

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

①1 N° de publication : **3 143 855**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **22 14005**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 01 L 31/107 (2023.01), H 01 L 31/18**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Photodiode à avalanche.

②2 Date de dépôt : 20.12.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 21.06.24 Bulletin 24/25.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 06.06.25 Bulletin 25/23.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

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) : ZIMMER Antonin, GOLANSKI
Dominique, PLACE Sebastien et MARCHAND
Guillaume.

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

⑦4 Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

FR 3 143 855 - B1



Description

Titre de l'invention : Photodiode à avalanche

Domaine technique

[0001] La présente description concerne de façon générale les photodiodes à avalanche, en particulier les diodes à avalanche à photon unique, appelées photodiodes SPAD (de l'anglais "Single Photon Avalanche Diode") et leur méthode de fabrication.

Technique antérieure

[0002] Une photodiode est un composant semiconducteur ayant la capacité de capter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

[0003] Une photodiode SPAD est une photodiode comprenant une jonction PN adaptée à être polarisée en inverse à une tension supérieure à la tension de claquage, ou tension d'avalanche, de ladite jonction. A cette tension de polarisation, le champ électrique autour de la jonction PN est suffisant pour qu'un porteur photogénéré atteignant la zone de charge d'espace, ou zone déplétée, de la jonction, déclenche un phénomène d'avalanche, se traduisant par une augmentation du courant dans la photodiode. Dans une photodiode SPAD, un seul porteur photogénéré peut déclencher une avalanche dans la zone déplétée par effet d'ionisation par impact.

[0004] 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.

[0005] Des dispositifs électroniques peuvent comprendre plusieurs photodiodes, ou plusieurs pixels comprenant chacun au moins une photodiode. Par exemple, un capteur d'images est un dispositif électronique qui peut comprendre une pluralité de photodiodes, les photodiodes permettant au capteur d'images 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.

[0006] La miniaturisation de plus en plus poussée des dispositifs électroniques, notamment des capteurs d'images, entraîne une miniaturisation des pixels et/ou des photodiodes.

[0007] Pour miniaturiser une photodiode SPAD, une solution est de réduire au moins une de ses dimensions dans le plan du circuit électronique intégrant cette photodiode, par exemple sa largeur. Cependant, réduire la largeur de la photodiode a un inconvénient de réduire le volume de collection des photons, et ainsi de réduire notamment la probabilité de détection de photons (en anglais "PDP", pour "Photon Detection Probability").

[0008] Pour compenser cette réduction de volume, une solution est d'augmenter la hauteur de la photodiode, c'est-à-dire la dimension dans la direction perpendiculaire au plan du

circuit électronique. Cependant, augmenter la hauteur de la photodiode peut avoir comme inconvénient de diminuer la probabilité qu'un porteur photogénéré atteigne la zone de multiplication, c'est-à-dire la zone où le champ électrique est suffisamment fort pour que des effets d'ionisation par impact aient lieu et donc une avalanche se produise, ou d'augmenter le temps pendant lequel le porteur peut atteindre cette zone de multiplication, d'autant plus que le porteur photogénéré est à une distance plus éloignée de cette zone de multiplication de la photodiode. En effet, au-delà d'une certaine distance de la jonction PN, le champ électrique résultant de la polarisation en inverse de la jonction PN s'annule ou s'atténue fortement, et permet moins, voire ne permet plus, d'entraîner les porteurs photogénérés vers la zone de multiplication. Au-delà d'une certaine distance de la jonction PN, seule la diffusion aléatoire dans la photodiode peut alors être susceptible de conduire les porteurs photogénérés vers la zone de multiplication, avec une probabilité non négligeable que les porteurs photogénérés n'atteignent jamais la zone de multiplication ou l'atteignent avec un retard important.

[0009] En corollaire, ceci peut augmenter la gigue temporelle (en anglais "jitter"), qui correspond à la fluctuation statistique du délai de détection.

Résumé de l'invention

[0010] Il existe un besoin d'une photodiode à avalanche, par exemple du type SPAD, palliant tout ou partie des inconvénients des photodiodes à avalanche connues.

[0011] En particulier, il existe un besoin d'une photodiode SPAD dont la taille puisse être réduite sans que cela dégrade la probabilité de détection de photons (PDP) et/ou augmente la gigue temporelle.

[0012] Il serait avantageux de disposer d'une telle photodiode sans que cela ne complexifie le procédé de fabrication de cette photodiode, et en augmente le coût de fabrication.

[0013] Un mode de réalisation prévoit une photodiode à avalanche comprenant :

- une jonction PN principale adaptée à être polarisée en inverse ; et
- une pluralité de régions semiconductrices dont au moins :
 - une première région semiconductrice épitaxiée d'un premier type de conductivité ;
 et
 - une deuxième région semiconductrice du deuxième type de conductivité, ladite deuxième région étant agencée pour entourer au moins partiellement la première région, et comprenant des surfaces en contact avec des surfaces de ladite première région.

[0014] Un mode de réalisation prévoit une méthode de fabrication d'une photodiode à avalanche, comprenant une jonction PN principale adaptée à être polarisée en inverse, la méthode comprenant la formation d'une pluralité de régions semiconductrices dont

au moins :

- une première région semiconductrice épitaxiée d'un premier type de conductivité ; et
- une deuxième région semiconductrice du deuxième type de conductivité, ladite deuxième région étant agencée pour entourer au moins partiellement la première région, et comprenant des surfaces en contact avec des surfaces de ladite première région.

[0015] Selon un mode de réalisation, la jonction PN principale est formée par des quatrième et cinquième régions de la pluralité de régions semiconductrices ;

la quatrième région étant fortement dopée du premier type de conductivité, par exemple plus fortement dopée que la première région, et étant formée à partir d'une première face de la photodiode ; et

la cinquième région étant fortement dopée du deuxième type de conductivité, par exemple plus fortement dopée que la deuxième région, et étant formée sous, et en contact avec, la quatrième région ;

les quatrième et cinquième régions étant par exemple localisées au centre de la photodiode dans un plan parallèle à la première face.

[0016] Selon un mode de réalisation, une sixième région de la pluralité de régions semiconductrices est formée latéralement autour, et à distance de, la quatrième région à partir de la première face de la photodiode, la sixième région étant fortement dopée du deuxième type de conductivité, par exemple plus fortement dopée que la deuxième région.

[0017] Selon un mode de réalisation, une troisième région semiconductrice de la pluralité de régions semiconductrices est formée entre la première face de la photodiode et la première région, la troisième région étant une région épitaxiée du premier type de conductivité, et les quatrième, cinquième et sixième régions étant formées par dopage, par exemple par implantation ionique, dans ladite troisième région.

[0018] Selon un mode de réalisation particulier, les première et troisième régions sont épitaxiées et dopées dans des conditions similaires, par exemple correspondant à des régions d'une même couche épitaxiée.

[0019] Selon un mode de réalisation, une région d'anneau de garde de la pluralité de régions semiconductrices est formée autour de la quatrième région, la région d'anneau de garde étant du premier type de conductivité et étant plus faiblement dopée que la quatrième région.

[0020] Selon un mode de réalisation, les régions semiconductrices sont formées dans un caisson délimité par une tranchée isolante profonde s'étendant dans une direction perpendiculaire à la première face de la photodiode.

[0021] Selon un mode de réalisation, la deuxième région comporte une portion latérale localisée entre la première région et la tranchée isolante profonde.

- [0022] Selon un mode de réalisation, la deuxième région comporte une portion enterrée localisée entre la première région et une deuxième face de la photodiode opposée à la première face.
- [0023] Selon un mode de réalisation, la première région est dopée de manière sensiblement constante dans une direction perpendiculaire à la première face de la photodiode.
- [0024] Selon un mode de réalisation, la première région est dopée graduellement dans une direction perpendiculaire à la première face, par exemple de manière décroissante entre ladite première face et une deuxième face de la photodiode opposée à la première face.
- [0025] Selon un mode de réalisation, la première région comporte une première portion et une deuxième portion moins large, dans un plan parallèle à la première face, que la première portion, et localisée entre la première portion et la jonction PN principale.
- [0026] Selon un mode de réalisation, la première région entoure la jonction PN principale, par exemple comporte une première portion localisée sous la jonction PN principale, et une deuxième portion s'étendant jusqu'à la première face de la photodiode.
- [0027] Selon un mode de réalisation, la première région est à l'intérieur de la deuxième région.
- [0028] Selon un mode de réalisation, chaque dimension de la photodiode, dans un plan parallèle à une première face de la photodiode, est inférieure à 6 μm et/ou la hauteur de la photodiode est comprise entre 3 et 15 μm , par exemple comprise entre 6 et 10 μm .
- [0029] Selon un mode de réalisation, la formation de la pluralité de régions semiconductrices comprend :
- la formation par croissance épitaxiale d'une couche épitaxiée du premier type de conductivité destinée à former la première région semiconductrice ; puis
 - la formation, par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, d'au moins une première portion de la deuxième région ; et
- la quatrième région et la cinquième région sont formées par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, à partir de la première face de la photodiode.
- [0030] Selon un mode de réalisation, la portion latérale de la deuxième région est formée par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, par changement partiel de conductivité de la couche épitaxiée, par diffusion à partir de la tranchée isolante profonde, ou par un matériau à inversion de charge dans la tranchée isolante profonde.
- [0031] Selon un mode de réalisation, la portion enterrée de la deuxième région est formée par croissance épitaxiale, ou par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique à partir de la deuxième face de la photodiode.

Brève description des dessins

- [0032] 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 :
- [0033] la [Fig.1] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant un exemple de photodiode ;
- [0034] la [Fig.2] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant une photodiode selon un mode de réalisation ;
- [0035] la [Fig.3] illustre de manière très simplifiée des profils de dopage en unité arbitraire d'une photodiode similaire à la photodiode de la [Fig.2] ;
- [0036] la [Fig.4] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant un autre exemple de photodiode ;
- [0037] la [Fig.5] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant une photodiode selon un autre mode de réalisation ; et
- [0038] la [Fig.6A], la [Fig.6B], la [Fig.6C], la [Fig.6D], la [Fig.6E], la [Fig.6F] et la [Fig.6G] sont des vues en coupe représentant des étapes d'une méthode de fabrication d'une photodiode selon un mode de réalisation.

Description des modes de réalisation

- [0039] 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.
- [0040] 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, une photodiode SPAD comprend généralement des circuits annexes, notamment un circuit de polarisation de la jonction PN à une tension supérieure à son seuil d'avalanche, un circuit de lecture adapté à détecter un déclenchement d'une avalanche de la photodiode, ainsi qu'un circuit d'extinction ("quenching circuit" en anglais) ayant pour fonction d'interrompre l'avalanche de la photodiode une fois celle-ci déclenchée. Ces circuits annexes n'ont pas été représentés sur les figures et ne seront pas détaillés, les modes de réalisation décrits étant compatibles avec les circuits annexes équipant les photodiodes SPAD connues.
- [0041] 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.
- [0042] 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 ou à une photodiode dans une position normale d'utilisation.

[0043] Dans la description qui suit, une hauteur ou une profondeur correspond à une dimension prise dans la direction Z, qui peut correspondre à une direction verticale, et une largeur correspond à une dimension prise dans la direction X, qui peut correspondre à une direction horizontale.

[0044] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.

[0045] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à une région, il est fait référence à une région semiconductrice.

[0046] Dans la description qui suit, lorsque l'on fait référence à une couche, ou une région, épitaxiale ou épitaxiée, il est fait référence à une couche, ou une région, formée par croissance épitaxiale.

[0047] Dans les exemples donnés ci-après, il est considéré que le premier type de conductivité est de type N et que le deuxième type de conductivité est de type P, mais les exemples peuvent s'appliquer également si les types de conductivité sont inversés, c'est-à-dire que le premier type de conductivité est de type P et que le deuxième type de conductivité est de type N avec, par exemple, des inversions appropriées de tensions, d'anode et de cathode.

[0048] Par exemple, les régions de type P sont dopées avec des atomes de bore (B), et/ou les régions de type N sont dopées avec des atomes d'arsenic (As).

[0049] La [Fig.1] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant un exemple de photodiode 100 de type SPAD.

[0050] La photodiode 100 comporte une première région 111 semiconductrice épitaxiée de type P et une deuxième région 112 semiconductrice de type P, plus dopée que la première région 111. La deuxième région 112 entoure la première région 111.

[0051] Par exemple, la première région 111 forme un volume de collection au sein duquel des porteurs ont une probabilité significative d'être générés lors de l'absorption d'un photon (photogénérés).

[0052] La photodiode 100 comporte en outre une troisième région 113 semiconductrice épitaxiée de type P, également moins dopée que la deuxième région 112, affleurent au niveau de la face supérieure 100A de la photodiode 100. Par exemple, la troisième région 113 est épitaxiée et dopée dans des conditions similaires à la première région 111.

[0053] La première région 111 peut comprendre une première portion 111A et une

deuxième portion 111B moins large que la première portion 111A et reliant la première portion 111A à la troisième région 113.

- [0054] La photodiode 100 comprend en outre une quatrième région 114 semiconductrice fortement dopée de type N affleurant la face supérieure 100A de la photodiode 100, et une cinquième région 115 semiconductrice fortement dopée de type P, plus fortement dopée que la deuxième région 112, sous, et en contact avec, la quatrième région 114.
- [0055] Par exemple, la quatrième région 114 présente une forme cylindrique. En d'autres termes, la quatrième région 114 peut présenter, en vue de dessus, une forme ronde ou ovale. Similairement, la cinquième région 115 peut présenter une forme cylindrique. En variante, la quatrième région et/ou la cinquième région peut avoir d'autres formes, par exemple, en vue de dessus, une forme de quadrilatère ou de quadrilatère dont les angles sont arrondis, ou une forme sensiblement hémisphérique, ou peut comprendre une portion de forme sensiblement hémisphérique, comme représenté en [Fig.4] décrite plus après.
- [0056] La liaison entre la quatrième région et la cinquième région fournit une jonction PN supérieure 130, ou jonction PN principale. Pour un fonctionnement de photodiode SPAD, la jonction PN peut être polarisée en inverse au-delà de la tension de claquage, de sorte à former un champ électrique autour de cette jonction PN suffisant pour qu'un porteur photogénéré atteignant la zone de charge d'espace, ou zone déplétée, de la jonction PN, déclenche un phénomène d'avalanche.
- [0057] La zone entourée en pointillés correspond sensiblement à la région de multiplication 131, c'est-à-dire une région où le champ électrique est suffisamment fort pour que le phénomène d'avalanche ait une forte probabilité de se produire.
- [0058] Dans l'exemple représenté, une région d'anneau de garde 117 entoure la quatrième région 114. La région d'anneau de garde est une région semiconductrice de type N, plus faiblement dopée que la quatrième région 114. Par exemple, la région d'anneau de garde 117 présente une forme d'anneau rond ou ovale, une forme de cadre carré ou de cadre carré dont les angles sont arrondis.
- [0059] La photodiode 100 comprend également une sixième région 116 semiconductrice fortement dopée de type P, plus fortement dopée que la deuxième région 112, affleurant la face supérieure 100A de la photodiode, et localisée autour et latéralement à distance de la région d'anneau de garde 117. Par exemple, la sixième région 116 présente, en vue de dessus, la forme d'un anneau rond ou ovale, la forme d'un cadre carré ou d'un cadre carré dont les angles sont arrondis.
- [0060] La quatrième région 114, la cinquième région 115, la sixième région 116 et la région d'anneau de garde 117 sont généralement formées par implantation ionique, par exemple au moins partiellement dans la troisième région 113.
- [0061] Les régions semiconductrices 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 sont par exemple en

silicium.

- [0062] Ces régions semiconductrices sont situées dans un caisson 110 délimité par une tranchée isolante profonde 120 (DTI, de l'anglais "Deep Trench Isolation"). Par exemple, la tranchée 120 entoure le caisson 110. Par exemple, la tranchée 120 présente, en vue de dessus, la forme d'un anneau rond ou ovale, la forme d'un cadre carré ou d'un cadre carré dont les angles sont arrondis. En variante, la tranchée 120 présente une forme quelconque fermée.
- [0063] La photodiode 100 comprend également une cathode 121 et une anode 122.
- [0064] La cathode 121 est située en vis-à-vis de la quatrième région 114. La cathode 121 est, par exemple, située sur et en contact avec la quatrième région 114, ou avec une zone de reprise de contact située dans ou sur la quatrième région 114. Par exemple, la cathode 121 présente sensiblement une forme de parallélépipède ou de cylindre.
- [0065] L'anode 122 est située en vis-à-vis de la sixième région 116. L'anode 122 est, par exemple, située sur et en contact avec la sixième région 116, ou avec une zone de reprise de contact située dans ou sur la sixième région 116. De préférence, l'anode 122 présente, en vue de dessus, une forme similaire à la forme de la sixième région 116.
- [0066] Par exemple, pour la photodiode représentée, en fonctionnement, l'anode est connectée à la masse et la tension de polarisation est appliquée à la cathode.
- [0067] Par exemple, la photodiode 100 est comprise, en vue de dessus, dans un carré dont le côté est, par exemple, inférieur à environ 6 μm . Par exemple, la hauteur de la photodiode 100 est comprise entre environ 3 et 15 μm , par exemple égale à environ 6 μm ou à environ 10 μm .
- [0068] Dans l'objectif de miniaturisation des photodiodes SPAD, par exemple dans l'objectif de réduire la largeur d'une photodiode et de compenser cette réduction en augmentant la hauteur de la photodiode, il est recherché une solution pour que l'augmentation de la hauteur de la photodiode ne se traduise pas par une dégradation de la gigue temporelle, et/ou d'une diminution de la probabilité de détection de photons (PDP).
- [0069] Dans l'exemple de la photodiode 100, la première région épitaxiée 111 comprise dans la deuxième région 112, et moins dopée du même type de conductivité que la deuxième région 112, génère une zone de déplétion 132, schématiquement représentée par la courbe en traits mixtes. Cette zone de déplétion définit un volume au sein duquel le transport des porteurs est sensiblement rapide. Avoir un volume de déplétion le plus grand possible permet une amélioration de la gigue temporelle par rapport à une photodiode à volume de déplétion plus faible.
- [0070] Cependant, on observe que cette zone de déplétion 132 s'étend jusqu'au centre de la région épitaxiée 111, mais qu'elle n'atteint pas le fond de la région épitaxiée 111, c'est-à-dire le fond du volume de collection des porteurs photogénérés. Ainsi, un

porteur photogénéré au fond du volume peut ne pas atteindre la région de multiplication 131, ou alors avec un temps de déplacement aléatoire et important. A fortiori, lorsque la hauteur de la photodiode augmente, la zone de déplétion 132 de la photodiode 100 peut ne pas être suffisante pour conserver une gigue temporelle acceptable. En effet, en augmentant la hauteur de la photodiode, la zone de déplétion restant constante, on ajoute des zones critiques au fond de la région épitaxiée, non déplétées et loin de la zone de multiplication. Si des porteurs sont photogénérés dans ces zones critiques, ils pourraient mettre un temps d'autant plus important à déclencher une avalanche que la hauteur augmente, entraînant une dégradation de la gigue temporelle.

- [0071] Les inventeurs proposent une photodiode et une méthode de fabrication d'une telle photodiode permettant de répondre aux besoins d'amélioration décrits précédemment, et de pallier tout ou partie des inconvénients des photodiodes décrites précédemment. En particulier, les inventeurs proposent une photodiode et une méthode de fabrication d'une telle photodiode permettant d'augmenter sa hauteur sans augmenter la gigue temporelle, et sans réduire la probabilité de détection de photons (PDP), voire en l'augmentant.
- [0072] Des modes de réalisation de photodiodes vont être décrits ci-après. Les modes de réalisation décrits sont non limitatifs et diverses variantes apparaîtront à la personne du métier à partir des indications de la présente description.
- [0073] La [Fig.2] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant une photodiode 200 à avalanche selon un mode de réalisation.
- [0074] Selon un mode de réalisation préféré, la photodiode 200 est une photodiode de type SPAD.
- [0075] La photodiode 200 présente une face supérieure 200A (première face) et une face inférieure 200B (deuxième face) opposée à la face supérieure, de préférence sensiblement parallèle à la face supérieure.
- [0076] La photodiode 200 comporte une première région 211 semiconductrice épitaxiée d'un premier type de conductivité (dans l'exemple, de type N) et une deuxième région 212 semiconductrice d'un deuxième type de conductivité (dans l'exemple, de type P). La deuxième région 212 entoure, au moins partiellement, la première région 211, et comprend des surfaces en contact avec des surfaces de la première région 211. Par exemple, la première région 211 est comprise dans la deuxième région 212.
- [0077] Ainsi, la photodiode 200 se distingue de la photodiode 100 principalement en ce que la première région 211 épitaxiée est de type N, au lieu d'être de type P.
- [0078] La photodiode 200 comporte une région semiconductrice supérieure 213 (troisième région) affleurant au niveau de la face supérieure 200A de la photodiode 200. La troisième région 213 est une région épitaxiée de type N.

- [0079] Par exemple, les première et troisième régions sont épitaxiées et dopées dans des conditions similaires, par exemple elles correspondent à des régions d'une même couche formée par croissance épitaxiale. Par exemple, la troisième région 213 peut correspondre à une portion supérieure (ou troisième portion) de la couche formée par croissance épitaxiale.
- [0080] La photodiode 200 comprend en outre une quatrième région 214 semiconductrice fortement dopée de type N, de préférence plus fortement dopée que la première région 211, et affleurant la face supérieure 200A de la photodiode 200, et une cinquième région 215 semiconductrice fortement dopée de type P, de préférence plus fortement dopée que la deuxième région 212, sous, et en contact avec, la quatrième région 214.
- [0081] Par exemple, la quatrième région 214 présente une forme cylindrique. En d'autres termes, la quatrième région 114 peut présenter, en vue de dessus, une forme ronde ou ovale. Similairement, la cinquième région 215 peut présenter une forme cylindrique. En variante, la quatrième région et/ou la cinquième région peut avoir d'autres formes, par exemple, en vue de dessus, une forme de quadrilatère ou de quadrilatère dont les angles sont arrondis, ou une forme sensiblement hémisphérique, ou peut comprendre une portion de forme sensiblement hémisphérique, comme représenté par exemple en [Fig.5] décrite plus après.
- [0082] La liaison entre la quatrième région et la cinquième région fournit une jonction PN supérieure 230, ou jonction PN principale. Pour un fonctionnement de photodiode SPAD, la jonction PN peut être polarisée en inverse au-delà de la tension de claquage, de sorte à former un champ électrique autour de la jonction PN suffisant pour qu'un porteur photogénéré atteignant la zone de multiplication, déclenche un phénomène d'avalanche.
- [0083] La zone entourée en pointillés correspond sensiblement à une région de multiplication 231, c'est-à-dire une région où le champ électrique est suffisamment fort pour que le phénomène d'avalanche ait une forte probabilité de se produire.
- [0084] Comme représenté en [Fig.2], une région d'anneau de garde 217 peut entourer la quatrième région 214. La région d'anneau de garde 217 est une région semiconductrice de type N, plus faiblement dopée que la quatrième région 214. La région d'anneau de garde 217 permet notamment d'éviter un déclenchement prématuré de la photodiode en périphérie de la jonction PN principale, et de réduire la probabilité de porteurs minoritaires provenant de la périphérie de la jonction. Par exemple, la région d'anneau de garde 217 présente une forme d'anneau rond ou ovale, une forme de cadre carré ou de cadre carré dont les angles sont arrondis.
- [0085] La photodiode 200 comprend également une sixième région 216 semiconductrice fortement dopée de type P, de préférence plus fortement dopée que la deuxième région 212, affleurant la face supérieure 200A de la photodiode 200, et localisée latéralement

autour et à distance de la région d'anneau de garde 217. Cette sixième région peut être une région de reprise de contact. Par exemple, la sixième région 216 présente, en vue de dessus, la forme d'un anneau rond ou ovale, la forme d'un cadre carré ou d'un cadre carré dont les angles sont arrondis, ou plus largement la forme d'un quadrilatère ou d'un quadrilatère dont les angles sont arrondis.

[0086] La quatrième région 214, la cinquième région 215, la sixième région 216 et la région d'anneau de garde 217 sont de préférence formées par implantation ionique, par exemple au moins partiellement dans la troisième région 213.

[0087] Les régions semiconductrices 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217 sont par exemple en silicium.

[0088] Les régions semiconductrices sont situées dans un caisson 210 délimité par une tranchée isolante profonde 220 (DTI, de l'anglais "Deep Trench Insolation"). Par exemple, la tranchée 220 entoure le caisson 210. Par exemple, la tranchée 220 présente, en vue de dessus, la forme d'un anneau rond ou ovale, la forme d'un cadre carré ou d'un cadre carré dont les angles sont arrondis, ou plus largement la forme d'un quadrilatère ou d'un quadrilatère dont les angles sont arrondis. En variante, la tranchée 220 présente une forme quelconque fermée.

[0089] Par exemple, la tranchée peut être remplie d'un élément conducteur ou semi-conducteur, tel que du métal ou du polysilicium, isolé du reste de la photodiode par une couche d'isolant. La tranchée 220 peut ainsi former une isolation par tranchée profonde capacitive (en anglais "capacitive deep trench isolation", CDTI).

[0090] Les surfaces en contact des première 211 et deuxième 212 régions forment des jonctions PN complémentaires à la jonction PN principale 230. Ces jonctions complémentaires permettent de former des zones de déplétion 232, schématiquement représentées par la courbe en traits mixtes, et de créer des lignes de champ électrique en profondeur dans la photodiode, avec pour corollaire d'accélérer le transport des porteurs photogénérés dans les zones les plus critiques de la photodiode, au fond de la photodiode par exemple, vers la zone de multiplication. En effet, le transport des porteurs photogénérés dans une zone déplétée est plus rapide que dans une zone non-déplétée.

[0091] Ces jonctions complémentaires pourront donc générer des trous, qui pourront également participer au phénomène d'avalanche, en complément de la contribution des électrons de la jonction PN principale. En effet, les trous sont collectés via l'anode 222 (décrite plus après) et l'anode est directement reliée, par continuité de dopage de type P, aux régions de type P adjacentes à ces jonctions complémentaires.

[0092] Par rapport à la photodiode 100 de la [Fig.1], cela permet d'étirer la zone de déplétion vers le fond de la photodiode, et ainsi d'accélérer le transport des porteurs photogénérés dans les zones les plus critiques de la photodiode, au fond de la

photodiode par exemple. En effet, dans la photodiode 200, les porteurs photogénérés se trouvant déjà dans la zone de déplétion 232, ou au moins dans son voisinage proche, ils possèdent une plus forte probabilité de rejoindre la zone de multiplication dans un délai plus court que dans le cas de la photodiode 100 de la [Fig.1] où la zone de déplétion était plus éloignée du fond de la photodiode. En corollaire, la zone de déplétion 232 de la photodiode 200 peut permettre de diminuer la gigue temporelle, même lorsque la hauteur de la photodiode augmente.

- [0093] Par exemple, la photodiode 200 forme une photodiode SPAD du type entièrement déplétée (en anglais "fully depleted").
- [0094] Par exemple, la première région 211 forme un volume de collection au sein duquel des porteurs ont une probabilité significative d'être générés lors de l'absorption d'un photon. Par exemple, les porteurs qui sont photogénérés dans la première région 211 peuvent être entraînés vers une région de multiplication 231, et ce, d'autant plus efficacement que les lignes de champ électriques sont optimisées.
- [0095] Avantagusement, le dopage de la première région 211 épitaxiée peut être ajusté pour optimiser les lignes de champ. Comme décrit plus après, la première région 211 épitaxiée peut présenter un dopage sensiblement constant dans la direction Z, ou un dopage graduel dans la direction Z, par exemple un dopage diminuant entre la face supérieure 200A de la photodiode et la face inférieure 200B de la photodiode.
- [0096] Comme représenté dans la [Fig.2], la première région 211 peut comprendre une première portion 211A et une deuxième portion 211B moins large que la première portion 211A et reliant la première portion 211A à la troisième région 213. Une telle forme peut correspondre à une forme en entonnoir favorisant la conduction des porteurs photogénérés vers la région de multiplication 231.
- [0097] En outre, la deuxième région 212 peut comprendre :
- une première portion 212A comprise latéralement entre la deuxième portion 211B de la première région 211 et la tranchée isolante profonde 220 ;
 - une deuxième portion 212B (portion latérale) comprise latéralement entre la première portion 211A de la première région 211 et la tranchée isolante profonde 220 ;
- et
- une troisième portion 212C (portion enterrée) localisée sous la première région 211, entre la première région 211 et la face inférieure 200B de la photodiode 200.
- [0098] La deuxième région 212 peut se prolonger verticalement vers la face supérieure 200A de la photodiode 200 pour être également comprise latéralement entre la troisième région 213 et la tranchée isolante profonde 220.
- [0099] La présence de la troisième portion 212C de la deuxième région 212 de type P sous la première région 211 de type N permet de former une zone de passivation de la photodiode 200, par exemple afin que celle-ci soit moins impactée par le courant

d'obscurité (en anglais "dark current"), de même pour la présence de la deuxième portion 212B de la deuxième région 212 de type P entre la première région 211 de type N et la tranchée isolante profonde 220. Par exemple, cela permet de réduire le taux de comptage sombre (en anglais "DCR" pour "Dark Count Rate").

- [0100] De préférence, la largeur et/ou la hauteur de la première région épitaxiée 211 est optimisée pour que le volume de cette première région soit le plus grand possible, et ainsi pouvoir collecter le plus de photons possible, par exemple, pour pouvoir augmenter la probabilité de détection de photons PDP, tout en conservant une distance d'une part avec la face inférieure 200B de la photodiode 200 et d'autre part avec la tranchée isolante profonde 220 suffisante pour limiter le taux de comptage sombre DCR. Par exemple, la deuxième portion 212B de la deuxième région 212 présente une largeur de l'ordre de la centaine de nanomètres, la troisième portion 212C de la deuxième région 212 présente une hauteur de l'ordre de quelques centaines de nanomètres jusqu'au micromètre, les dimensions de la première région épitaxiée 211 étant déduites des dimensions des deuxième et troisième portions de la deuxième région 212, et des dimensions de la diode. A titre d'exemple non limitatif, la première région épitaxiée 211 peut présenter une largeur d'environ 5 μm et une hauteur d'environ 7 μm .
- [0101] La photodiode 200 comprend également une cathode 221 et une anode 222.
- [0102] La cathode 221 est située en vis-à-vis de la quatrième région 214. La cathode 221 est, par exemple, située sur et en contact avec la quatrième région 214, ou avec une zone de reprise de contact située dans, ou sur, la quatrième région 214. Par exemple, la cathode 221 présente sensiblement une forme de parallépipède ou de cylindre.
- [0103] L'anode 222 est située en vis-à-vis de la sixième région 216. L'anode 222 est, par exemple, située sur et en contact avec la sixième région 216, ou avec une zone de reprise de contact située dans, ou sur, la sixième région 216. De préférence, l'anode 222 présente, en vue de dessus, une forme similaire à la forme de la sixième région 216.
- [0104] Par exemple, pour la photodiode représentée, pour laquelle le premier type de conductivité est de type N et le deuxième type de conductivité est de type P, en fonctionnement, l'anode est connectée à la masse et la tension de polarisation est appliquée à la cathode.
- [0105] En variante, si le premier type de conductivité est de type P et le deuxième type de conductivité est de type N avec une inversion de l'anode et de la cathode, en fonctionnement, la cathode est connectée à la masse et une tension de polarisation est appliquée à l'anode.
- [0106] Par exemple, la photodiode 200 est comprise, en vue de dessus, dans un carré dont le côté est inférieur à environ 6 μm . Par exemple, la hauteur de la photodiode 200 est

comprise entre environ 3 et 15 μm , par exemple égale à environ 6 μm ou égale à environ 10 μm .

- [0107] La [Fig.3] illustre de manière très simplifiée des profils de dopage, en unité arbitraire, de la première région épitaxiée et de la deuxième région semiconductrice d'une photodiode similaire à la photodiode 200 de la [Fig.2]. Le profil de dopage est déterminé dans la direction Z, selon une ligne verticale sensiblement centrée latéralement (repérée en pointillés dans la [Fig.2]).
- [0108] La première région épitaxiée 211 de type N peut présenter un dopage N sensiblement constant, notamment dans la direction Z. Ceci est illustré en [Fig.3] par la courbe 301 en pointillés.
- [0109] En variante, le dopage de la première région épitaxiée 211 peut être graduel dans la direction Z, par exemple diminuer entre la face supérieure 200A de la photodiode et la face inférieure 200B de la photodiode, par exemple entre 10^{15} cm^{-3} et $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Ceci est illustré en [Fig.3] par la courbe en trait continu 302.
- [0110] La courbe 303 représente un dopage P graduel de la deuxième région 212, plus précisément de la troisième portion 212C de la deuxième région localisée sous la première région 211, qui augmente entre la première région 211 et la face inférieure 200B de la photodiode 200, par exemple entre $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ et $9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
- [0111] Les inventeurs ont pu démontrer par des simulations qu'une photodiode selon un mode de réalisation, par exemple du type de la photodiode 200 de la [Fig.2], permet d'augmenter la population de porteurs qui déclenchent une avalanche dans un temps très court. Ils ont en outre démontré qu'on peut agir sur le dopage N constant de la région épitaxiée pour agir sur le fonctionnement de la photodiode, et qu'un profil de dopage N graduel de la région épitaxiée permet d'augmenter davantage la population de porteurs qui déclenchent une avalanche dans un temps très court, pour diminuer le temps de déclenchement d'avalanche, et ainsi de diminuer la gigue temporelle. Les inventeurs ont également démontré qu'une photodiode sans portion de région de type P sous la région épitaxiée de type N permet encore davantage d'augmenter la population de porteurs qui déclenchent une avalanche dans un temps très court et de diminuer la gigue temporelle. Cependant, comme décrit plus avant, elle peut avoir comme inconvénient d'augmenter le taux de comptage sombre DCR.
- [0112] La [Fig.4] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant un autre exemple de photodiode 400. Seule une moitié de la photodiode dans la direction X est représentée. La photodiode 400 se distingue de la photodiode 100 principalement par les formes de la première région épitaxiée 411 et de la deuxième région 412, toutes les deux du même type de conductivité, de type P dans l'exemple. En outre, la photodiode 400 ne comporte pas de région d'anneau de garde. La deuxième région 412 peut être dopée graduellement avec un dopage diminuant depuis la face inférieure 400B jusqu'à

la première région 411.

- [0113] La deuxième région 412 entoure la première région 411, et comprend des surfaces en contact avec des surfaces de la première région 411.
- [0114] La photodiode 400 comprend en outre une quatrième région 414 semiconductrice fortement dopée de type N affleurant la face supérieure 400A de la photodiode 400, et une cinquième région 415 semiconductrice fortement dopée de type P, en contact avec, et entourant, la quatrième région 414, la liaison entre la quatrième région 414 et la cinquième région 415 fournissant une jonction PN supérieure 430, ou jonction PN principale. La photodiode 400 comprend également une sixième région 416 semiconductrice fortement dopée de type P affleurant la face supérieure 400A de la photodiode 400, correspondant également à une face supérieure de la deuxième région 412, et localisée autour de la première région 411.
- [0115] La première région 411 comporte une première portion 411A localisée sous la cinquième région 415 et une deuxième portion 411B comprise latéralement entre la cinquième région 415 et la deuxième région 412 et s'étendant jusqu'à la face supérieure 400A de la photodiode 400.
- [0116] Les régions semiconductrices sont situées dans un caisson 410 délimité par une tranchée isolante profonde 420.
- [0117] La [Fig.5] est une vue en coupe, partielle et schématique, représentant une photodiode 500 selon un autre mode de réalisation. Seule une moitié de la photodiode dans la direction X est représentée. La photodiode 500 se distingue de la photodiode 400 de la [Fig.4] principalement en ce que la première région épitaxiée 511 est de type N, au lieu d'être de type P.
- [0118] Les surfaces en contact des première 511 et deuxième 512 régions forment des jonctions PN complémentaires à la jonction PN principale 530, formée par la liaison entre la quatrième région 514 et la cinquième région 515 de la photodiode 500. Ces jonctions PN complémentaires permettent de former une zone de déplétion 532 schématiquement représentée par la courbe en traits mixtes, qui s'étend davantage vers le fond de la photodiode 500 que la photodiode 400 de la [Fig.4]. Par exemple, comme représenté, la première région 511 entoure la jonction PN principale 530.
- [0119] Les régions semiconductrices sont situées dans un caisson 510 délimité par une tranchée isolante profonde 520.
- [0120] La première région 511 comporte une première portion 511A localisée sous la cinquième région 515 et une deuxième portion 511B comprise latéralement entre la cinquième région 515 et la deuxième région 512 et s'étendant jusqu'à la face supérieure 500A de la photodiode 500.
- [0121] La deuxième région 512 comporte une portion latérale 512B entre la première région 511 et la tranchée isolante profonde 520, et une portion enterrée 512C entre la

première région 511 et la face inférieure 500B de la photodiode 500.

- [0122] Les inventeurs ont pu démontrer par des simulations qu'une photodiode selon un mode de réalisation, avec jonctions PN complémentaires, par exemple du type de la photodiode 500 de la [Fig.5] permet de créer des lignes de champ électrique dans les régions plus profondes de la photodiode par rapport à une photodiode du type de la photodiode 400 de la [Fig.4], sans jonction PN complémentaire.
- [0123] Les inventeurs ont également pu démontrer par des simulations qu'une photodiode selon un mode de réalisation, par exemple du type de la photodiode 500 de la [Fig.5], permet d'augmenter la hauteur de la photodiode sans pour autant augmenter le temps de déclenchement d'avalanche. A l'inverse, les inventeurs ont pu constater que pour une photodiode du type de la photodiode 400 de la [Fig.4], le fait d'augmenter sa hauteur augmente de manière importante le temps de déclenchement d'avalanche.
- [0124] Ainsi, une photodiode selon un mode de réalisation permet d'augmenter la hauteur de la photodiode, et ainsi disposer d'un plus grand volume de collection à largeur égale, par exemple pour augmenter la probabilité de détection de photons (PDP), sans augmenter la gigue temporelle.
- [0125] La [Fig.6A], la [Fig.6B], la [Fig.6C], la [Fig.6D], la [Fig.6E], la [Fig.6F] et la [Fig.6G] sont des vues en coupe représentant des étapes d'une méthode de fabrication d'une photodiode selon un mode de réalisation.
- [0126] La [Fig.6A] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de croissance épitaxiale sur un substrat 608, par exemple un substrat de silicium (Si), formant une couche épitaxiée 601 d'un premier type de conductivité, de type N dans l'exemple de méthode représentée. La croissance épitaxiale peut être réalisée à concentration de dopage constante, ou à concentration de dopage graduelle dans la direction Z, par exemple une concentration de dopage diminuant entre la face supérieure 600A de la photodiode et le substrat 608. La couche épitaxiée 601 permet de former la future première région de type N.
- [0127] La [Fig.6B] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de dopage par implantation ionique, de manière à former, dans la couche épitaxiée 601, une première portion 602A du deuxième type de conductivité (première portion de la deuxième région), de type P dans l'exemple de méthode représentée.
- [0128] La première portion 602A est, par exemple, formée à partir d'une distance d1 jusqu'à une distance d2 de la face supérieure 600A de la photodiode, par exemple en configurant les paramètres de l'implantation ionique pour permettre cette implantation entre d1 et d2.
- [0129] La première portion 602A de type P délimite une première portion 601A de la couche épitaxiée de type N (première portion de la première région) localisée sous la première portion 602A de type P et une troisième portion 601C de la couche épitaxiée

de type N localisée au-dessus de la première portion 602A.

- [0130] L'implantation ionique dans la couche épitaxiée 601 pour former la première portion 602A peut être réalisée à travers un masque 604, par exemple un masque obtenu par photolithographie. Par exemple, le masque 604 est adapté pour que la première portion 602A présente une forme en couronne, c'est-à-dire en conservant une deuxième portion 601B de la couche épitaxiée 601 de type N (deuxième portion de la première région) au centre de la première portion 602A de type P.
- [0131] Cette deuxième portion 601B de type N permet à la première région de présenter une forme en entonnoir, ce qui permet de favoriser la conduction de porteurs photogénérés depuis la première portion 601A de la première région vers la jonction PN supérieure 630 décrite plus après.
- [0132] La [Fig.6C] représente une structure obtenue à l'issue de plusieurs étapes de dopage par implantation ionique, de manière à former, dans la troisième portion 601C de la couche épitaxiée 601 :
- une région 604 fortement dopée de type N (quatrième région) et une région 605 fortement dopée de type P (cinquième région) lesdites quatrième et cinquième régions formant une jonction PN supérieure 630, la région 604 de type N affleurant la face supérieure 600A de la photodiode 600 et surmontant la région 605 de type P ;
 - une région d'anneau de garde 607 localisée autour de la région 604 de type N, et moins fortement dopée N que la région 604 ;
 - une région 606 fortement dopée P (sixième région) affleurant la face supérieure 600A, formée latéralement autour et à distance de la région d'anneau de garde 607.
- [0133] La région 604 de type N et la région 605 de type P peuvent être formés au-dessus de la deuxième portion 601B de la couche épitaxiée 601, voire déborder partiellement au-dessus de la première portion 602A de type P.
- [0134] Chaque implantation ionique peut être réalisée à travers un masque (non représenté), par exemple un masque obtenu par photolithographie, puis supprimé après implantation ionique.
- [0135] La [Fig.6D] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de gravure sur une largeur L1 d'un bord latéral 601D sur toute la circonférence de la couche épitaxiée 601 depuis la face supérieure 600A de la photodiode, la gravure se prolongeant par exemple jusqu'à une profondeur d3 dans le substrat de silicium 608. Ceci forme une tranchée latérale 622. Alternativement, la gravure peut être réalisée jusqu'à la limite entre le substrat de silicium 608 et la couche épitaxiée 601.
- [0136] La [Fig.6E] représente une structure obtenue à l'issue :
- d'une étape de remplissage de la tranchée latérale 622 avec un matériau isolant, par exemple du dioxyde de silicium (SiO₂), afin de former une tranchée isolante profonde 620 ; et

- d'une étape de formation d'une deuxième portion 602B de type P (deuxième portion de la deuxième région) latéralement entre la tranchée isolante profonde 620 et la couche épitaxiée 601 gravée.

- [0137] Par exemple, la tranchée isolante profonde 620 entoure les régions précédemment formées.
- [0138] Par exemple, la deuxième portion 602B de type P forme une zone de passivation de la photodiode, par exemple afin que celle-ci soit moins impactée par le courant d'obscurité.
- [0139] Par exemple, la deuxième portion 602B peut se faire, selon le type de passivation souhaitée :
- par dopage, par exemple par implantation ionique ;
 - en ajoutant un matériau dopant ou un matériau à inversion de charge dans le matériau isolant lors du remplissage de la tranchée latérale 622.
- [0140] Ainsi, la conductivité le long de la tranchée isolante profonde 620 peut être inversée sans implantation ionique par l'usage d'un matériau spécifique.
- [0141] Les figures 6A à 6E montrent que la tranchée isolante profonde 620 est formée après les étapes de dopage. Ceci n'est pas limitatif, et, en variante, la tranchée isolante profonde peut être formée avant les étapes de dopage.
- [0142] La [Fig.6F] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de gravure du substrat 608.
- [0143] Les figures 6A à 6F montrent que la tranchée isolante profonde 620 est formée avant l'étape de gravure du substrat 608. Ceci n'est pas limitatif, et, en variante, la tranchée isolante profonde peut être formée après cette étape de gravure du substrat. En outre, la tranchée isolante profonde peut être formée à partir de la face inférieure 600B de la photodiode.
- [0144] La [Fig.6G] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de formation, optionnelle, d'une troisième portion 602C de type P (troisième portion de la deuxième région).
- [0145] La troisième portion 602C de type P peut être formée par dopage, par exemple par implantation ionique, par exemple à partir de la face inférieure 600B de la photodiode.
- [0146] Alternativement, la troisième portion 602C de type P peut être formée par croissance épitaxiale, dans ce cas avant la formation par croissance épitaxiale de la couche épitaxiale 601 de type N.
- [0147] Par exemple, la troisième portion 602C de type P forme une zone de passivation de la photodiode, par exemple afin que celle-ci soit moins impactée par le courant d'obscurité.
- [0148] La photodiode 600 obtenue représentée en [Fig.6G] est similaire à la photodiode 200 de la [Fig.2].

- [0149] A partir de l'exemple de méthode de fabrication décrit ci-dessus, la personne du métier peut adapter la méthode pour fabriquer d'autres photodiodes selon les modes de réalisation, par exemple la photodiode 500 de la [Fig.5].
- [0150] Ainsi, un avantage des modes de réalisation décrits est que la photodiode peut être réalisée sans que cela n'en complexifie le procédé de fabrication.
- [0151] Un autre avantage des modes de réalisation décrits est qu'ils s'adaptent à des photodiodes de petite taille, par exemple, ayant des cotés inférieurs à 6 μm , et/ou à des photodiodes de hauteur par exemple comprise entre 4 et 10 μm , voire plus.
- [0152] Un autre avantage des modes de réalisation décrits est qu'ils permettent de réduire la taille, par exemple la largeur, de la photodiode sans que cela dégrade la probabilité de détection de photons et/ou augmente la gigue temporelle.
- [0153] 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.
- [0154] 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] Photodiode (200 ; 500) à avalanche comprenant :
- une jonction PN principale (230 ; 530) adaptée à être polarisée en inverse ; et
 - une pluralité de régions semiconductrices dont au moins :
 - une première région (211 ; 511) semiconductrice épitaxiée d'un premier type de conductivité ; et
 - une deuxième région (212 ; 512) semiconductrice du deuxième type de conductivité, ladite deuxième région étant agencée pour entourer au moins partiellement la première région, et comprenant des surfaces en contact avec des surfaces de ladite première région ;
 dans laquelle la jonction PN principale (230 ; 530) est formée par des quatrième (214 ; 514) et cinquième (215 ; 515) régions de la pluralité de régions semiconductrices ;
 la quatrième région étant fortement dopée du premier type de conductivité, et étant formée à partir d'une première face (200A ; 500A) de la photodiode ; et la cinquième région étant fortement dopée du deuxième type de conductivité, et étant formée sous, et en contact avec, la quatrième région ; et
 dans laquelle la première région (511) est dopée graduellement dans une direction (Z) perpendiculaire à la première face (500A).
- [Revendication 2] Photodiode (200 ; 500) selon la revendication 1, dans laquelle la quatrième région est plus fortement dopée que la première région et la cinquième région est plus fortement dopée que la deuxième région ; les quatrième et cinquième régions étant par exemple localisées au centre de la photodiode dans un plan parallèle à la première face.
- [Revendication 3] Photodiode (200 ; 500) selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle une sixième région (216 ; 516) de la pluralité de régions semiconductrices est formée latéralement autour, et à distance de, la quatrième région (214 ; 514) à partir de la première face (200A ; 500A) de la photodiode, la sixième région étant fortement dopée du deuxième type de conductivité, par exemple plus fortement dopée que la deuxième région.
- [Revendication 4] Photodiode (200) selon la revendication 3, dans laquelle une troisième région (213) semiconductrice de la pluralité de régions semiconductrices est formée entre la première face (200A) de la photodiode et la première région (211), la troisième région étant une région épitaxiée du premier type de conductivité, et les quatrième, cinquième et sixième régions

- (214, 215, 216) étant formées par dopage, par exemple par implantation ionique, dans ladite troisième région.
- [Revendication 5] Photodiode (200) selon la revendication 4, dans laquelle les première et troisième régions sont épitaxiées et dopées dans des conditions similaires, par exemple correspondant à des régions d'une même couche épitaxiée.
- [Revendication 6] Photodiode (200) selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans laquelle une région d'anneau de garde (217) de la pluralité de régions semiconductrices est formée autour de la quatrième région (214), la région d'anneau de garde étant du premier type de conductivité et étant plus faiblement dopée que la quatrième région (214).
- [Revendication 7] Photodiode (200 ; 500) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle les régions semiconductrices sont formées dans un caisson (210 ; 510) délimité par une tranchée isolante profonde (220 ; 520) s'étendant dans une direction (Z) perpendiculaire à la première face (200A ; 500A) de la photodiode.
- [Revendication 8] Photodiode (200 ; 500) selon la revendication 7, dans laquelle la deuxième région (212 ; 512) comporte une portion latérale (212B ; 512B) localisée entre la première région (211 ; 511) et la tranchée isolante profonde (220 ; 520).
- [Revendication 9] Photodiode (200 ; 500) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans laquelle la deuxième région (212 ; 512) comporte une portion enterrée (212C ; 512C) localisée entre la première région (211 ; 511) et une deuxième face (200B ; 500B) de la photodiode opposée à la première face.
- [Revendication 10] Photodiode (500) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle la première région (511) est dopée graduellement de manière décroissante entre la première face (500A) et une deuxième face (500B) de la photodiode opposée à la première face.
- [Revendication 11] Photodiode (200) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la première région (211) comporte une première portion (211A) et une deuxième portion (211B) moins large, dans un plan parallèle à la première face (200A), que la première portion, et localisée entre la première portion (211A) et la jonction PN principale (230).
- [Revendication 12] Photodiode (500) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la première région (511) entoure la jonction PN principale (530), par exemple comporte une première portion (511A) localisée sous la jonction PN principale (530), et une deuxième portion (511B)

- s'étendant jusqu'à la première face (500A) de la photodiode (500).
- [Revendication 13] Photodiode selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle la première région est à l'intérieur de la deuxième région.
- [Revendication 14] Photodiode selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans laquelle chaque dimension de la photodiode, dans un plan parallèle à une première face (200A) de la photodiode, est inférieure à 6 μm et/ou la hauteur de la photodiode est comprise entre 3 et 15 μm , par exemple comprise entre 6 et 10 μm .
- [Revendication 15] Méthode de fabrication d'une photodiode (600) à avalanche, comprenant une jonction PN principale (630) adaptée à être polarisée en inverse, la méthode comprenant la formation d'une pluralité de régions semiconductrices dont au moins :
- une première région semiconductrice épitaxiée d'un premier type de conductivité ; et
 - une deuxième région semiconductrice du deuxième type de conductivité, ladite deuxième région étant agencée pour entourer au moins partiellement la première région, et comprenant des surfaces en contact avec des surfaces de ladite première région ;
- dans laquelle la jonction PN principale (230 ; 530) est formée par des quatrième (214 ; 514) et cinquième (215 ; 515) régions de la pluralité de régions semiconductrices ;
- la quatrième région étant fortement dopée du premier type de conductivité, et étant formée à partir d'une première face (200A ; 500A) de la photodiode ; et la cinquième région étant fortement dopée du deuxième type de conductivité, et étant formée sous, et en contact avec, la quatrième région ; et
- dans laquelle la première région (511) est dopée graduellement dans une direction (Z) perpendiculaire à la première face (500A).
- [Revendication 16] Méthode selon la revendication 15, dans laquelle la formation de la pluralité de régions semiconductrices comprend :
- la formation par croissance épitaxiale d'une couche épitaxiée (601) du premier type de conductivité destinée à former la première région semiconductrice ; puis
 - la formation, par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, d'au moins une première portion (602A) de la deuxième région ; et
- la quatrième région et la cinquième région sont formées par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, à

partir de la première face (600A) de la photodiode.

[Revendication 17] Méthode selon la revendication 16, dans laquelle la deuxième région comporte une portion latérale localisée entre la première région et la tranchée isolante profonde, et la portion latérale (602B) de la deuxième région est formée par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, par changement partiel de conductivité de la couche épitaxiée, par diffusion à partir de la tranchée isolante profonde, ou par un matériau à inversion de charge dans la tranchée isolante profonde.

[Revendication 18] Méthode selon la revendication 16 ou 17, dans laquelle la deuxième région comporte une portion enterrée localisée entre la première région et une deuxième face de la photodiode opposée à la première face, et la portion enterrée (602C) de la deuxième région est formée par croissance épitaxiale, ou par dopage partiel de la couche épitaxiée, par exemple par implantation ionique, à partir de la deuxième face (600B) de la photodiode.

[Fig. 1]

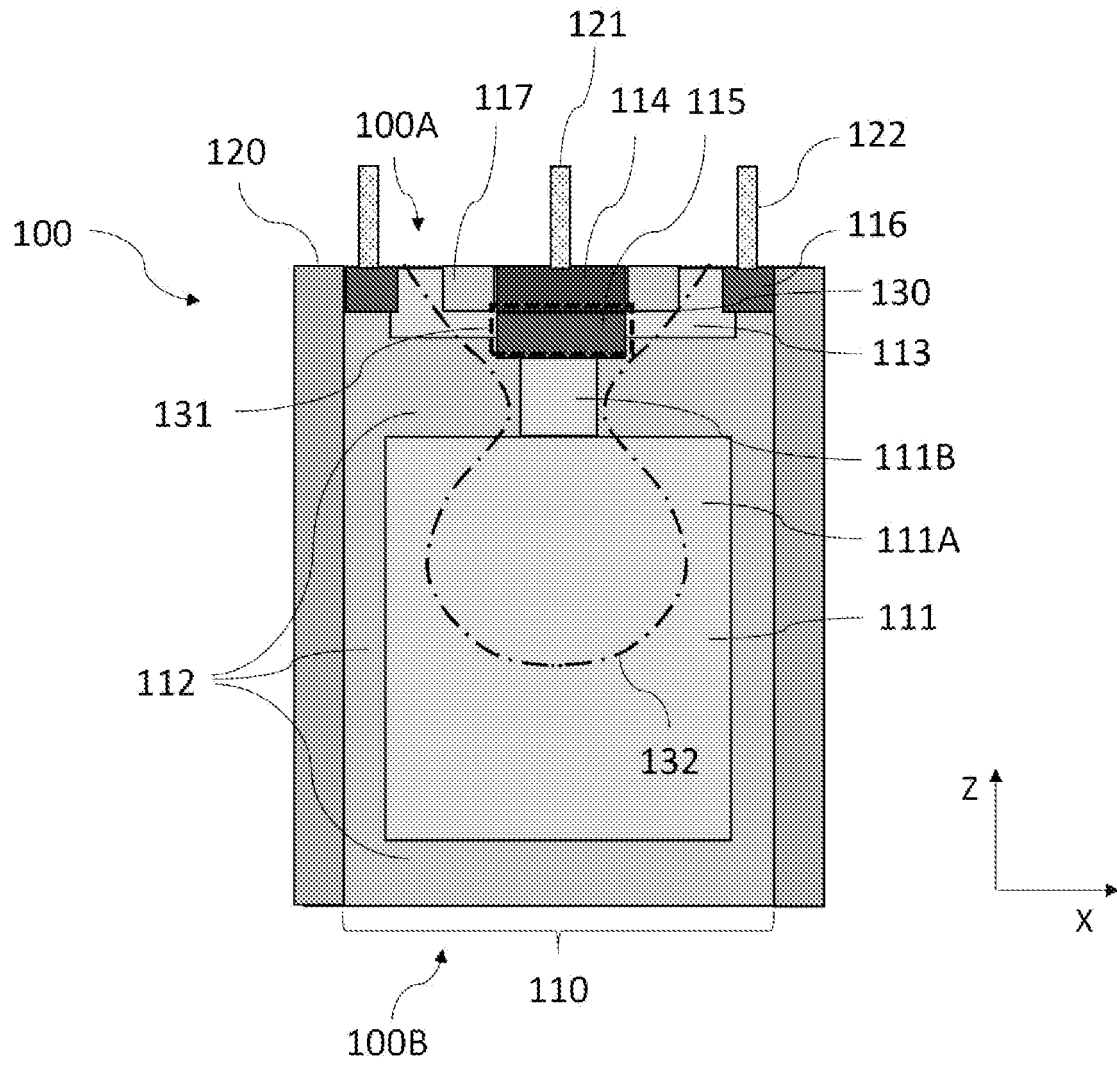


FIG. 1

[Fig. 2]

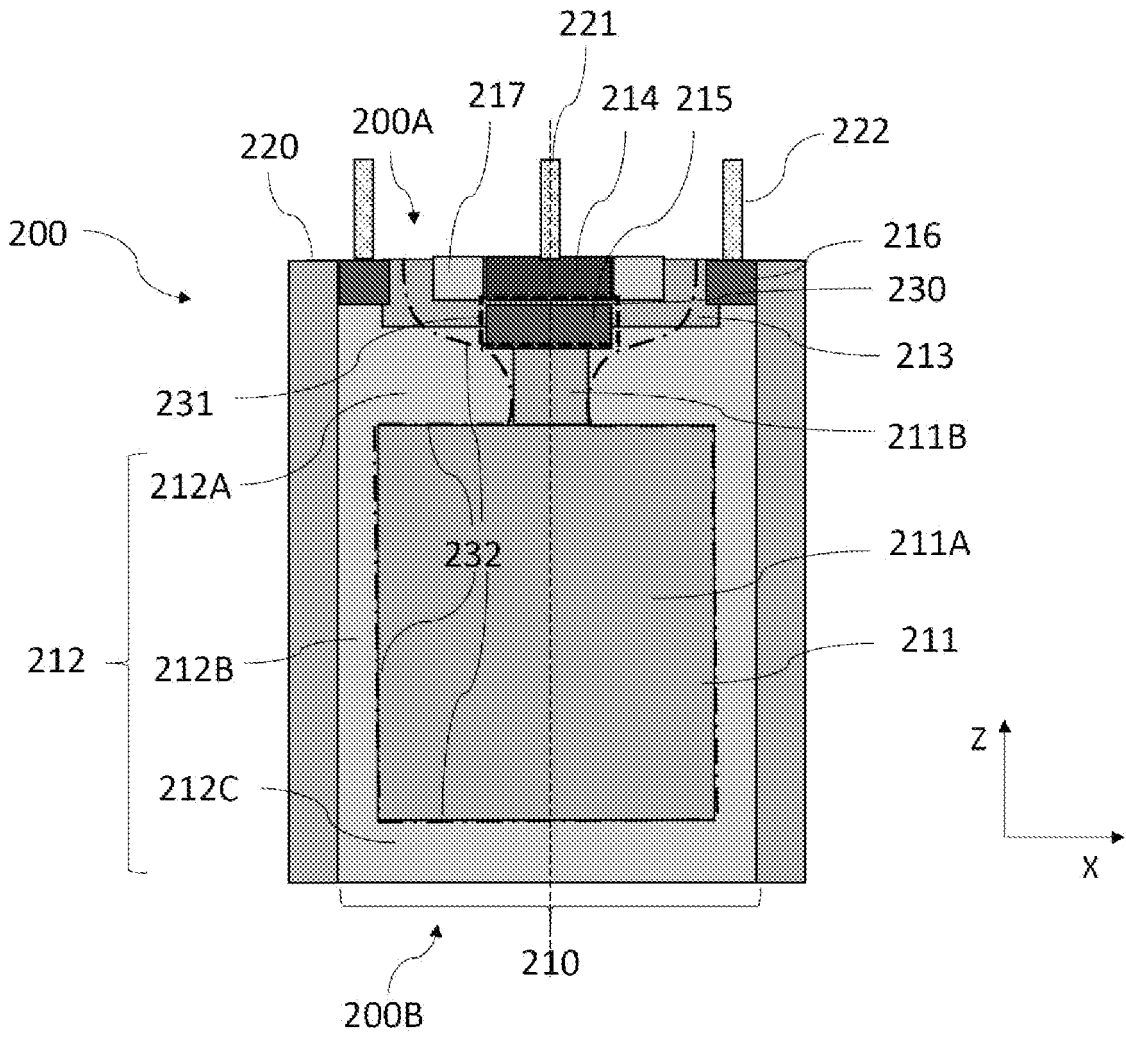


FIG. 2

[Fig. 3]

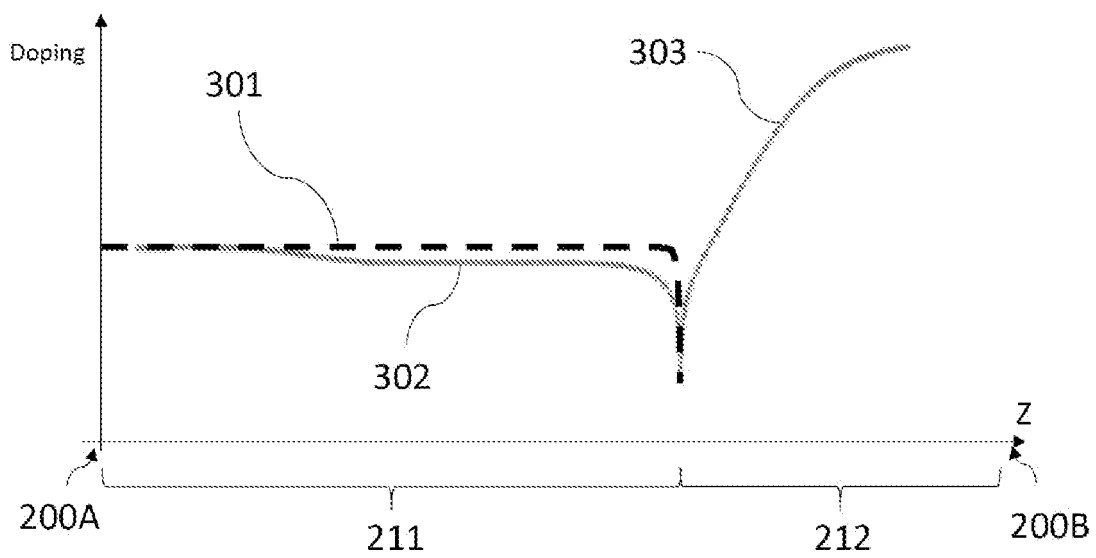
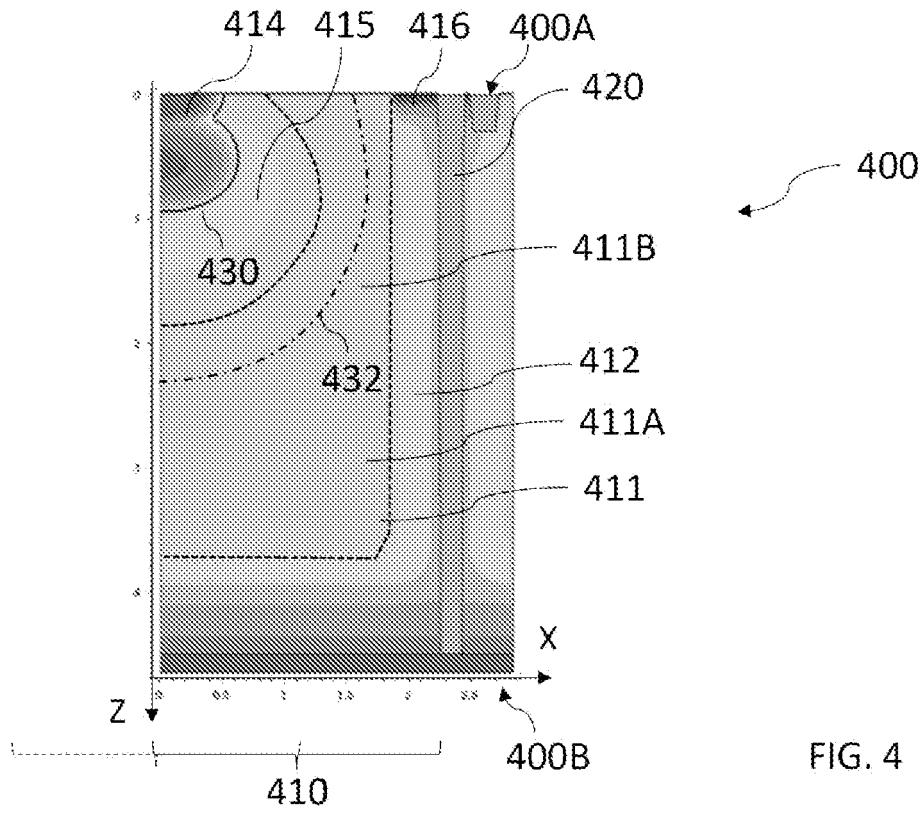
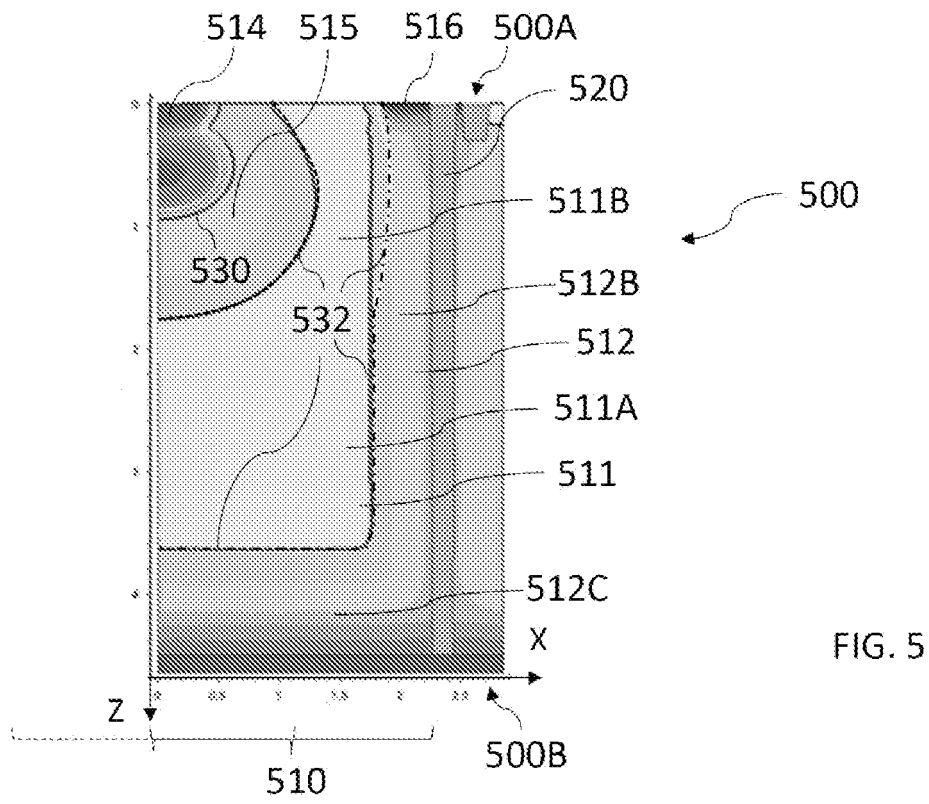


FIG. 3

[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6A]

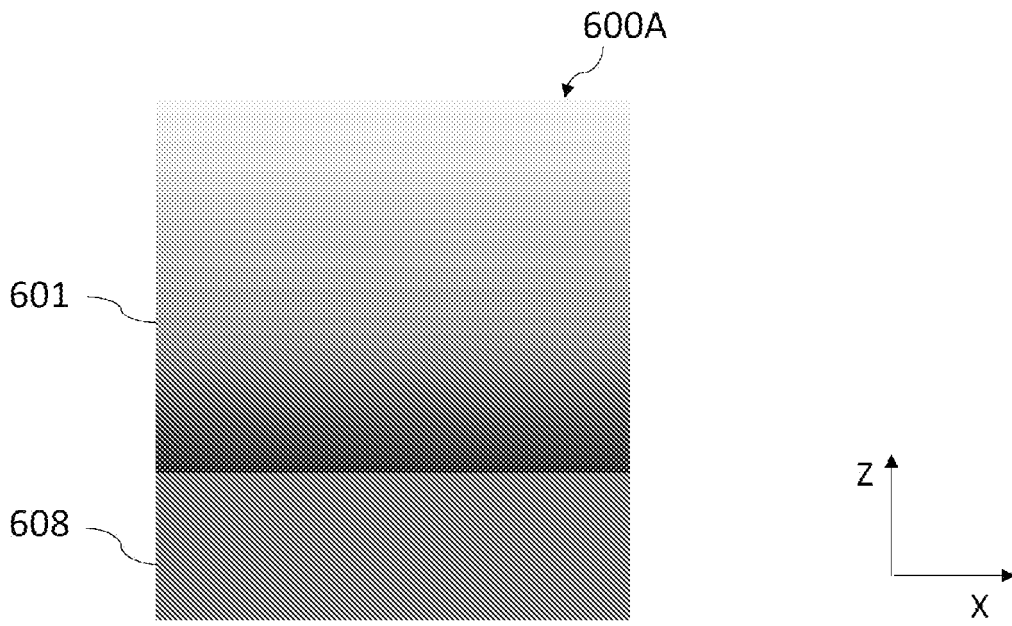


FIG. 6A

[Fig. 6B]

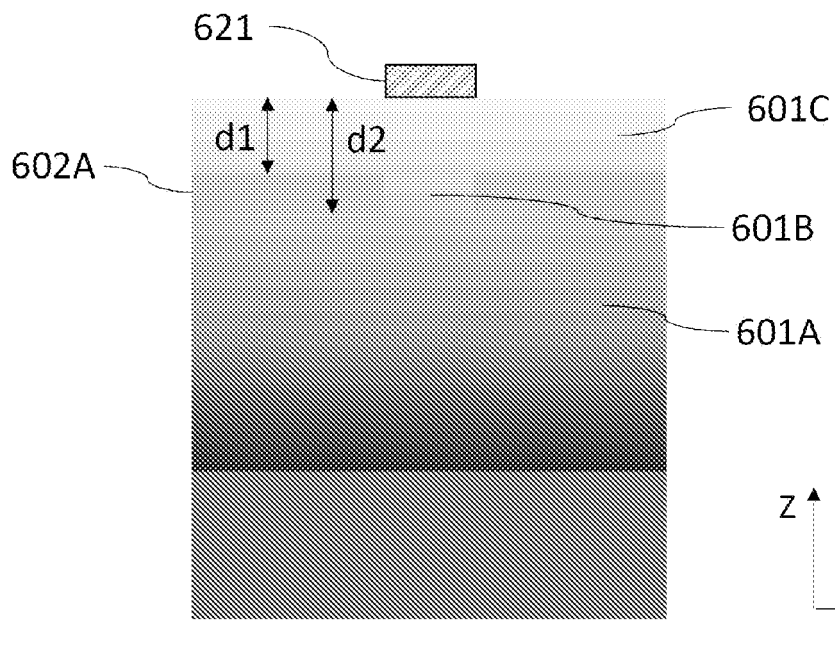


FIG. 6B

[Fig. 6C]

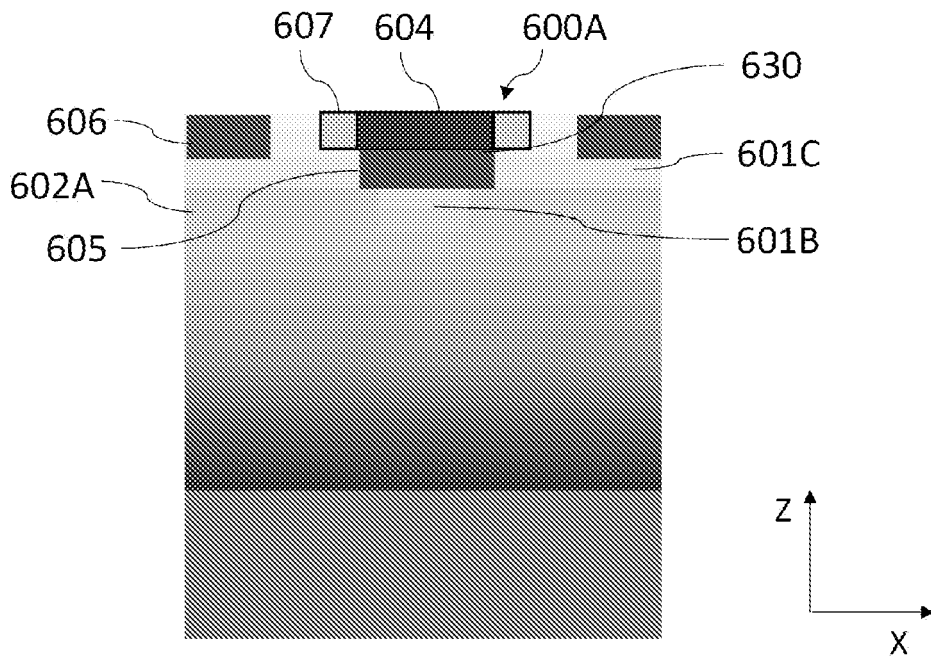


FIG. 6C

[Fig. 6D]

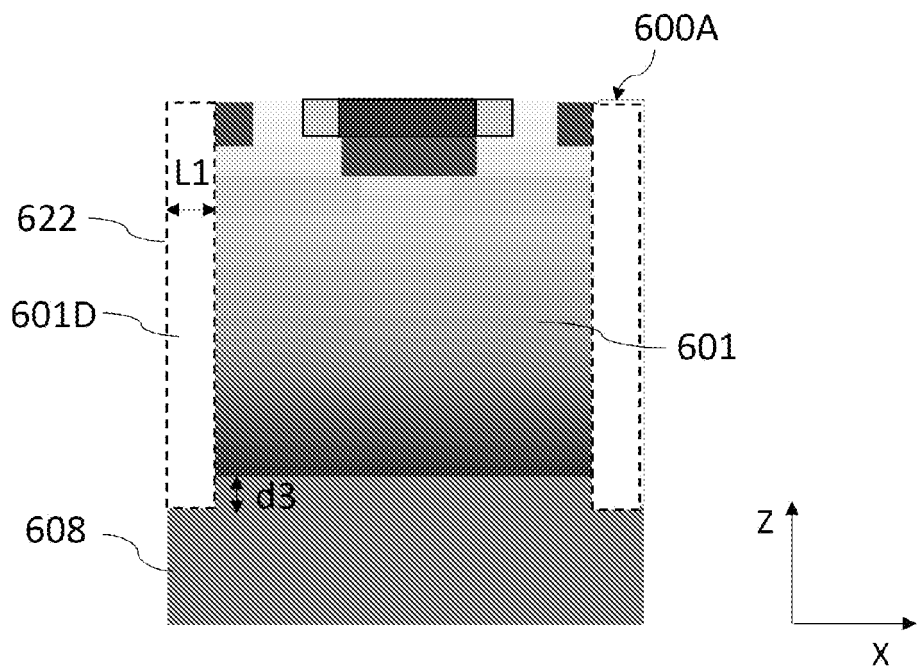


FIG. 6D

[Fig. 6E]

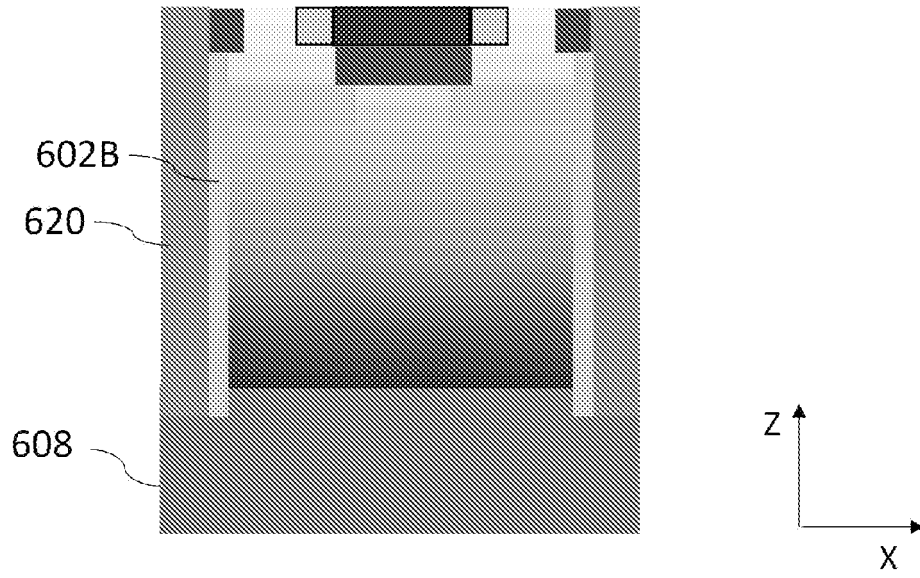


FIG. 6E

[Fig. 6F]

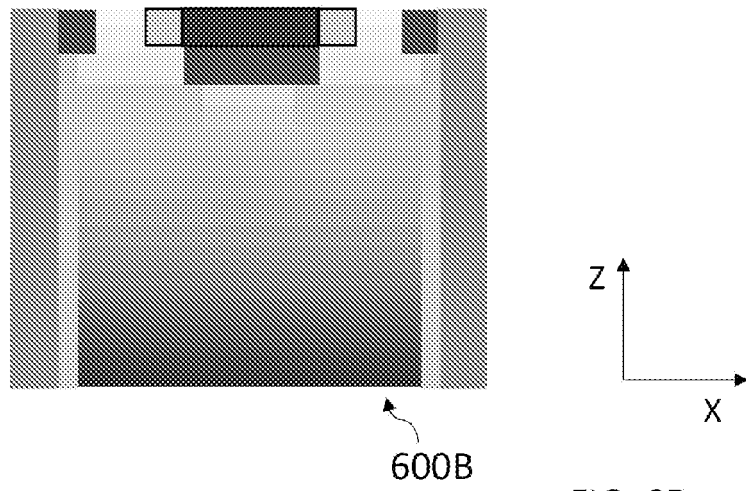


FIG. 6F

[Fig. 6G]

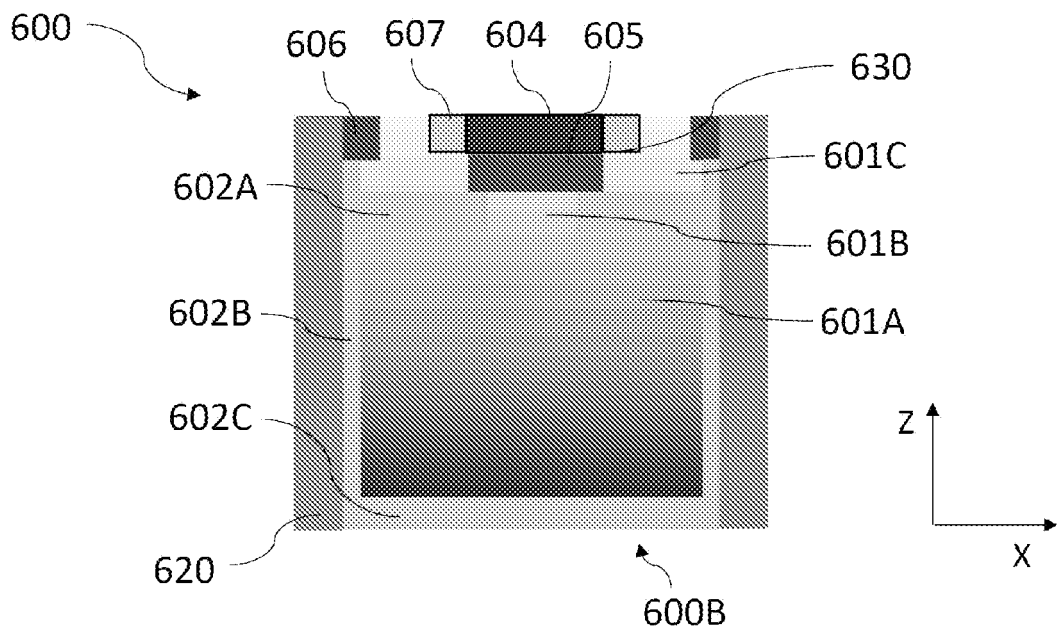


FIG. 6G

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**

EP 3 309 847 A1 (CANON KK [JP])
18 avril 2018 (2018-04-18)

US 2022/392944 A1 (TOCHIGI YASUHISA [JP]
ET AL) 8 décembre 2022 (2022-12-08)

CN 115 244 695 A (SONY SEMICONDUCTOR
SOLUTIONS CORP)
25 octobre 2022 (2022-10-25)

US 11 271 031 B2 (APPLE INC [US])
8 mars 2022 (2022-03-08)

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

NEANT

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

NEANT