

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

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

3 134 236

②1 N° d'enregistrement national : 22 02997

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : H 01 L 31/102 (2022.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 01.04.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 06.10.23 Bulletin 23/40.

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 (Crolles 2) SAS  
Société par actions simplifiée — FR.

⑦2 Inventeur(s) : RODRIGUES GONCALVES Boris et  
FONTENEAU Pascal.

⑦3 Titulaire(s) : STMicroelectronics (Crolles 2) SAS  
Société par actions simplifiée.

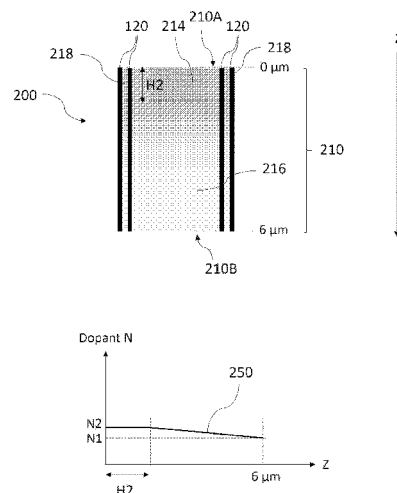
⑦4 Mandataire(s) : CABINET BEAUMONT.

⑤4 Photodiode et méthode de fabrication d'une photodiode.

⑤7 Photodiode et méthode de fabrication d'une photo-  
diode

La présente description concerne une photodiode (200) formée dans un substrat semiconducteur (210) présentant une première surface (210A) et une deuxième surface (210B), le substrat comprenant une première région semiconductrice (216) de type N formée par croissance épitaxiale et une deuxième région semiconductrice (214) de type N plus fortement dopée que la première région (216), ladite deuxième région s'étendant depuis la première surface (210A) du substrat jusqu'à une première profondeur (H2) dans la première région de type N; la concentration de dopant de la première région (216) de type N augmentant graduellement entre la deuxième surface (210B) et la première surface (210A) du substrat.

Figure pour l'abrégié: Fig. 2



FR 3 134 236 - A1



## Description

### **Titre de l'invention : Photodiode et méthode de fabrication d'une photodiode**

#### **Domaine technique**

[0001] La présente description concerne de façon générale les composants électroniques et plus précisément les photodiodes.

[0002] La présente description concerne également les dispositifs électroniques, tels que des capteurs d'images comportant des photodiodes.

#### **Technique antérieure**

[0003] Une photodiode est un composant semiconducteur présentant une jonction PN, et ayant la capacité de détecter un rayonnement lumineux et de le transformer en signal électrique. Plus précisément, la lumière forme des électrons dans une zone active de la photodiode. Ces électrons doivent ensuite être récupérés par un circuit électronique.

[0004] 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, l'information de chaque pixel étant obtenue par une ou plusieurs photodiodes.

[0005] Dans un capteur d'images à détection de temps de vol, ou capteur TOF ("Time of Flight" en anglais), un pixel reçoit la lumière émise par une source lumineuse puis renvoyée par un point de la scène conjugué avec ce pixel. La mesure du temps de vol, c'est-à-dire le temps mis par la lumière pour effectuer le trajet de la source lumineuse vers le point de la scène auquel est conjugué le pixel, et de ce point jusqu'au pixel, permet de calculer la distance séparant le pixel de ce point.

[0006] Dans un capteur d'images TOF à photodiodes, typiquement un capteur TOF indirect, les électrons formés à un instant donné, lors de la capture d'une scène, sont généralement transférés dans une mémoire, et la quantité d'électrons est ensuite lue par un circuit électronique de manière à obtenir une information sur la scène. Pour que l'information sur la scène soit précise et corresponde à un instant donné, il est préférable que les électrons se déplacent rapidement vers la mémoire.

[0007] En effet, pour un capteur TOF indirect, par exemple pour réaliser des images 3D, la précision de la mesure de distance est liée à l'efficacité d'échantillonnage des pixels, qui peut être définie par un paramètre dit "contraste de démodulation" ("demodulation contrast", DMC en anglais), et à la sensibilité à la lumière de fond. En d'autres termes, la précision de mesure est liée à la rapidité des photodiodes des pixels et peut être mesurée par le DMC. En outre, plus le temps de déplacement, ou temps de transfert, des électrons dans une photodiode est faible, plus le contraste de démodulation peut

être élevé, et inversement.

### **Résumé de l'invention**

- [0008] Il existe un besoin de réduire le temps de transfert des électrons dans une photodiode, par exemple, d'augmenter le contraste de démodulation d'un pixel comportant une telle photodiode.
- [0009] Un mode de réalisation pallie tout ou partie des inconvénients des photodiodes connues.
- [0010] Un mode de réalisation prévoit une photodiode formée dans un substrat semi-conducteur présentant une première surface et une deuxième surface, le substrat comprenant une première région semiconductrice de type N formée par croissance épitaxiale et une deuxième région semiconductrice de type N plus fortement dopée que la première région, ladite deuxième région s'étendant depuis la première surface du substrat jusqu'à une première profondeur dans la première région de type N ;  
la concentration de dopant de la première région de type N augmentant graduellement entre la deuxième surface et la première surface du substrat.
- [0011] Selon un mode de réalisation, le substrat comprend en outre une région de type P entre la première région de type N et la deuxième surface du substrat.
- [0012] Selon un mode de réalisation, la photodiode comprend en outre une région semiconductrice fortement dopée P, sur la deuxième région de type N au niveau de la première surface du substrat.
- [0013] Selon des modes de réalisation :
- la hauteur de la première région semiconductrice de type N est comprise entre 4,5  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ , par exemple entre 4,5 et 7,5  $\mu\text{m}$  ; et/ou
  - la profondeur de la deuxième région semiconductrice de type N est comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  ; et/ou
  - la hauteur de la région semiconductrice de type P est comprise entre 0,5  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ , par exemple entre 0,5 et 1,5  $\mu\text{m}$ .
- [0014] Un mode de réalisation prévoit une méthode de fabrication d'une photodiode dans un substrat semiconducteur présentant une première surface et une deuxième surface, la méthode comprenant :
- la fourniture d'un premier substrat ;
  - la formation, par croissance épitaxiale sur le premier substrat, d'une première région semiconductrice de type N, comprenant l'augmentation graduelle de la concentration de dopant de type N au cours de ladite croissance épitaxiale, de sorte que la première région de type N formée comprend une première surface la plus éloignée du premier substrat plus fortement dopée N qu'une deuxième surface la plus proche du premier substrat ; et

- la formation d'une deuxième région semiconductrice de type N plus fortement dopée que la première région, ladite deuxième région semiconductrice étant formée depuis la première surface de la première région, au niveau de la première surface du substrat, jusqu'à une première profondeur dans ladite première région.
- [0015] Selon des modes de réalisation pouvant s'appliquer à une photodiode ou à un procédé de fabrication d'une photodiode :
- la concentration de dopant de la première région de type N augmente dans un ratio compris entre 2 et 100, par exemple entre 2 et 10, voire entre 2 et 4 ; et/ou
  - la concentration de dopant de la deuxième région de type N est de quelques  $10^{17}$  at./cm<sup>3</sup> ; et/ou
  - la deuxième région de type N est formée par implantation ionique.
- [0016] Selon un mode de réalisation, le premier substrat comprend une région semiconductrice de type P, et la formation par croissance épitaxiale de la première région semiconductrice de type N est réalisée à partir de ladite région semiconductrice de type P.
- [0017] Selon un mode de réalisation, la méthode comprend, préalablement à la formation de la première région semiconductrice de type N, la formation d'une région semiconductrice de type P par croissance épitaxiale à partir du premier substrat, et la formation par croissance épitaxiale de la première région semiconductrice de type N est réalisée à partir de ladite région semiconductrice de type P formée.
- [0018] Selon des modes de réalisation pouvant s'appliquer à une photodiode ou à un procédé de fabrication d'une photodiode :
- la concentration de dopant de la région dopée P est sensiblement constante ; ou
  - la concentration de dopant de la région dopée P diminue graduellement entre la deuxième surface du substrat et la première région de type N.
- [0019] Selon un mode de réalisation, la méthode comprend la formation d'une région semiconductrice fortement dopée P sur la deuxième région de type N.
- [0020] Selon des modes de réalisation pouvant s'appliquer à une photodiode ou à un procédé de fabrication d'une photodiode :
- la concentration de dopant de la région fortement dopée P est comprise entre quelques  $10^{18}$  at./cm<sup>3</sup> et quelques  $10^{19}$  at./cm<sup>3</sup> ; et/ou
  - la région fortement dopée P est formée par implantation ionique ; et/ou
  - le substrat est en silicium ; et/ou
  - des tranchées isolantes sont formées dans la hauteur du substrat de manière à isoler la photodiode, lesdites tranchées pouvant par exemple former des isolations par tranchées profondes capacitives.
- [0021] Un mode de réalisation prévoit un dispositif électronique comprenant au moins une photodiode selon un mode de réalisation.
- [0022] Selon un mode de réalisation, le dispositif est un capteur d'images à temps de vol

comprenant une pluralité de pixels, chaque pixel comprenant la au moins une photodiode.

### **Brève description des dessins**

- [0023] 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 :
- [0024] la [Fig.1] est une vue en coupe représentant un exemple de photodiode ;
- [0025] la [Fig.2] est une vue en coupe représentant une photodiode selon un mode de réalisation ;
- [0026] la [Fig.3] est une vue en coupe représentant une photodiode selon un autre mode de réalisation ;
- [0027] la [Fig.4] est une vue en coupe représentant un autre exemple de photodiode ;
- [0028] la [Fig.5] illustre des profils de dopage d'une photodiode selon le mode de la [Fig.2] ;
- [0029] la [Fig.6] illustre des profils de dopage d'une photodiode selon le mode de la [Fig.3] et d'une photodiode selon une variante de la photodiode de la [Fig.3] ;
- [0030] la [Fig.7A], la [Fig.7B], la [Fig.7C], la [Fig.7D], la [Fig.7E] et la [Fig.7F] 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**

- [0031] 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.
- [0032] 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, les zones de mémoires, les circuits de transfert et de lecture ne sont pas détaillés, étant connus de la personne du métier. En outre, on a représenté principalement une photodiode, sachant qu'elle peut être intégrée dans un dispositif électronique, par exemple dans un pixel de capteur d'images, et un pixel peut comprendre une ou plusieurs photodiodes.
- [0033] 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.
- [0034] 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.

- [0035] Sauf précision contraire, les expressions "environ", "approximativement", "sensiblement", et "de l'ordre de" signifient à 10 % près, de préférence à 5 % près.
- [0036] La [Fig.1] est une vue en coupe illustrant une photodiode 100, par exemple une photodiode d'un pixel de capteur d'images. La photodiode 100 est formée dans un substrat semiconducteur 110, généralement en silicium. Le substrat 110 comprend une région semiconductrice 112 dopée P entourant au moins partiellement une région semiconductrice 114 dopée N, formant ainsi une jonction PN. La région 114 dopée N s'étend depuis une surface supérieure 110A (première surface) du substrat 110 jusqu'à une profondeur H1 dans la région 112 dopée P. La surface supérieure 114A de la région 114 dopée N est généralement recouverte d'une région semiconductrice fortement dopée P (non représentée), formant une autre jonction PN. Les régions semiconductrices dopées sont généralement en silicium.
- [0037] Dans l'exemple représenté, la hauteur de la photodiode 100 est d'environ 6  $\mu\text{m}$  et la profondeur H1 est égale à environ 2,5  $\mu\text{m}$ .
- [0038] La région 112 est dopée P avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z, correspondant à la hauteur de la photodiode, ladite concentration augmentant en s'éloignant de la région dopée N, c'est-à-dire diminuant entre la surface inférieure 100B (deuxième surface) du substrat 110 et la surface supérieure 110A dudit substrat. Par exemple, le dopage de type P de la région 112 résulte des concentrations de dopant, par exemple du bore, illustrées par le profil de dopage 150 ("Dopant P").
- [0039] La région 114 est par exemple une région d'implantation ionique fortement dopée N, typiquement de l'ordre de quelques  $10^{17}$  at/cm<sup>3</sup>.
- [0040] Comme représenté, la photodiode 100 est délimitée des deux côtés par des tranchées 120, s'étendant sur toute la hauteur de ladite photodiode. D'autres composants électroniques, par exemple d'autres photodiodes, peuvent être disposés de l'autre côté des tranchées. On a représenté deux tranchées 120 de chaque côté de la photodiode 100, comme expliqué plus après, mais il pourrait n'y avoir qu'une tranchée de chaque côté.
- [0041] Les tranchées 120 comprennent un matériau isolant, et, dans certains cas, un matériau conducteur ou semiconducteur. Par exemple, les tranchées 120 sont remplies d'un élément conducteur ou semiconducteur, tel que du métal ou du polysilicium, qui est isolé du substrat 110 par une couche d'isolant. Les tranchées peuvent ainsi former des isolations par tranchées profondes capacitives (en anglais "capacitive deep trench isolation", CDTI).
- [0042] De façon non illustrée, les tranchées 120 peuvent être polarisées. Les tranchées 120

permettent, par exemple, d'isoler électriquement la région 114 dopée N par rapport à des perturbations électromagnétiques ou des polarisations non souhaitées du substrat 110. Selon un exemple, les tranchées 120 sont polarisées négativement et le substrat 110 est à la masse. Cela permet d'obtenir une déplétion de la région 114 dopée N pour former une diode pincée (Pinned diode en anglais).

- [0043] La région 114 dopée N peut former une zone de collecte d'électrons. En d'autres termes, des électrons résultant d'un rayonnement lumineux frappant la photodiode 100 peuvent être accumulés dans la région 114 de type N.
- [0044] Ces électrons sont généralement transférés vers une zone de mémoire par un circuit de transfert qui peut comprendre, ou consister en, un transistor de transfert. La mémoire peut être une zone de stockage d'électrons 118 formée dans le substrat 110. On a représenté en [Fig.1] une zone de stockage 118 formée entre deux tranchées 120, et ce, de chaque côté de la photodiode 100. D'autres configurations sont possibles. Par exemple, une mémoire peut être formée dans une autre région du substrat 110, de préférence à proximité de la surface supérieure 110A du substrat 110, et une seule tranchée peut être formée de chaque côté de la photodiode 100.
- [0045] La lecture de la tension stockée dans la mémoire peut être réalisée en utilisant un circuit de lecture, comprenant par exemple un transistor à source suiveuse dont la grille est couplée à la mémoire (non représenté).
- [0046] Une solution pour favoriser le transfert des électrons vers la zone de collecte et la zone de stockage (mémoire), et en particulier pour augmenter la vitesse de transfert des électrons dans la photodiode (vitesse de transfert de charge) est la formation d'un champ électrique dans la photodiode, ce qui est permis au moins par chaque jonction PN. Cependant, dans l'exemple de photodiode représenté en [Fig.1], les inventeurs ont constaté que le champ est beaucoup plus élevé au niveau de la jonction PN que dans la couche P, et que les courbes d'iso-potential électrique sont éloignées entre elles, même avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z comme représenté et décrit plus avant.
- [0047] 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 la vitesse de transfert de charge de la photodiode, par exemple de générer un champ électrique le plus élevé et le mieux réparti possible dans la direction Z.
- [0048] 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.

- [0049] La [Fig.2] est une vue en coupe représentant une photodiode 200 selon un mode de réalisation, par exemple une photodiode d'un pixel de capteur d'images.
- [0050] La photodiode 200 est située dans un substrat semiconducteur 210, généralement en silicium. Le substrat 210 comprend une première région semiconductrice 216 dopée N entourant au moins partiellement une deuxième région semiconductrice 214 plus fortement dopée N qui s'étend depuis une surface supérieure 210A (première surface) du substrat 210 jusqu'à une profondeur H2 dans la première région 216 dopée N. La surface supérieure de la deuxième région 214 dopée N est généralement recouverte d'une région semiconductrice fortement dopée P (région d'implantation ionique P+, non illustrée en [Fig.2] mais illustrée en figures 7E et 7F), formant une jonction PN. Les régions semiconductrices dopées sont généralement en silicium.
- [0051] Selon l'exemple représenté, la hauteur de la photodiode est d'environ 6  $\mu\text{m}$  et la profondeur H2 est égale à environ 1,5  $\mu\text{m}$ , mais ces valeurs peuvent être adaptées par la personne du métier, par exemple en fonction des dimensions du pixel et/ou de la vitesse de transfert recherchée.
- [0052] La première région 216 est dopée N avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z, la concentration diminuant en s'éloignant de la deuxième région 214 dopée N, c'est-à-dire augmentant entre la surface inférieure 210B (deuxième surface) du substrat et la surface supérieure 210A dudit substrat.
- [0053] Selon un exemple, le dopage de type N de la première région 216 résulte des concentrations de dopant illustrées par le profil 250 ("Dopant N"), présentant une concentration maximale N2 de dopant (par exemple du phosphore) au plus proche de la deuxième région 214 diminuant jusqu'à une concentration de dopant N1 inférieure à N2 au plus loin de la deuxième région 214, c'est-à-dire une concentration augmentant graduellement entre N1 depuis la surface inférieure du substrat 210B et N2 au niveau de la deuxième région 214. N1 peut être par exemple comprise entre  $10^{14}$  et  $10^{16}$   $\text{at}/\text{cm}^3$ , voire entre  $10^{14}$  et  $10^{15}$   $\text{at}/\text{cm}^3$ . Le ratio N2/N1 peut être par exemple compris entre 2 et 100, voire entre 2 et 10, voire encore entre 2 et 4, par exemple égal à environ 2. La personne du métier saura adapter les valeurs de concentration de dopant et les ratios en fonction du matériau du substrat, du dopant, et en fonction du niveau de vitesse recherché.
- [0054] La deuxième région 214 est par exemple une région d'implantation ionique fortement dopée N (N+), typiquement de l'ordre de quelques  $10^{17}$   $\text{at}/\text{cm}^3$ . Elle peut former une zone de collecte d'électrons.
- [0055] Similairement à la photodiode 100 de la [Fig.1], la photodiode 200 est délimitée des deux côtés par des tranchées 120, s'étendant sur toute la hauteur de la photodiode. Les tranchées 120 peuvent être polarisées, en particulier, les tranchées 120 peuvent être polarisées négativement et le substrat 210 être à la masse, par exemple pour obtenir une

déplétion de la deuxième région 214 dopée N pour former une diode pincée (Pinned diode en anglais).

- [0056] Toujours similairement à ce qui a été décrit en relation avec la [Fig.1], les électrons collectés peuvent être transférés vers une zone de mémoire par un circuit de transfert qui peut comprendre, ou consister en, un transistor de transfert. La mémoire peut être une zone de stockage d'électrons 218 formée dans le substrat 210. Des zones de stockage 218 sont représentées entre deux tranchées 120, et ce, de chaque côté de la photodiode 200. D'autres configurations sont possibles. Par exemple, une mémoire peut être formée dans une autre région du substrat 210, de préférence à proximité de la surface supérieure 210A du substrat 210, et une seule tranchée peut être formée de chaque côté de la photodiode 200.
- [0057] La lecture de la tension stockée dans la mémoire peut être réalisée en utilisant un circuit de lecture, comprenant par exemple un transistor à source suiveuse dont la grille est couplée à la mémoire (non représenté).
- [0058] La [Fig.3] est une vue en coupe représentant une photodiode 300 selon un autre mode de réalisation, qui se distingue du mode de la [Fig.2] principalement en ce qu'elle comprend une région 312 dopée P sous la première région 316 dopée N. Ceci permet par exemple de former une autre jonction PN, et d'augmenter ainsi le champ électrique autour de cette jonction, et par incidence dans la photodiode.
- [0059] Dans l'exemple représenté, la hauteur de la photodiode est d'environ 6  $\mu\text{m}$  et la région 312 dopée P est située entre 5 et 6  $\mu\text{m}$  (la région 312 présente donc une épaisseur de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$ ), mais ces valeurs peuvent être adaptées par la personne du métier, par exemple en fonction des dimensions du pixel et/ou de la vitesse de transfert recherchée.
- [0060] Selon un exemple illustré par le profil de dopage 351 ("Dopant P"), la région 312 est dopée P avec une concentration P1 de dopant, par exemple du bore, sensiblement constante. P1 peut être par exemple comprise entre  $10^{14}$  et  $10^{18}$   $\text{at}/\text{cm}^3$ , voire entre  $10^{14}$  et  $10^{16}$   $\text{at}/\text{cm}^3$ . La personne du métier saura adapter les valeurs de concentration de dopant en fonction du matériau du substrat, du dopant, et en fonction du niveau de vitesse recherché.
- [0061] Selon une variante illustrée par le profil de dopage 352 ("Dopant P"), la région dopée P peut être dopée avec une concentration de dopant, par exemple du bore, graduelle dans la direction Z, diminuant en s'approchant de la première région 316 dopée N, c'est-à-dire avec une concentration de dopant diminuant graduellement entre la surface inférieure 310B du substrat 310 et la première région 316 dopée N, entre une concentration P2 et la concentration P1 de dopant. Le ratio P2/P1 peut être par exemple compris entre 10 et 1000, voire entre 10 et 100. La personne du métier saura adapter les valeurs de concentration de dopant et les ratios en fonction du matériau du

substrat, du dopant, et en fonction du niveau de vitesse recherché.

- [0062] La première région 316 est dopée N avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z, ladite concentration diminuant en s'éloignant de la deuxième région 314 dopée N vers la région 312 dopée P. Par exemple, le dopage de type N de la première région 316 résulte des concentrations de dopant illustrées par le profil de dopage 350 ("Dopant N"), présentant une concentration maximale N4 de dopant (par exemple du phosphore) au plus proche de la deuxième région 314 dopée N diminuant jusqu'à une concentration N3 au niveau de la région 312 dopée P. N3 peut être comprise dans les mêmes plages que celles données pour N1, par exemple peut avoir une valeur sensiblement égale à N1, et le ratio N4/N3 peut être compris dans les mêmes plages que celles données pour le ratio N2/N1, par exemple être sensiblement égal au ratio N2/N1.
- [0063] Similairement à la photodiode 200 de la [Fig.2], la photodiode 300 comprend une deuxième région semiconductrice 314 plus fortement dopée N que la première région 316 et qui s'étend depuis la surface supérieure 310A du substrat 310 jusqu'à une profondeur H2 dans ladite première région. La surface supérieure de la deuxième région 314 dopée N est généralement recouverte par une région semiconductrice fortement dopée P (région d'implantation ionique P+), formant une jonction PN.
- [0064] La deuxième région 314 est par exemple une région d'implantation ionique fortement dopée N (N+), typiquement de l'ordre de quelques  $10^{17}$  at/cm<sup>3</sup>. La deuxième région 314 peut former une zone de collecte d'électrons.
- [0065] Similairement à la photodiode 200 de la [Fig.2], la photodiode 300 est délimitée des deux côtés par des tranchées 120, s'étendant sur toute la hauteur de la photodiode, et les électrons collectés peuvent être transférés vers des zones de stockage d'électrons 318 représentées entre deux tranchées 120.
- [0066] Dans les modes de réalisation des figures 2 et 3, et plus généralement dans une photodiode selon un mode de réalisation, la première région 216, 316 dopée N et, lorsqu'elle est présente, la région 312 dopée P, sont des régions obtenues de préférence par croissance épitaxiale, la technique d'implantation ionique ne permettant généralement pas, avec des énergies d'implantation raisonnables, d'obtenir de telles concentrations de dopage sur de telles profondeurs.
- [0067] En outre, la première région 216, 316 dopée N fonctionne comme une extension de la deuxième région 214, 314 fortement dopée N avec une concentration de dopage qui diminue en s'éloignant de ladite deuxième région jusqu'à une valeur qui peut être suffisamment faible pour s'apparenter à une zone P, c'est-à-dire pour former une pseudo-jonction PN au fond du substrat, sans qu'il soit toujours nécessaire de former une région épitaxiée de type P au fond dudit substrat. Ce dopage N graduel permet de générer un champ électrique plus graduel et plus fort dans la direction Z (lignes d'iso-potentiel plus nombreuses et plus resserrées dans ladite direction) et ainsi

favoriser le déplacement des charges dans la photodiode.

[0068] La [Fig.4] est une vue en coupe représentant un autre exemple de photodiode 400, qui se distingue de la photodiode 300 de la [Fig.3] principalement en ce que la première région 416 est dopée N avec une concentration sensiblement constante, et non graduelle.

[0069] Selon un exemple illustré par le profil de dopage 452 ("Dopant N"), la région 416 est dopée N avec une concentration N5 sensiblement constante de dopant, par exemple du phosphore. N5 peut être comprise dans les mêmes plages que celles données pour N1, par exemple peut avoir une valeur sensiblement égale à N1.

[0070] Selon un exemple illustré par le profil de dopage 451 ("Dopant P"), la région 412 est dopée P avec une concentration P3 de dopant, par exemple du bore. P3 peut être sensiblement égale à N5, ou plus largement comprise dans les mêmes plages que celles données pour P1.

[0071] Similairement à la photodiode de la [Fig.3], selon une variante, la région dopée P peut être dopée avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z, la concentration de dopant diminuant graduellement entre la surface inférieure 410B du substrat 410 et la première région 416 dopée N, par exemple similairement à ce qui est décrit en relation avec la [Fig.3] (courbe 352).

[0072] Selon l'exemple représenté, la hauteur de la photodiode 400 est d'environ 6  $\mu\text{m}$  et la région 412 dopée P est située entre 4 et 6  $\mu\text{m}$  (la région 412 présente donc une épaisseur de l'ordre de 2  $\mu\text{m}$ ), mais ces valeurs peuvent être adaptées par la personne du métier, par exemple en fonction des dimensions du pixel et/ou de la vitesse de transfert recherchée.

[0073] Le tableau 1 ci-dessous regroupe des résultats comparés entre les photodiodes 100, 200, 300, 400 en termes de contraste de démodulation (DMC) à 200 MHz et à 300 MHz, et de temps de transfert de charge. Les photodiodes comparées présentent des dimensions similaires et des concentrations de dopage comparables entre elles.

[0074] [Tableaux1]

Photodiode	100	200	300	400
DMC à 200MHz	80	87	92	83
DMC à 300MHz	67	77	86	74
Temps de transfert (ns)	590	440	315	480

[0075] Il ressort de ces résultats que les modes de réalisation de photodiodes 200, 300 comprenant une région épitaxiée graduelle de type N améliorent nettement le contraste de démodulation, et diminuent avantageusement le temps de transfert, améliorant ainsi

le fonctionnement de la photodiode par rapport à la photodiode 100. Le mode de réalisation de la photodiode 300 comprenant une région épitaxiée graduelle de type N sur une région épitaxiée constante de type P améliore encore davantage le fonctionnement de la photodiode, qui pourrait encore être amélioré avec une région épitaxiée graduelle de type P.

- [0076] Il ressort aussi de ces résultats que la photodiode 400 décrite en relation avec la [Fig.4], dans laquelle la région épitaxiée de type N n'est pas graduelle mais est formée sur une région épitaxiée constante de type P, améliore également le contraste de modulation, et diminue avantageusement le temps de transfert.
- [0077] La [Fig.5] illustre des profils 501, 502 de dopage N dans la direction Z d'une photodiode 200 selon le mode de la [Fig.2]. La courbe en pointillés 501 correspond à un profil de dopage théorique, qui correspond sensiblement au profil donné en [Fig.2]. La courbe en continu 502 correspond au profil de dopage réel de la même photodiode mesuré par spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), qui présente des variations de part et d'autre du profil théorique.
- [0078] La [Fig.6] illustre des profils 601, 602 de dopage dans la direction Z d'une photodiode 300 selon le mode de la [Fig.3], et des profils 603, 604 de dopage dans la direction Z d'une photodiode selon la variante de la photodiode de la [Fig.3] dans laquelle la région dopée P est dopée avec une concentration de dopant graduelle dans la direction Z. Les profils 601 et 603 sont sensiblement similaires : les pics 601a et 603a correspondent à la région (d'implantation ionique) de type P+ en surface supérieure du substrat, les pics 601b et 603b correspondent à la deuxième région (d'implantation ionique) de type N sous la région P+, et les portions 601c, 603c correspondent à la première région (épitaxiée) dopée N graduellement (concentration diminuant dans la direction Z entre N4 et N3). Les profils 602 et 604 correspondent à la région (épitaxiée) dopée P de chaque photodiode, et sont donc différents. Les profils de dopage 602 et 604 correspondent respectivement à une concentration de dopant P sensiblement constante (P1) et une concentration de dopant P graduelle dans la direction Z (augmentant dans la direction Z entre P1 et P2).
- [0079] Pour la [Fig.6] et les figures 7A à 7F, les concentrations N3, N4, P1, P2 de dopants font référence à la [Fig.3] et à la description associée.
- [0080] Les figures 7A à 7F sont des vues en coupe représentant des étapes d'une méthode de fabrication d'une photodiode selon un mode de réalisation.
- [0081] La [Fig.7A] représente un substrat 703 de départ (premier substrat) comprenant un support 701 fortement dopé P surmonté d'une couche 702 en silicium dopée P.
- [0082] La [Fig.7B] représente un substrat 704 obtenu à l'issue d'une étape de croissance épitaxiale avec un gaz comprenant du silicium et un dopant de type P, par exemple du bore, de manière à former une couche épitaxiée 712 de silicium dopée P (région de

type P), par exemple d'une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$  environ. La concentration de dopant P de la couche épitaxiée est par exemple égale à P1 et est sensiblement constante au cours de la croissance.

- [0083] Selon une variante, la concentration de dopant P diminue graduellement au cours de la croissance épitaxiale. Par exemple, en début de croissance, la concentration de dopant est égale à P2 puis diminue graduellement jusqu'à P1 en fin de croissance.
- [0084] Il est à noter que, selon une variante de méthode, le substrat de départ (premier substrat) peut être ce substrat 704 fourni avec la couche épitaxiée de type P, constante ou graduelle.
- [0085] La [Fig.7C] représente un substrat 705 obtenu à l'issue d'une étape de croissance épitaxiale avec un gaz comprenant du silicium et un dopant de type N, par exemple du phosphore ou de l'arsenic, la concentration de dopant augmentant graduellement à partir de la couche épitaxiée 712 dopée P, de manière à former une couche épitaxiée 716 de silicium dopée N graduellement (première région de type N), par exemple d'une épaisseur de 5  $\mu\text{m}$ . En début de croissance, la concentration de dopant N de la couche épitaxiée est par exemple égale à N3 puis augmente graduellement jusqu'à N4 en fin de croissance.
- [0086] La [Fig.7D] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape de formation de tranchées isolantes 720, par exemple par gravure à travers des ouvertures d'un masque dur déposé sur la surface supérieure 716A de la couche épitaxiée 716 dopée N (masque dur non représenté). Les tranchées peuvent être isolées du substrat puis remplies par exemple avec un matériau conducteur ou semiconducteur, comme un métal ou du polysilicium pour obtenir des tranchées d'isolation (CDTI) similaires aux tranchées d'isolation 120 des figures 2 et 3. Le masque dur est ensuite supprimé.
- [0087] La [Fig.7E] représente une structure obtenue à l'issue d'une étape d'implantation ionique à partir de la surface supérieure 716A de la couche épitaxiée 716 dopée N pour former, entre les tranchées 720, des régions 714 fortement dopées N (plus fortement que la couche épitaxiée 716), puis une étape d'implantation ionique en surface supérieure de chaque région 714 fortement dopée N, pour former des régions 718 fortement dopées P.
- [0088] Les concentrations de dopant N des régions d'implantation 714 sont par exemple égales à quelques  $10^{17}$  at./ $\text{cm}^3$ . Les concentrations de dopant P des régions d'implantation 718 sont par exemple comprises entre quelques  $10^{18}$  at./ $\text{cm}^3$  et quelques  $10^{19}$  at./ $\text{cm}^3$ . Les hauteurs des régions d'implantation 714 peuvent être de l'ordre du micromètre, par exemple environ 1,5  $\mu\text{m}$ . Les hauteurs des régions d'implantation 718 peuvent être de quelques dizaines de nanomètres, par exemple environ 50 nm.
- [0089] La [Fig.7F] représente une structure 700 (photodiode) obtenue à l'issue de la formation d'une structure d'interconnexion 730 sur la surface supérieure de la structure

de la [Fig.7E] (surface qui comporte les régions 714, 718 d'implantation ionique) et d'une étape de polissage sur la surface inférieure de ladite structure (surface qui comporte le substrat de départ 703). La structure d'interconnexion comprend typiquement des couches isolantes dans lesquelles sont disposés des éléments d'interconnexion tels que des vias conducteurs, des pistes conductrices et/ou des plots conducteurs. L'étape de polissage est adaptée à supprimer le support 701, tout ou partie de la couche 702, voire une faible épaisseur de la couche 712. Elle peut être réalisée en retournant la structure de la [Fig.7E], par exemple après la formation de la structure d'interconnexion.

- [0090] Une photodiode selon un mode de réalisation peut être comprise dans un pixel de capteur TOF indirect, afin par exemple d'améliorer le contraste de démodulation, ou dans un pixel de capteur TOF direct, afin par exemple d'améliorer un autre paramètre, tel que la résolution temporelle.
- [0091] Divers modes de réalisation et variantes ont été décrits. La personne du métier comprendra que certaines caractéristiques de ces divers modes de réalisation et variantes pourraient être combinées, et d'autres variantes apparaîtront à la personne du métier. En particulier, la personne du métier pourra adapter les étapes de croissance épitaxiale, par exemple la nature des gaz et des dopants, ainsi que les étapes d'implantation ionique.
- [0092] 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 ; 300) formée dans un substrat semiconducteur (210 ; 310) présentant une première surface (210A ; 310A) et une deuxième surface (210B ; 310B), le substrat comprenant une première région semiconductrice (216 ; 316) de type N formée par croissance épitaxiale et une deuxième région semiconductrice (214 ; 314) de type N plus fortement dopée que la première région (216 ; 316), ladite deuxième région s'étendant depuis la première surface (210A ; 310A) du substrat jusqu'à une première profondeur (H2) dans la première région de type N ;  
la concentration de dopant de la première région (216 ; 316) de type N augmentant graduellement entre la deuxième surface (210B ; 310B) et la première surface (210A ; 310A) du substrat.
- [Revendication 2] Photodiode (300) selon la revendication 1, dans laquelle le substrat (310) comprend en outre une région (312) de type P entre la première région (316) de type N et la deuxième surface (310B) du substrat.
- [Revendication 3] Photodiode (300) selon la revendication 2, dans laquelle la concentration de dopant de la région dopée P (312 ; 712) est sensiblement constante.
- [Revendication 4] Photodiode (300) selon la revendication 2 ou 3, dans laquelle la concentration de dopant de la région dopée P (312 ; 712) diminue graduellement entre la deuxième surface (310B ; 710B) du substrat (310 ; 710) et la première région (316 ; 716) de type N.
- [Revendication 5] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant en outre une région semiconductrice fortement dopée P, sur la deuxième région (214 ; 314) de type N au niveau de la première surface (210A ; 310A) du substrat.
- [Revendication 6] Photodiode selon la revendication 5, dans laquelle la concentration de dopant de la région (718) fortement dopée P est comprise entre quelques  $10^{18}$  at./cm<sup>3</sup> et quelques  $10^{19}$  at./cm<sup>3</sup>.
- [Revendication 7] Photodiode selon la revendication 5 ou 6, dans laquelle la région (718) fortement dopée P est formée par implantation ionique.
- [Revendication 8] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle :  
- la hauteur de la première région semiconductrice (216 ; 316) de type N est comprise entre 4,5  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$ , par exemple entre 4,5 et 7,5  $\mu\text{m}$  ; et/ou

- la profondeur (H2) de la deuxième région semiconductrice (214 ; 314) de type N est comprise entre 1  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  ; et/ou
  - la hauteur de la région semiconductrice (312) de type P est comprise entre 0,5  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ , par exemple entre 0,5 et 1,5  $\mu\text{m}$ .
- [Revendication 9] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans laquelle la concentration de dopant de la première région (216 ; 316 ; 716) de type N augmente dans un ratio compris entre 2 et 100, par exemple entre 2 et 10, voire entre 2 et 4.
- [Revendication 10] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle la concentration de dopant de la deuxième région (214 ; 314 ; 714) de type N est de quelques  $10^{17}$  at./cm<sup>3</sup>.
- [Revendication 11] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, dans laquelle la deuxième région (214 ; 314 ; 714) de type N est formée par implantation ionique.
- [Revendication 12] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, dans laquelle le substrat est en silicium.
- [Revendication 13] Photodiode (200 ; 300) selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle des tranchées isolantes (120 ; 720) sont formées dans la hauteur du substrat (210 ; 310 ; 710) de manière à isoler ladite photodiode, lesdites tranchées pouvant par exemple former des isolations par tranchées profondes capacitives.
- [Revendication 14] Méthode de fabrication d'une photodiode (700) dans un substrat semi-conducteur (710) présentant une première surface (710A) et une deuxième surface (710B), la méthode comprenant :
- la fourniture d'un premier substrat (703, 704) ;
  - la formation, par croissance épitaxiale sur le premier substrat, d'une première région semiconductrice (716) de type N, comprenant l'augmentation graduelle de la concentration de dopant de type N au cours de ladite croissance épitaxiale, de sorte que la première région (716) de type N formée comprend une première surface (716A) la plus éloignée du premier substrat plus fortement dopée N qu'une deuxième surface (716B) la plus proche du premier substrat ; et
  - la formation d'une deuxième région semiconductrice (714) de type N plus fortement dopée que la première région (716), ladite deuxième région semiconductrice étant formée depuis la première surface (716A) de la première région (716), au niveau de la première surface (710A) du substrat (710), jusqu'à une première profondeur (H2) dans ladite première région.

- [Revendication 15] Méthode de fabrication selon la revendication 14, dans laquelle le premier substrat (704) comprend une région semiconductrice (712) de type P, la formation par croissance épitaxiale de la première région semiconductrice (716) de type N étant réalisée à partir de ladite région semiconductrice de type P.
- [Revendication 16] Méthode de fabrication selon la revendication 14, comprenant, préalablement à la formation de la première région semiconductrice (716) de type N, la formation d'une région semiconductrice (712) de type P par croissance épitaxiale à partir du premier substrat (703) ; la formation par croissance épitaxiale de la première région semiconductrice (716) de type N étant réalisée à partir de ladite région semiconductrice de type P formée.
- [Revendication 17] Méthode de fabrication selon l'une quelconque des revendications 14 à 16, comprenant la formation d'une région semiconductrice (718) fortement dopée P sur la deuxième région (714) de type N.
- [Revendication 18] Dispositif électronique comprenant au moins une photodiode selon l'une quelconque des revendications 1 à 13.
- [Revendication 19] Dispositif électronique selon la revendication 18, ledit dispositif étant un capteur d'images à temps de vol comprenant une pluralité de pixels, chaque pixel comprenant la au moins une photodiode.

[Fig. 1]

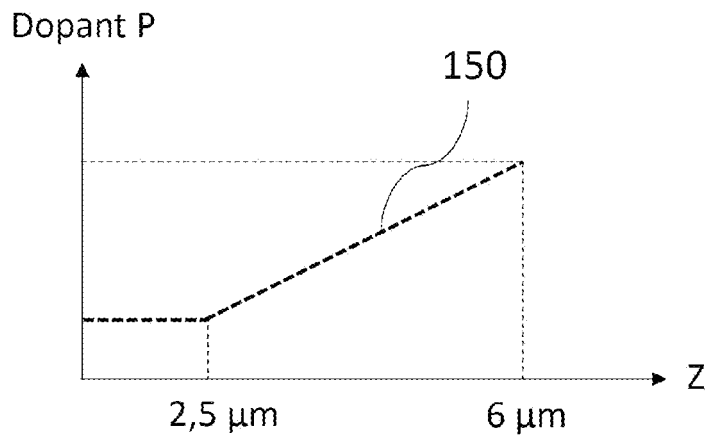
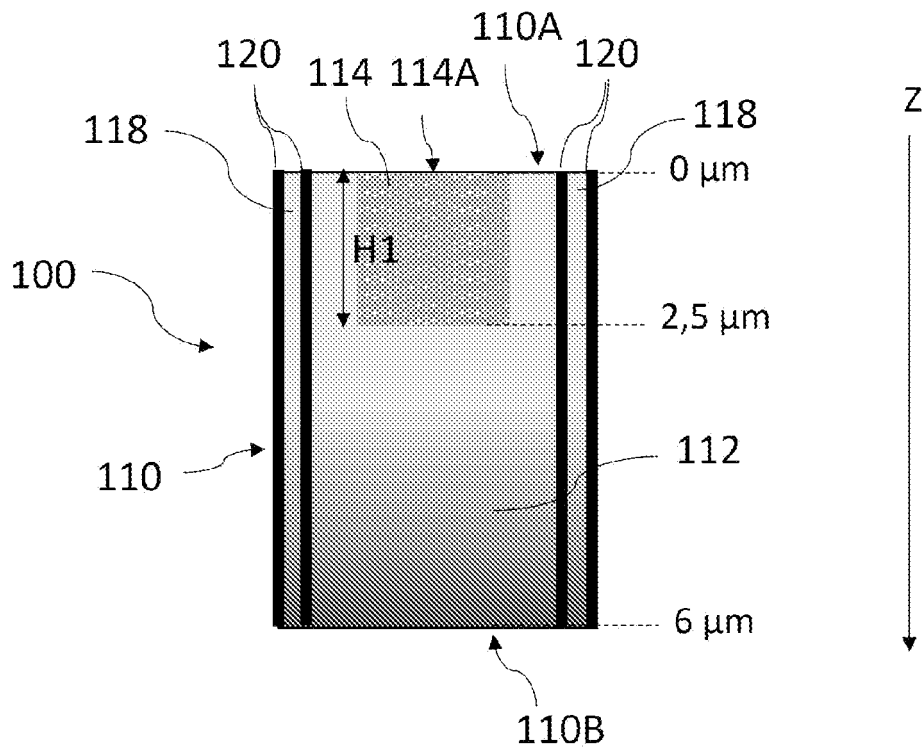


FIG. 1

[Fig. 2]

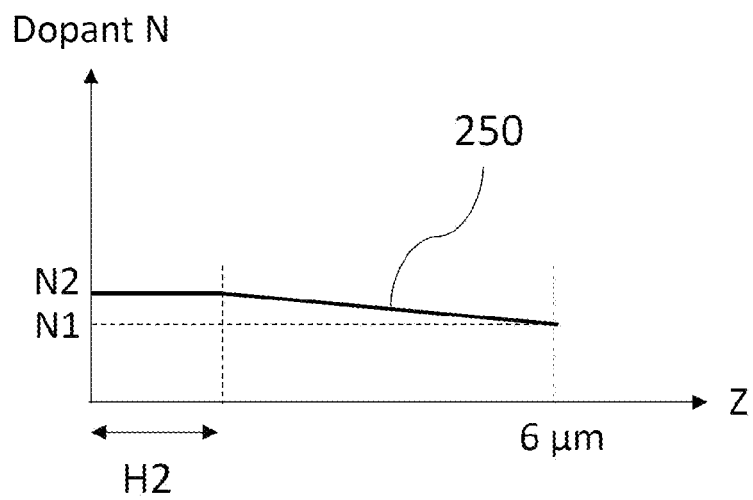
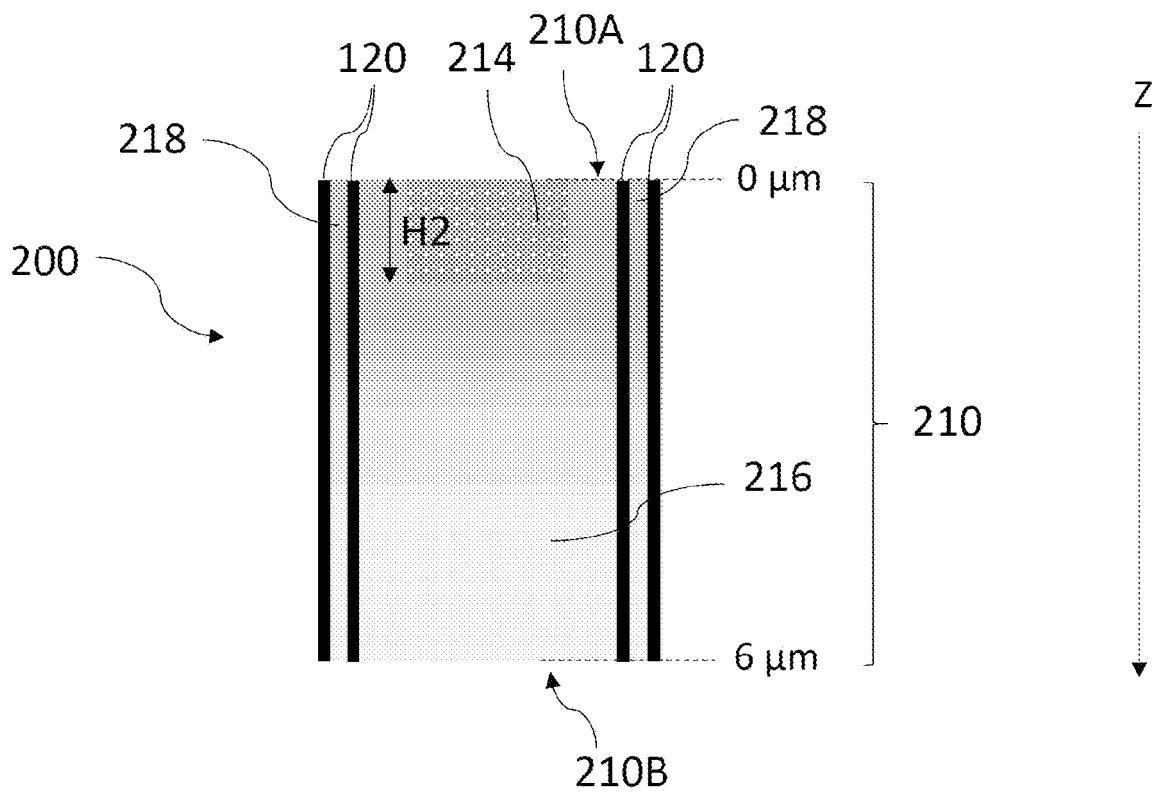


FIG. 2

[Fig. 3]

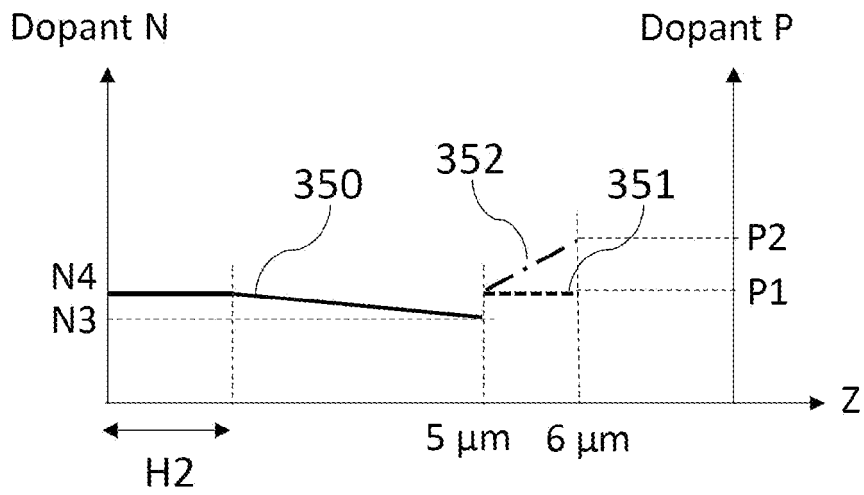
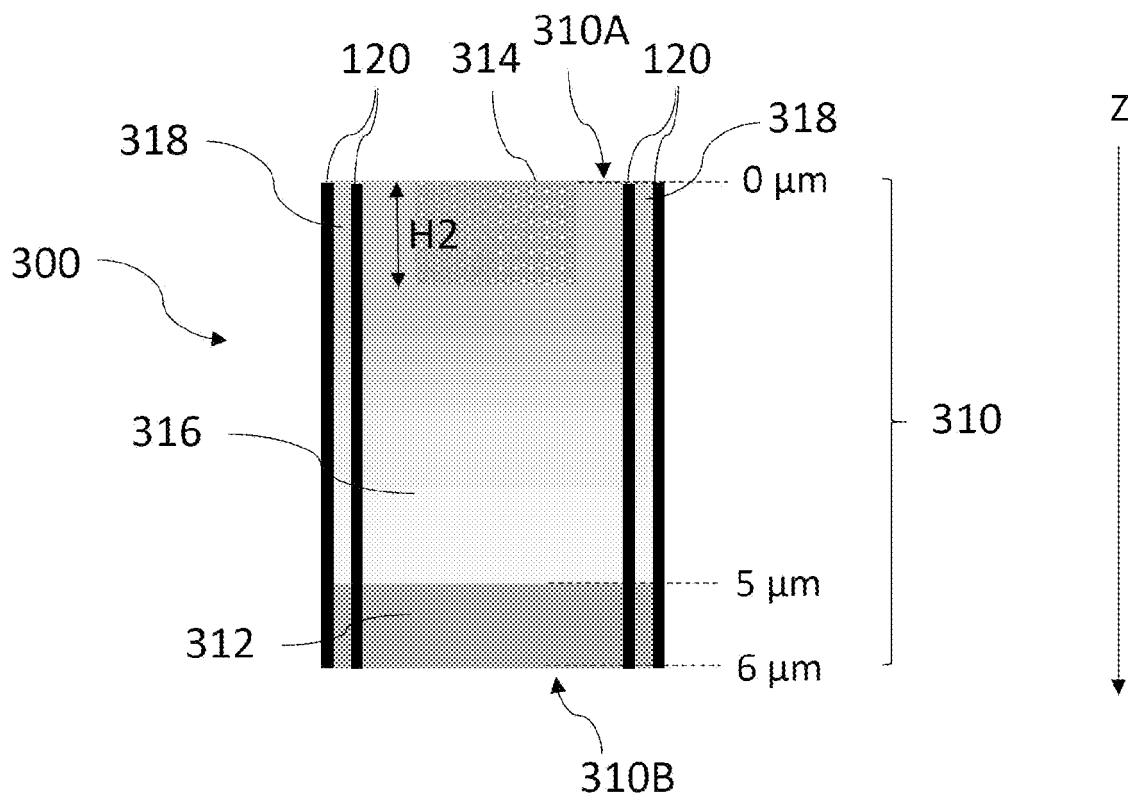


FIG. 3

[Fig. 4]

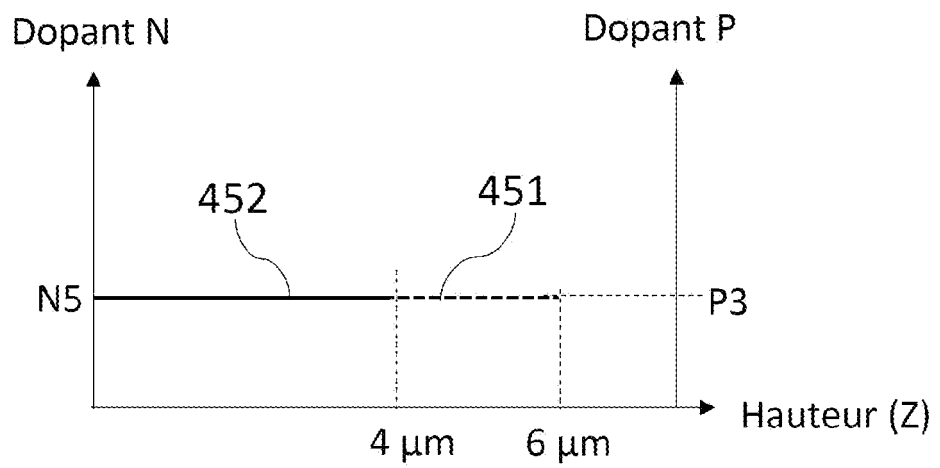
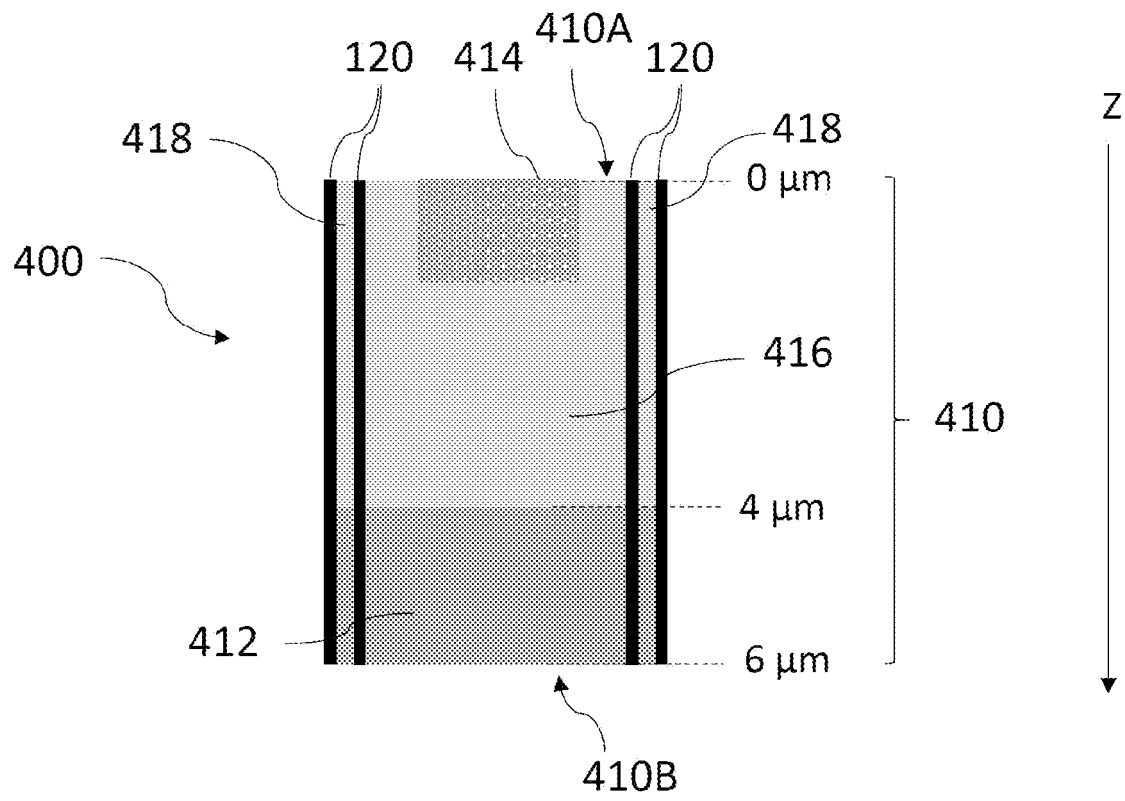


FIG. 4

[Fig. 5]

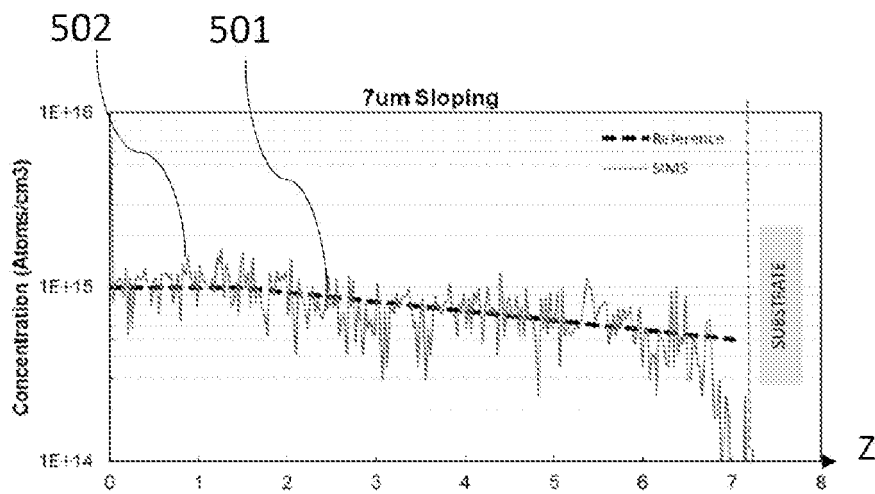


FIG. 5

[Fig. 6]

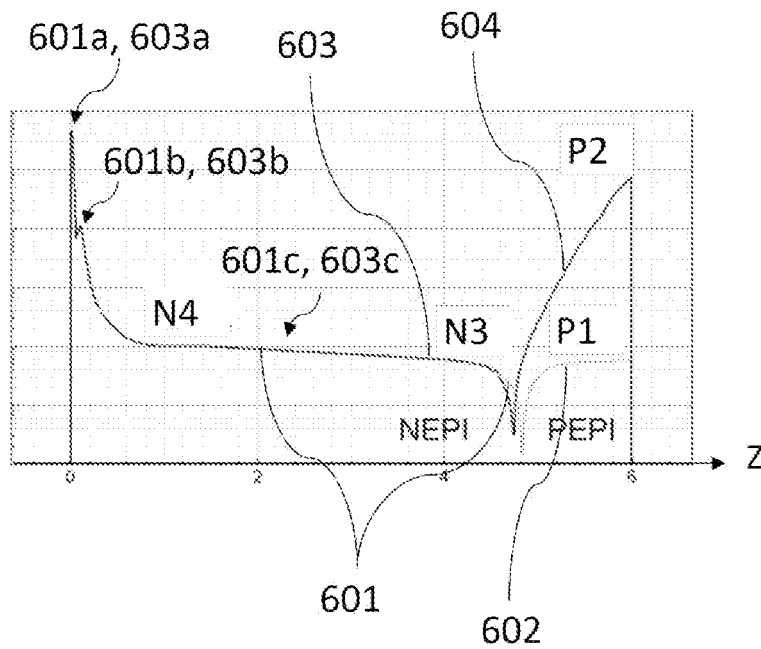


FIG. 6

[Fig. 7A]

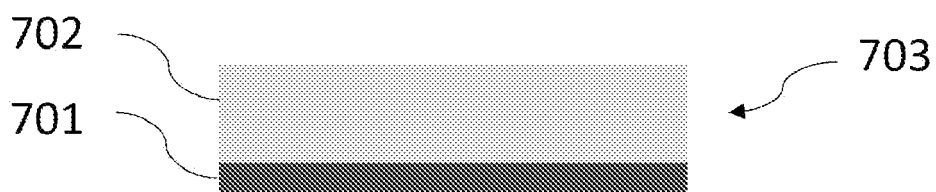


FIG. 7A

[Fig. 7B]

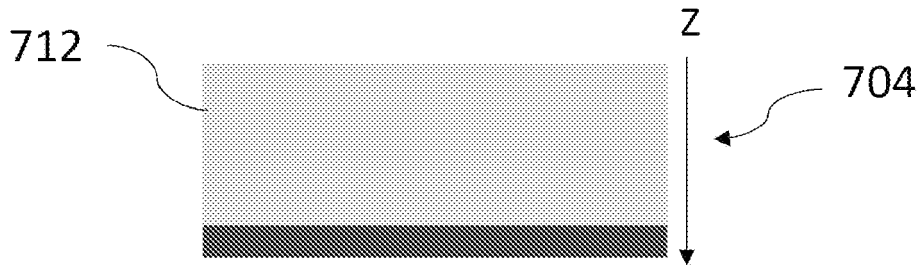


FIG. 7B

[Fig. 7C]

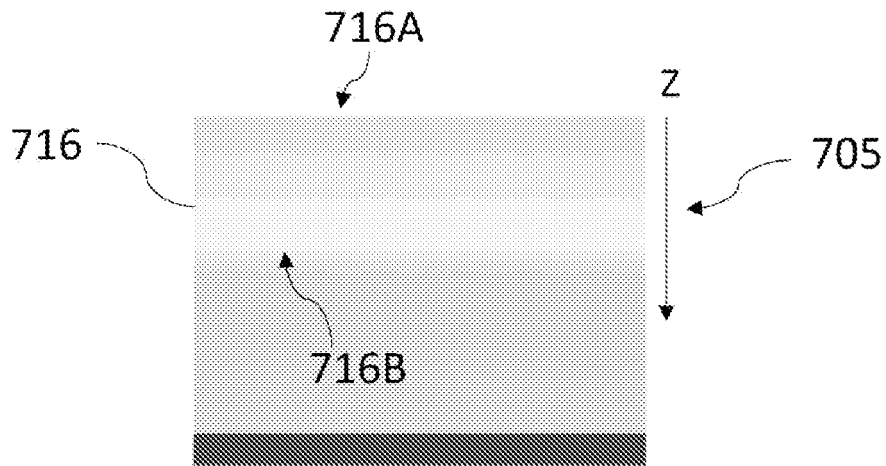


FIG. 7C

[Fig. 7D]

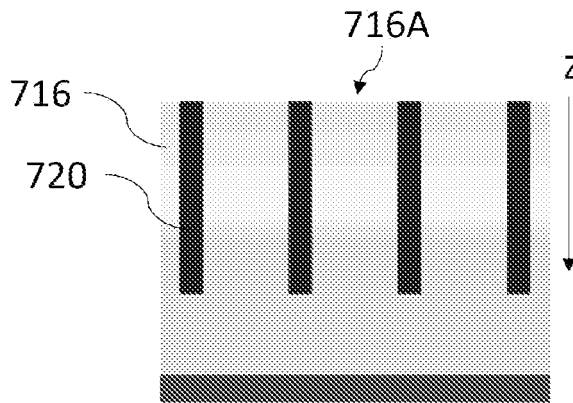


FIG. 7D

[Fig. 7E]

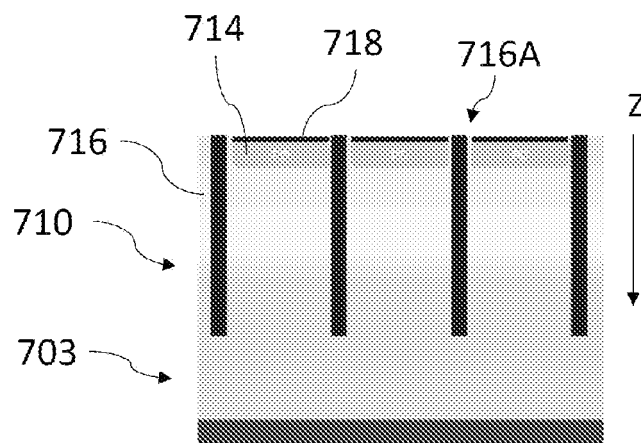
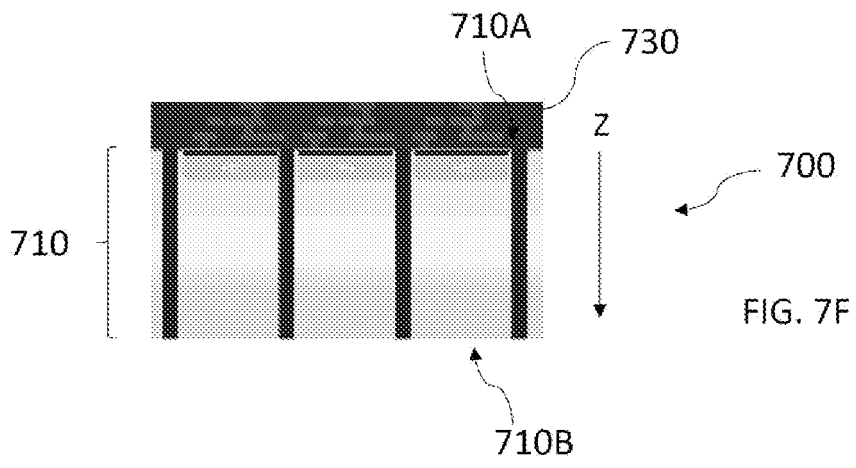


FIG. 7E

[Fig. 7F]



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

**FA 904589**  
**FR 2202997**

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			
<b>X</b>	<p><b>US 2013/193546 A1 (WEBSTER ERIC ALEXANDER GARNER [GB] ET AL)</b>  <b>1 août 2013 (2013-08-01)</b>                      * abrégé; figures 17,18 *                      * alinéa [0114] *                      * alinéa [0142] - alinéa [0146] *                      * alinéa [0127] *                      * alinéa [0067] *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	<b>1-19</b>	<b>H01L31/102</b>	
<b>A</b>	<p><b>US 2018/167606 A1 (CAZAUX YVON [FR] ET AL)</b>  <b>14 juin 2018 (2018-06-14)</b>                      * abrégé; figure 6 *                      * alinéa [0058] - alinéa [0061] *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	<b>1,14</b>		
<b>A</b>	<p><b>WO 2006/086281 A2 (CANESTA INC; BAMJI CYRUS [US]; YALCIN HAKAN [US])</b>  <b>17 août 2006 (2006-08-17)</b>                      * abrégé; figures 5A,5B *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	<b>1,14</b>		
<b>A</b>	<p><b>US 2013/155283 A1 (ROY FRANCOIS [FR] ET AL)</b>  <b>20 juin 2013 (2013-06-20)</b>                      * abrégé; figures 1-7 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	<b>1,14</b>		<b>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</b>
<b>A</b>	<p><b>US 2011/096208 A1 (ROY FRANCOIS [FR] ET AL)</b>  <b>28 avril 2011 (2011-04-28)</b>                      * abrégé; figure 5B *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	<b>1,14</b>		<b>H01L G01S</b>
Date d'achèvement de la recherche		Examineur		
<b>20 octobre 2022</b>		<b>Favre, Pierre</b>		
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>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</p> <p>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                      .....                      &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>				

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2202997 FA 904589**

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 **20-10-2022**  
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
<b>US 2013193546 A1</b>	<b>01-08-2013</b>	<b>CN 103299437 A</b>	<b>11-09-2013</b>
		<b>EP 2614531 A2</b>	<b>17-07-2013</b>
		<b>US 2013193546 A1</b>	<b>01-08-2013</b>
		<b>WO 2012032353 A2</b>	<b>15-03-2012</b>
-----			
<b>US 2018167606 A1</b>	<b>14-06-2018</b>	<b>FR 3060250 A1</b>	<b>15-06-2018</b>
		<b>US 2018167606 A1</b>	<b>14-06-2018</b>
-----			
<b>WO 2006086281 A2</b>	<b>17-08-2006</b>	<b>EP 1846948 A2</b>	<b>24-10-2007</b>
		<b>WO 2006086281 A2</b>	<b>17-08-2006</b>
-----			
<b>US 2013155283 A1</b>	<b>20-06-2013</b>	<b>FR 2984607 A1</b>	<b>21-06-2013</b>
		<b>US 2013155283 A1</b>	<b>20-06-2013</b>
-----			
<b>US 2011096208 A1</b>	<b>28-04-2011</b>	<b>EP 2315251 A1</b>	<b>27-04-2011</b>
		<b>US 2011096208 A1</b>	<b>28-04-2011</b>
-----			