représente une partie d'une matrice SPAD 200 comprenant un pixel SPAD 201 selon un mode de réalisation. De façon similaire à la matrice SPAD 100 de la [Fig.1], la matrice SPAD 200 comporte une pluralité de différentes sous-régions de pixels SPAD, chaque sous-région étant reliée à un compteur commun 120, par exemple au moyen d'un arbre OU (non représenté).
- [0065] La [Fig.2] représente un pixel SPAD 201 comprenant un circuit SPAD 102 similaire

à celui de la [Fig.1], et un circuit de détection 203. La [Fig.2] représente également un circuit de sélection 104 de la matrice SPAD 200 similaire au circuit de sélection de la [Fig.1].

- [0066] Le circuit de détection 203 de la [Fig.2] diffère de celui de la [Fig.1] essentiellement en ce qu'il comprend une porte ET de sortie 210 (AND OUT). La porte ET de sortie 210 comprend un premier nœud d'entrée relié, de préférence connecté, au nœud de sortie 136 de l'inverseur 130, et un deuxième nœud d'entrée relié, de préférence connecté, à une sortie du tampon 145, ou de la porte ET 144, afin de recevoir le signal d'activation EN. Autrement dit, le signal d'activation EN est appliqué au transistor d'activation 118 et à la porte ET de sortie 210. La porte ET de sortie 210 a son nœud de sortie relié, de préférence connecté, au compteur 120.
- [0067] Par conséquent, même si la fonction d'activation/désactivation est endommagée, par exemple si le transistor d'activation 118 est court-circuité, et que l'anode de la photodiode SPAD 114 est mise à la masse en permanence, c'est-à-dire la photodiode toujours activée, le signal d'activation EN est toujours envoyé à la porte ET de sortie 210. La fonction ET appliquée par la porte ET de sortie 210 entre le signal d'impulsion 152 généré par l'inverseur 130 et le signal d'activation EN génère, au niveau d'un nœud de sortie du pixel 212, un signal numérique de sortie du pixel qui est appliqué au compteur 120. La porte ET de sortie 210 est configurée pour bloquer, ou annuler, le signal d'impulsion 152 lorsque le signal d'activation EN est dans le deuxième état. En d'autres termes, lorsque le signal d'activation EN est dans le deuxième état, la porte ET de sortie 210 bloque tout signal qui sinon aurait été intégré par le compteur 120. La porte ET de sortie 210 est configurée pour laisser passer le signal d'impulsion 152 lorsque le signal d'activation EN est dans le premier état. Lorsque le signal d'activation EN est dans le premier état, alors le signal d'impulsion 152 généré par l'inverseur 130 peut être intégré par le compteur 120.
- [0068] Cette première solution est efficace pour désactiver un pixel SPAD même lorsque la fonction d'activation/désactivation de ce pixel SPAD est endommagée. De plus, la première solution permet une extinction, ou désactivation, rapide du pixel SPAD dans la mesure où l'extinction est directement effectuée au niveau du nœud de sortie du pixel 212.
- [0069] La première solution nécessite d'ajouter un composant (une autre porte ET) qui peut consommer de la surface.
- [0070] La [Fig.3] représente une partie d'une matrice SPAD 300 comprenant un pixel SPAD 301 selon un autre mode de réalisation. De façon similaire à la matrice SPAD 100 de la [Fig.1], la matrice SPAD 300 comporte une pluralité de différentes sous-régions de pixels SPAD, chaque sous-région étant reliée à un compteur commun 120, par exemple au moyen d'un arbre OU (non représenté).

- [0071] La [Fig.3] représente un pixel SPAD 301 comprenant un circuit SPAD 102 similaire à celui de la [Fig.1], et un circuit de détection 303. La [Fig.3] représente également un circuit de sélection 104 de la matrice SPAD 300 similaire au circuit de sélection de la [Fig.1].
- [0072] Le circuit de détection 303 de la [Fig.3] diffère de celui de la [Fig.1] essentiellement en ce que l'inverseur 130 n'est plus alimenté par la tension d'alimentation V_{DD} , mais est alimenté (commandé) par le signal d'activation EN. Dans l'exemple représenté, le nœud d'application d'une tension d'alimentation au transistor du type P 132 est relié, de préférence connecté, à une sortie du tampon 145, ou de la porte ET 144 directement, afin de recevoir le signal d'activation EN. De façon similaire à la [Fig.1], dans le mode de réalisation de la [Fig.3], le nœud de sortie du pixel correspond au nœud de sortie 136 de l'inverseur 130.
- [0073] Par conséquent, même si la fonction d'activation/désactivation est endommagée, par exemple si le transistor d'activation 118 est court-circuité, et que l'anode de la photodiode est mise à la masse en permanence, c'est-à-dire la photodiode toujours activée, le signal d'activation EN est toujours envoyé à l'inverseur 130. Lorsque le signal d'activation EN est dans le deuxième état, alors l'inverseur 130 ne génère pas de signal d'impulsion au niveau du nœud de sortie 136 de l'inverseur, c'est-à-dire aucun signal numérique de sortie du pixel au niveau du nœud de sortie du pixel, qui sinon aurait été intégré par le compteur 120. En d'autres termes, le signal d'activation EN peut éviter de générer un signal d'impulsion et qu'il soit intégré par le compteur 120. Lorsque le signal d'activation EN est dans le premier état, alors l'inverseur 130 est alimenté et peut donc générer un signal d'impulsion 152 au niveau du nœud de sortie du pixel 136 qui peut être intégré par le compteur 120.
- [0074] Cette deuxième solution est efficace pour désactiver un pixel même lorsque la fonction d'activation/désactivation de ce pixel est endommagée, et, de plus, elle n'impose pas nécessairement le recours à un autre composant. Ainsi, la deuxième solution est plus optimale en termes de surface utilisée. En outre, la deuxième solution peut diminuer la consommation d'énergie, car l'inverseur du pixel peut être activé seulement, ou essentiellement, lorsque le pixel est activé, c'est-à-dire seulement, ou essentiellement, pendant le temps d'intégration du pixel.
- [0075] Les inventeurs ont démontré, en utilisant des simulations, que même dans les pires cas, l'utilisation du signal de sortie EN du tampon 145 ou de la porte ET 144 comme alimentation de l'inverseur 130 n'affecte pas de façon significative les états du tampon, ni de la porte ET. En utilisant une simulation, les inventeurs ont trouvé seulement 152 mV de chute sur le signal de sortie du tampon ou de la porte ET, ce qui ne modifie pas l'état d'un quelconque circuit logique connecté à la sortie du tampon ou de la porte ET. Qui plus est, les inventeurs ont démontré que la vitesse de commutation de

l'inverseur 130 n'est pratiquement pas affectée pendant l'utilisation du signal d'activation EN.

- [0076] Le tampon 145 peut être prévu afin d'augmenter la puissance du signal d'activation EN, en particulier lorsque le pixel est activé. Par exemple, le tampon comprend deux inverseurs en série l'un avec l'autre, les inverseurs ayant par exemple des transistors plus grands que ceux de la porte ET 144.
- [0077] Selon une variante, qui peut être appliquée à la première ou à la deuxième solution, le circuit de détection du pixel SPAD peut comprendre un deuxième inverseur (non représenté) entre l'inverseur 130 et le compteur 120, par exemple entre l'inverseur 130 et la porte ET de sortie 210. Le deuxième inverseur peut être conçu pour être plus grand et/ou plus résistant, comme un étage tampon plus apte à piloter rapidement des lignes ou bus longs connectant le compteur.
- [0078] Les inventeurs ont montré que ni la première, ni la deuxième solution n'impacte le temps de montée du signal numérique de sortie du pixel.
- [0079] Ainsi, la première ou la deuxième solution permet d'avoir des pixels SPAD plus robustes vis-à-vis de défauts de fabrication, sans dégrader d'autres caractéristiques de ces pixels SPAD.
- [0080] 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.
- [0081] Enfin, la mise en oeuvre pratique des modes de réalisation et variantes décrits est à la portée de la personne du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus.

Revendications

- [Revendication 1] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) comprenant :
- un transistor (118) adapté à être commandé par un signal d'activation (EN) ayant un premier état pour commander l'activation du pixel et un deuxième état pour commander la désactivation du pixel, le transistor étant configuré pour relier une photodiode à avalanche (114) du pixel à un nœud d'application d'une tension de substrat (V_{SUB}) lorsque le signal d'activation est dans le premier état ; et
 - un circuit de sortie (210, 130) adapté à être commandé par le signal d'activation et configuré pour fournir un signal de sortie du pixel (152) lorsque le signal d'activation est dans le premier état et pour bloquer le signal de sortie du pixel lorsque le signal d'activation est dans le deuxième état.
- [Revendication 2] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon la revendication 1, dans lequel le signal d'activation (EN) est une tension d'activation.
- [Revendication 3] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon la revendication 1 ou 2, comprenant en outre un circuit de détection (203 ; 303) relié à la photodiode à avalanche (114) et configuré pour générer le signal de sortie du pixel (152).
- [Revendication 4] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon la revendication 3, dans lequel le circuit de détection (203 ; 303) comprend un inverseur (130), par exemple configuré pour convertir un signal analogique (151) généré par la photodiode à avalanche (114) en un signal numérique pour générer le signal de sortie du pixel (152).
- [Revendication 5] Pixel à photodiode à avalanche (201) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le circuit de sortie comprend une porte ET de sortie (210) comprenant un premier nœud d'entrée auquel le signal de sortie du pixel (152) est adapté à être appliqué, un deuxième nœud d'entrée auquel le signal d'activation (EN) est adapté à être appliqué, le nœud de sortie de la porte ET de sortie étant relié, ou correspondant, à un nœud de sortie (212) du pixel.
- [Revendication 6] Pixel à photodiode à avalanche (201) selon la revendication 5 en combinaison avec la revendication 4, dans lequel le premier nœud d'entrée de la porte ET de sortie (210) est relié, par exemple connecté, à un nœud de sortie (136) de l'inverseur (130).
- [Revendication 7] Pixel à photodiode à avalanche (201) selon la revendication 6, dans lequel l'inverseur (130) est adapté à être alimenté par une tension

- d'alimentation dédiée (V_{DD}).
- [Revendication 8] Pixel à photodiode à avalanche (301) selon la revendication 4, dans lequel le circuit de sortie comprend l'inverseur (130), l'inverseur étant adapté à être commandé par le signal d'activation (EN), par exemple le signal d'activation étant appliqué à un nœud d'application d'une tension d'alimentation de l'inverseur.
- [Revendication 9] Pixel à photodiode à avalanche (301) selon la revendication 8, dans lequel un nœud de sortie (136) de l'inverseur est relié, ou correspond, à un nœud de sortie du pixel.
- [Revendication 10] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel le circuit de sortie (210, 130) est relié, par exemple connecté, à un compteur (120), par exemple le compteur étant configuré pour intégrer le signal de sortie du pixel (152) lorsque le signal d'activation (EN) est dans le premier état.
- [Revendication 11] Pixel à photodiode à avalanche selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 en combinaison avec la revendication 4, comprenant en outre un autre inverseur entre l'inverseur (130) et le nœud de sortie du circuit de détection.
- [Revendication 12] Pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, comprenant en outre un tampon (145) adapté à augmenter la puissance du signal d'activation (EN).
- [Revendication 13] Matrice de pixels (200 ; 300) comprenant une pluralité de pixels à photodiode à avalanche (201 ; 301) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans lequel les pixels à photodiode à avalanche sont organisés en différentes sous-régions de pixels à photodiode à avalanche, les pixels à photodiode à avalanche de la même sous-région étant reliés à un compteur commun (120).
- [Revendication 14] Matrice de pixels (200 ; 300) selon la revendication 13, comprenant en outre un circuit de sélection (104) configuré pour adresser sélectivement le signal d'activation (EN) à un pixel à photodiode à avalanche (201 ; 301) parmi les pixels à photodiode à avalanche d'une sous-région, le circuit de sélection comprenant un nœud de sortie relié au moins au transistor (118) du pixel à photodiode à avalanche.
- [Revendication 15] Matrice de pixels (200) selon la revendication 14 en combinaison avec l'une quelconque des revendications 5 à 7, dans laquelle le nœud de sortie du circuit de sélection (104) est également relié ou connecté au deuxième nœud d'entrée de la porte ET de sortie (210).
- [Revendication 16] Matrice de pixels (300) selon la revendication 14 en combinaison avec

la revendication 8 ou 9, dans laquelle le nœud de sortie du circuit de sélection (104) est également relié ou connecté à un nœud d'application d'une alimentation de l'inverseur (130).

[Revendication 17] Matrice de pixels (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 14 à 16 en combinaison avec la revendication 12, dans laquelle le tampon (145) est inclus dans le circuit de sélection (104).

[Fig. 2]

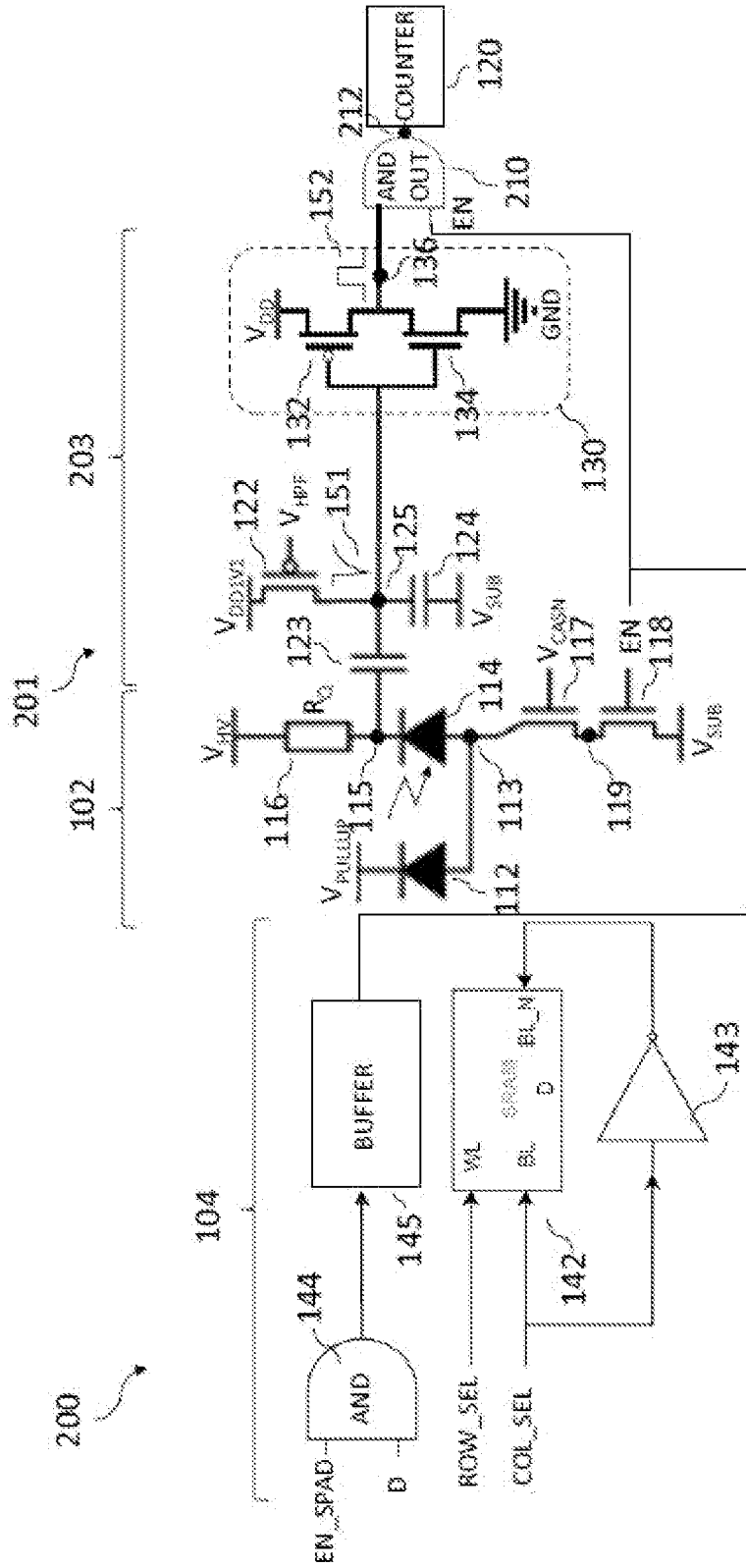


FIG. 2

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 917294
FR 2303090

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	US 2020/011732 A1 (DUTTON NEALE [GB] ET AL) 9 janvier 2020 (2020-01-09)	1-12	H01L 31/107
Y	* alinéas [0092] - [0097]; figure 4 * * alinéas [0099] - [0117]; figure 5 * * figure 22 *	15,16	
X	IT TO20 130 128 A1 (FOND BRUNO KESSLER; UNIV COURT OF THE UNIVERS ITY OF EDINBUR) 15 août 2014 (2014-08-15)	1-3, 7, 10-13	
Y	* figure 3 * * page 30, ligne 20 - page 32, ligne 10; figure 4 *	14-17	
X	US 2018/058924 A1 (STORM GRAEME [GB] ET AL) 1 mars 2018 (2018-03-01)	1-3, 11, 12	
Y	* alinéas [0062] - [0069]; figure 1 * * alinéas [0082] - [0083]; figure 5 *	14-17	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H04N H01L
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
20 septembre 2023		Berne, Jean-François	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2303090 FA 917294**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **20-09-2023**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2020011732 A1	09-01-2020	CN 110686774 A	14-01-2020
		CN 210123310 U	03-03-2020
		EP 3591712 A1	08-01-2020
		US 2020011732 A1	09-01-2020
		US 2022316943 A1	06-10-2022

IT TO20130128 A1	15-08-2014	-----	-----
US 2018058924 A1	01-03-2018	EP 3287813 A1	28-02-2018
		US 2018058924 A1	01-03-2018
