

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale

WO 2014/136082 A1

(43) Date de la publication internationale
12 septembre 2014 (12.09.2014)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
H01L 31/0352 (2006.01) H01L 31/18 (2006.01)
H01L 21/761 (2006.01) H01L 27/142 (2014.01)
H01L 31/068 (2012.01) H01L 31/0687 (2012.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/IB2014/059497
- (22) Date de dépôt international :
6 mars 2014 (06.03.2014)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1352096 8 mars 2013 (08.03.2013) FR
- (71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 rue Leblanc, Bâtiment Le Ponant D, F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : GARANDET, Jean-Paul; Les Acacias, 139 impasse des Prés, F-73370 Le Bourget Du Lac (FR). DU-BOIS, Sébastien; 40 rue de Bargy, F-74950 Scionzier (FR). ENJALBERT, Nicolas; 30 route de Castres, F-81100 Burlats (FR). VEIRMAN, Jordi; 314 rue des Génévriers, F-74330 Poisy (FR). VESCHETTI, Yannick; 149 chemin de Savagneau, F-38480 St Martin De Vaulserre (FR).
- (74) Mandataire : LE COUPANEC, Pascale; Nony, 3 rue de Penthièvre, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Publiée :
— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : MONOLITHIC SILICON WAFER HAVING ALTERNATING N-DOPED AREAS AND P-DOPED AREAS

(54) Titre : PLAQUETTE DE SILICIUM MONOLITHIQUE PRESENTANT UNE ALTERNANCE DE ZONES DOPEES N ET DE ZONES DOPEES P

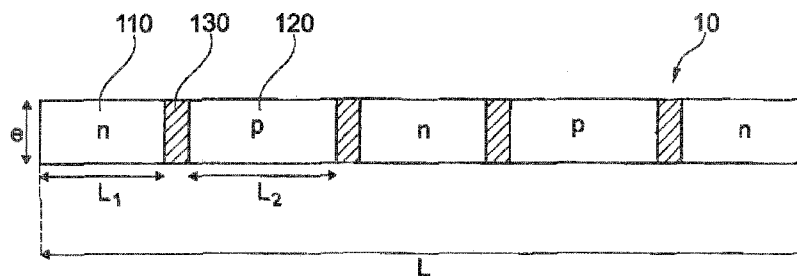


Fig. 1

(57) Abstract : The present invention concerns a monolithic silicon wafer (10) having, in at least a vertical cutting plane, alternating n-doped areas (110) and p-doped areas (120), each of the areas extending over the entire thickness (e) of the wafer, characterised in that: - said n-doped areas (110) and p-doped areas (120) each have, in the cutting plane, a width (L₁, L₂) of at least 1 mm; - the n-doped areas (110) have a concentration of oxygen thermal donors different from that of the p-doped areas (120); and - said n-doped areas (110) and said p-doped areas are separated from each other by electrical insulation areas (130). It also concerns methods of producing such a wafer.

(57) Abrégé : La présente invention concerne une plaquette (10) de silicium monolithique, présentant, dans au moins un plan vertical de coupe, une alternance de zones (110) dopées n et de zones (120) dopées p, chacune des zones s'étendant sur toute l'épaisseur (e) de la plaquette, caractérisée en ce que : - lesdites zones dopées n (110) et dopées p (120) présentent chacune, dans le plan

[Suite sur la page suivante]



WO 2014/136082 A1

- *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h)*

de coupe, une largeur (L_1, L_2) d'au moins 1 mm; - les zones dopées n (110) présentent une concentration en donneurs thermiques à base d'oxygène distincte de celle des zones dopées p (120); et - lesdites zones dopées n (110) et lesdites zones dopées p (120) sont séparées entre elles par des zones d'isolation électrique (130). Elle concerne encore des procédés de fabrication d'une telle plaque.

PLAQUETTE DE SILICIUM MONOLITHIQUE PRESENTANT UNE ALTERNANCE
DE ZONES DOPEES N ET DE ZONES DOPEES P

La présente invention se rapporte à une nouvelle plaquette de silicium
5 monolithique présentant, dans un plan vertical de coupe, une alternance de zones dopées n
et de zones dopées p, et à différentes variantes de procédé pour sa préparation.

Une telle plaquette est particulièrement avantageuse dans le cadre de
l'élaboration de cellules et modules photovoltaïques.

Actuellement, les modules photovoltaïques (PV) sont majoritairement
10 fabriqués à partir de l'assemblage de cellules en silicium mono- ou multi-cristallin, ces
cellules étant généralement réalisées à partir de plaquettes, également appelées « wafers »,
de conductivité électrique p.

Dans des modules PV de taille raisonnable, de l'ordre du m², le standard de
taille pour les plaquettes (156 x 156 mm) fait que les tensions de circuit ouvert (V_{oc} en
15 terminologie anglo-saxonne) des modules PV sont limitées à quelques dizaines de Volts.

Différentes voies ont été explorées pour tenter d'augmenter la tension V_{oc} des
modules PV.

Une première option pourrait consister à utiliser des matériaux autres que le
silicium (Si) cristallin, notamment des semi-conducteurs présentant des amplitudes de
20 bande interdite (ou « band gap » en langue anglaise) supérieures au 1,1 eV (électron-volt)
du silicium, comme par exemple un matériau de type Si amorphe sur Si cristallin, issu de la
technologie dite à hétérojonction, ou encore des matériaux du type CdTe (tellurure de
cadmium). Malheureusement, l'amélioration en termes de tensions de circuit ouvert est
limitée, car l'utilisation de semi-conducteurs à bande interdite trop élevée (> 2 eV) conduit
25 à une baisse significative de la quantité de photons absorbée et à une perte en rendement de
conversion énergétique.

Une autre possibilité serait de réduire la taille des cellules par rapport au
standard actuel de 156 x 156 mm, ce qui permettrait, par mise en série d'un plus grand
nombre de cellules formant le module, d'accroître la valeur de la tension V_{oc} . Cependant
30 cette solution rendrait plus délicate les opérations de manutention pour l'élaboration des
modules. Par ailleurs, la nécessité de garder un espace entre cellules formant le module PV
pour la connectique conduit à une perte de surface utile (i.e. permettant la photogénération

de porteurs électriques). Cette perte de surface est plus importante avec la mise en œuvre d'un plus grand nombre de cellules de taille réduite. Enfin, sauf à utiliser une technologie de cellule à contacts arrière (RCC, Rear Contact Cell en terminologie anglo saxonne), cette solution pose des problèmes délicats de métallisation et de connectique.

5 Pour tenter de réduire cette perte de surface utile, il pourrait être envisagé de réaliser une plaquette monolithique de taille standard 156 x 156 mm, et de graver *a posteriori* des tranchées, par exemple par ablation laser, ce qui aurait pour effet de créer effectivement une pluralité de cellules de plus petite taille. Cependant, le traitement de gravure est susceptible de conduire à une fragilisation de la plaquette, et donc à des
10 problèmes de tenue mécanique. Par ailleurs, le problème de l'isolation entre les sous-cellules est complexe, surtout si une résistance d'isolement importante est nécessaire pour les applications visées. Enfin, comme évoqué ci-dessus, sauf à utiliser une technologie RCC, cette solution pose des problèmes délicats de métallisation et de connectique.

Plus récemment, Pozner *et al.* [1] ont envisagé par modélisation la mise en
15 série de cellules à plans de jonction p/n verticaux, à la différence de la configuration des wafers classiques où le plan de jonction est horizontal. L'intérêt de cette approche est de pouvoir envisager un traitement de type collectif, sur substrat monolithique, pour la réalisation des cellules. Toutefois, de nombreuses questions techniques restent ouvertes quant à la réalisation en pratique d'une telle structure, dont le coût risque, par ailleurs,
20 d'être très élevé.

Gatos *et al.* [2] proposent de tirer parti de l'incorporation hétérogène d'oxygène au cours de la croissance d'un cristal de silicium par solidification dirigée selon le procédé Czochralski. L'origine de ces fluctuations de concentration d'oxygène est mal connue, mais ce principe est utilisé par Gatos *et al.* pour obtenir des structures de
25 conductivité alternée n/p par recuit thermique.

Il est en effet connu de l'état de l'art [3] que, dans des plaquettes de silicium contenant de l'oxygène, des recuits thermiques à des températures de 400-500 °C, permettent la formation de donneurs thermiques (DT), petits agglomérats d'oxygène (typiquement formés de l'association de 3 à 20 atomes d'oxygène) qui se comportent en
30 donneurs d'électrons dans le silicium. Ainsi, lorsque ces donneurs thermiques sont générés dans le silicium de type p, ils peuvent entraîner une compensation du matériau et son changement de conductivité. La libération d'électrons étant fonction de la concentration

locale en oxygène, un recuit, par exemple à une température de 450 °C pendant 50 heures d'une plaquette découpée dans un lingot Czochralski parallèlement à la direction de solidification, permet ainsi d'obtenir des structures p/n.

Malheureusement, les fluctuations de concentration n'étant pas maîtrisées, la
5 taille des zones n et p, typiquement de l'ordre de la centaine de microns [2], ne peut être contrôlée. Il n'est donc pas possible de définir la tension de sortie d'une telle structure, ce qui représente un obstacle majeur pour l'intégration de ces structures dans un système solaire complet. Par ailleurs, dans une configuration où les sous-cellules sont connectées en série pour obtenir des tensions élevées, il est alors impossible d'équilibrer les courants, ce
10 qui est une limitation très forte vis-à-vis du rendement de conversion énergétique de l'ensemble.

En outre, la variation de taille entre les différentes sous-cellules sur la surface d'une plaquette ([2], figure 1) induit une complexité, d'un point de vue technologique, qui représente un inconvénient majeur pour la réalisation des cellules photovoltaïques. Enfin, il
15 n'est pas possible, dans la structure obtenue par Gatos *et al.* [2], de spécifier une résistance d'isolement entre les sous-cellules. Une telle limitation est préjudiciable au rendement de conversion énergétique de la cellule photovoltaïque.

Par conséquent, il demeure un besoin de disposer de plaquettes de silicium,
20 appropriées pour la réalisation de modules PV à haute tension de circuit ouvert et minimisant les surfaces inactives (i.e. ne permettant pas la collecte des porteurs photogénérés).

La présente invention vise précisément à proposer une nouvelle plaquette de silicium monolithique permettant de pallier les inconvénients précités, ainsi que des
25 procédés pour accéder à une telle plaquette.

Plus précisément, la présente invention concerne, selon un premier de ses aspects, une plaquette de silicium monolithique, présentant, dans au moins un plan vertical de coupe, une alternance de zones dopées n et de zones dopées p, chacune des zones s'étendant sur toute l'épaisseur de la plaquette, caractérisée en ce que :

30 - lesdites zones dopées n et dopées p présentent chacune, dans le plan de coupe, une largeur (L_1 , L_2) d'au moins 1 mm ;

- les zones dopées n présentent une concentration en donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel (DT) distincte de celle des zones dopées p ; et

- lesdites zones dopées n et lesdites zones dopées p sont séparées entre elles par des zones d'isolation électrique.

5 Dans la suite du texte, et sauf indication contraire, la plaquette est caractérisée lorsqu'elle observée dans sa position horizontale. Ainsi, en particulier, la plaquette est définie comme présentant une alternance de zones dopées n et de zones dopées p s'étendant sur toute l'épaisseur de la plaquette, dans un plan vertical de coupe de la plaquette positionnée horizontalement.

10 On parlera indifféremment dans la suite du texte de « plaquette » ou de « wafer ».

On désignera par la suite par « donneurs thermiques », ou plus simplement sous l'abréviation « DT », les donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel.

15 Par « zone d'isolation électrique », on entend une zone présentant une forte résistivité électrique, en particulier supérieure ou égale à 2 k Ω .cm et avantageusement supérieure ou égale à 10 k Ω .cm. De manière idéale, la zone d'isolation électrique peut être une zone dite intrinsèque, à savoir une zone de la plaquette dans laquelle les concentrations de porteurs de charge de type électrons et de porteurs de charge de type trous sont similaires.

20 Selon un autre de ses aspects, la présente invention propose des procédés permettant d'accéder, de manière aisée, à une telle plaquette, à partir d'une plaquette en silicium dopé p.

25 Selon un premier mode de réalisation particulier, la présente invention concerne ainsi un procédé de fabrication d'une plaquette telle que définie précédemment, comprenant au moins les étapes consistant en :

(i) disposer d'une plaquette en silicium dopé p comprenant une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) comprise entre 10^{14} et 2.10^{16} cm⁻³ et une concentration en oxygène interstitiel [O_i] comprise entre 10^{17} et 2.10^{18} cm⁻³ ;

30 (ii) soumettre ladite plaquette de l'étape (i) à un traitement thermique global, propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel et à la conversion de l'ensemble de la plaquette en type n ;

(iii) soumettre des zones de la plaquette obtenue à l'issue de l'étape (ii), dédiées à former les zones dopées p, à un traitement thermique localisé propice à l'annihilation des donneurs thermiques et à la reconversion desdites zones de type n en type p ; et

(iv) transformer, par traitement thermique, la portion de chaque zone de type n, contigüe à une zone de type p, en une zone d'isolation électrique, pour obtenir la plaquette (10) attendue.

Selon un seconde mode de réalisation particulier, la présente invention concerne un procédé de fabrication d'une plaquette telle que définie précédemment, comprenant au moins les étapes consistant en :

10 (a) disposer d'une plaquette en silicium dopé p comprenant une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) comprise entre 10^{14} et 2.10^{16} cm^{-3} et une concentration en oxygène interstitiel $[O_i]$ comprise entre 10^{17} et 2.10^{18} cm^{-3} ;

(b) doper en hydrogène les zones, dites (11) et (13), de la plaquette dédiées à former les zones dopées n et les zones d'isolation électrique ; et

15 (c) soumettre ladite plaquette de l'étape (b) à un traitement thermique global propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel au niveau des zones dopées en hydrogène, et à la conversion desdites zones (11) de type p en type n et desdites zones (13) en zones d'isolation électrique, pour obtenir la plaquette attendue.

De manière avantageuse, ces procédés permettent, *via* le contrôle des concentrations locales en donneurs thermiques, de maîtriser, avec précision, la taille des zones n et p formées, ainsi que la conductivité et la taille des zones d'isolation électrique.

Egalement, il est possible selon l'invention, comme développé dans la suite du texte, de réaliser des structures bidimensionnelles, par exemple avec une disposition des zones n et p alternées en damier, ce qui permet avantageusement d'accroître encore le nombre de sous-cellules en série formées sur la plaquette.

Selon encore un autre de ses aspects, la présente invention concerne un dispositif photovoltaïque, en particulier une cellule photovoltaïque, comportant une plaquette de silicium telle que définie précédemment.

Les plaquettes de silicium selon l'invention, divisées en une pluralité de sous-cellules de tailles contrôlées, permettent avantageusement de produire des modules PV présentant une tension de circuit ouvert accrue, tout en conservant une taille raisonnable standard de l'ordre du m^2 .

D'autres caractéristiques, avantages et modes d'application des plaquettes selon l'invention et des procédés pour sa préparation, ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée qui va suivre, des exemples de réalisation de l'invention et à l'examen des dessins annexés, sur lesquels :

- 5 - la figure 1 représente, de manière schématique, dans un plan vertical de coupe, la structure d'une plaquette de silicium selon l'invention ;
- la figure 2 représente, de manière schématique, les différentes étapes du procédé de fabrication d'une plaquette selon l'invention, selon un premier mode de réalisation ;
- 10 - la figure 3 représente, de manière schématique, les différentes étapes du procédé de fabrication d'une plaquette selon l'invention, selon un second mode de réalisation ;
- la figure 4 représente, en vue de dessus, pour le procédé de l'exemple 1, les zones (12) irradiées au laser de la plaquette lors de l'étape (iii) pour la formation des zones dopées p (figure 4a) et lors de l'étape (iv) pour la formation des zones d'isolation électrique (figure 4b) ;
- 15 - la figure 5 représente, en vue de dessus, pour le procédé de l'exemple 2, le masquage en étape (b) des zones (12) de la plaquette lors de la première étape d'implantation ionique (figure 5a) et le masquage des zones (12) et (13) lors de la seconde
- 20 étape d'implantation ionique (figure 5b) ; et la répartition des zones formées à l'issue de l'étape (c) (figure 5c).

Il convient de noter que, pour des raisons de clarté, les différents éléments sur les figures sont représentés en échelle libre, les dimensions réelles des différentes parties n'étant pas respectées.

25

Dans la suite du texte, les expressions « compris entre ... et ... », « allant de ... à ... » et « variant de ... à ... » sont équivalentes et entendent signifier que les bornes sont incluses, sauf mention contraire.

Sauf indication contraire, l'expression « comportant/comprenant un(e) » doit

30 être comprise comme « comportant/comprenant au moins un(e) ».

PLAQUETTE

Il est fait référence, dans la description qui suit, à la figure 1 annexée.

Une plaquette selon l'invention peut présenter une épaisseur (e) allant de 100 à 500 μm , en particulier de 150 à 300 μm .

5 Elle peut présenter une longueur totale (L), allant de 10 à 30 cm, en particulier de 15 à 20 cm.

Selon un mode de réalisation particulier, une plaquette selon l'invention comporte une concentration en oxygène interstitiel comprise entre 10^{17} et $2 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} , en particulier comprise entre $5 \cdot 10^{17}$ et $1,5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} . Cette concentration prend en
10 compte la teneur en oxygène interstitiel, qui ne sont pas sous forme d'agglomérats (donneurs thermiques) dans la plaquette de silicium.

La concentration en oxygène interstitiel peut être par exemple obtenue par analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (en langue anglaise « Fourier Transformed InfraRed Spectroscopy » (FTIR)).

15 Comme décrit précédemment, une plaquette de silicium selon l'invention présente une alternance de zones dopées n (110) et de zones dopées p (120), séparées entre elles par des zones d'isolation électrique (130).

En particulier, les zones dopées n (110) de la plaquette peuvent présenter, indépendamment les unes des autres, une densité de porteurs de charge de type électrons
20 allant de 10^{14} à $2 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} , en particulier de $5 \cdot 10^{14}$ à $5 \cdot 10^{15}$ cm^{-3} .

La concentration en porteurs de charge de type électrons peut être par exemple déterminée par mesure de l'effet Hall (qui permet de déterminer le type de dopage).

Elles peuvent présenter, indépendamment les unes des autres, une largeur (L_1) dans le plan de coupe allant de 1 mm à 10 cm, en particulier de 5 mm à 5 cm.

25 Les zones dopées p (120) de la plaquette peuvent présenter, indépendamment les unes des autres, une densité en porteurs de charge de type trous allant de 10^{14} à $2 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} , en particulier de $5 \cdot 10^{14}$ à $5 \cdot 10^{15}$ cm^{-3} .

La concentration en porteurs de charge de type trous peut être par exemple déduite d'une mesure de la résistivité, par exemple par la méthode de mesure d'effet Hall.

30 Elles peuvent présenter, indépendamment les unes des autres, une largeur (L_2) dans le plan de coupe allant de 1 mm à 10 cm, en particulier de 5 mm à 5 cm.

Par l'expression « indépendamment les unes des autres », on entend signifier que la largeur peut différer d'une zone dopée n à une autre zone dopée n, ou d'une zone dopée p à une autre zone dopée p.

De manière avantageuse, ces largeurs (L_1 , L_2) peuvent être ajustées selon les connaissances de l'homme du métier. En particulier, les matériaux de type n étant généralement moins sensibles aux impuretés métalliques que les matériaux de type p, les courants photogénérés sont généralement plus élevés dans des zones dopées n que dans des zones dopées p. Ainsi, les largeurs (L_1 , L_2) des zones dopées p et dopées n peuvent être adaptées lors de la préparation de la plaquette, en vue notamment d'égaliser au mieux ces courants dans la plaquette de silicium finale.

Les zones dopées n (110) de la plaquette selon l'invention présentent une concentration en donneurs thermiques à base d'oxygène (DT) distincte de celle des zones dopées p (120).

Comme il ressort des procédés de réalisation de la plaquette décrits ci-dessous, le contrôle de la concentration locale en DT permet d'accéder à la conductivité électrique alternée n et p de la plaquette.

Il est à noter qu'un recuit global d'une plaquette conforme à l'invention, par exemple à une température supérieure ou égale à 600 °C, notamment comprise entre 600 et 700 °C, permet la dissolution (encore appelée « annihilation ») de l'ensemble des DT et conduit à retrouver une plaquette de conductivité homogène. Cette caractéristique peut être avantageusement utilisée pour distinguer une plaquette selon l'invention, de plaquettes qui ne seraient pas obtenues par un procédé conforme à l'invention.

Les zones d'isolation électrique (130), séparant une zone dopée n (110) et une zone dopée p (120), présentent de préférence une résistivité supérieure ou égale à 2 k Ω .cm, en particulier supérieure ou égale à 10 k Ω .cm.

La résistivité peut être mesurée par toute méthode conventionnelle, comme par exemple, par la méthode de mesure dite des 4 pointes, ou encore par mesure de l'effet des courants de Foucault induit par un champ magnétique alternatif.

Selon un mode de réalisation particulier, chacune des zones d'isolation électrique (130) présente avantageusement une largeur (L_3) dans le plan de coupe allant de 50 μ m à 5 mm, en particulier de 200 μ m à 1 mm.

En effet, une zone d'isolation électrique trop longue dans la plaquette de silicium finale est susceptible de conduire à une perte de manière active et donc une baisse du rendement énergétique au niveau du module qui sera formé à partir de ces plaquettes. En revanche, une zone d'isolation électrique trop courte peut s'avérer insuffisante pour assurer
5 une bonne isolation entre les sous-cellules (zones dopées n et zones dopées p), ce qui peut également conduire à une baisse de rendement au niveau du module résultant.

Selon un mode de réalisation particulier, les zones n et p peuvent être agencées de manière à former un motif bidimensionnel.

Par exemple, dans une vue de dessus de la plaquette, la disposition des zones n et p alternées peut former un motif de type damier. Le côté d'un carré (zones n et p) du
10 damier peut être compris entre 1 mm et 10 cm, de préférence entre 5 mm et 5 cm. Dans le cadre de ce mode de réalisation particulier, les zones d'isolation électrique (130) forment alors le pourtour de chacune des zones n et des zones p. Cette configuration est par exemple mise en œuvre dans les exemples qui suivent.

Bien entendu, l'invention n'est nullement limitée à une telle disposition ; différentes configurations, autres qu'un motif damier, peuvent être envisagées dans le cadre de la présente invention (par exemple motifs rectangulaires, polygonaux, etc.).
15

FABRICATION DE LA PLAQUETTE

Comme évoqué précédemment, une plaquette (10) selon l'invention peut être élaborée, suivant différentes variantes de réalisation, à partir d'une plaquette (1) en silicium dopée p, comprenant une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) comprise entre 10^{14} et $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une concentration en oxygène interstitiel $[O_i]$ comprise entre 10^{17} et $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
20

Selon un mode de réalisation particulier, la plaquette (1) en silicium dopé p présente une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) allant de $5 \cdot 10^{14}$ à 10^{16} , en particulier de $5 \cdot 10^{14}$ à $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
25

Selon un mode de réalisation particulier, la plaquette (1) en silicium dopé p présente une concentration en oxygène interstitiel $[O_i]$ allant de $5 \cdot 10^{17}$ à $1,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
30

De manière avantageuse, la variation relative de la concentration en oxygène interstitiel dans la plaquette en silicium (1) est inférieure à 40 %, en particulier inférieure à 20 % et de préférence inférieure à 10 %.

Une telle plaquette (1) en silicium dopé p peut être par exemple obtenue par découpe d'un lingot de silicium formé, selon des techniques connues de l'homme du métier, par solidification dirigée d'un bain fondu, en particulier par la technique de refroidissement sous gradient (encore connue sous l'appellation « gradient freeze » en
5 langue anglaise) ou par épitaxie en voie liquide ou gazeuse.

Les procédés selon l'invention, décrits ci-dessous, mettent en œuvre une ou plusieurs étapes d'activation ou d'annihilation des DT.

On entend par « activation », la formation de ces donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel. Ils se forment généralement lors d'un recuit à une température de
10 300-500 °C. Un tel recuit permet l'association d'atomes d'oxygène pour former une espèce à la stœchiométrie plus complexe qui a un comportement donneur d'électrons dans le silicium.

Les donneurs thermiques ainsi formés sont stables à température ambiante, mais un recuit à une température supérieure à 600 °C permet leur dissociation, ce qui
15 annule les effets de l'activation thermique précédemment réalisée. On parle alors d'« annihilation » ou « dissolution » des DTs.

Les traitements d'activation/annihilation mis en œuvre selon l'invention peuvent être opérés sous air ou sous atmosphère inerte.

20 **1^{er} mode de réalisation**

Il est fait référence dans la description qui suit de ce premier mode de réalisation, à la figure 2 annexée.

Selon cette première variante, une plaquette (10) selon l'invention peut être obtenue *via* un procédé comprenant au moins les étapes suivantes :

25 (i) disposer d'une plaquette (1) en silicium dopé p telle que décrite précédemment ;

(ii) soumettre ladite plaquette de l'étape (i) à un traitement thermique global, propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel et à la conversion de l'ensemble de la plaquette en type n ;

30 (iii) soumettre des zones (12) de la plaquette (1') obtenue à l'issue de l'étape (ii), dédiées à former les zones dopées p, à un traitement thermique localisé propice à

l'annihilation des donneurs thermiques et à la reconversion desdites zones (12) de type n en type p ; et

(iv) transformer, par traitement thermique, la portion (13) de chaque zone de type n, contigüe à une zone de type p, en une zone d'isolation électrique (130), pour obtenir
5 la plaquette (10) attendue.

Le traitement thermique global en étape (ii) peut être par exemple réalisé par recuit thermique de la totalité de la plaquette, par exemple dans un four.

Il appartient à l'homme du métier d'ajuster les conditions de recuit pour la
10 conversion de l'ensemble de la plaquette (1) de départ en type n.

Le recuit peut être par exemple opéré à une température supérieure ou égale à 300 °C et strictement inférieure à 600 °C, en particulier allant de 400 à 500 °C et plus particulièrement d'environ 450 °C.

La durée du recuit thermique peut être supérieure ou égale à 30 minutes, en
15 particulier être comprise entre 1 heure et 20 heures, notamment être d'environ 4 heures.

A l'issue de l'étape (ii), la plaquette (1') obtenue, en silicium dopé n, peut présenter une teneur en porteurs de charge de type électrons (n_0) allant de 10^{14} à $2 \cdot 10^{16}$, en particulier de $5 \cdot 10^{14}$ à $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

20 De même, l'homme du métier est à même d'ajuster les conditions du traitement thermique localisé en étape (iii) propices à l'annihilation des donneurs thermiques dans les zones (12) de la plaquette dédiées à former des zones dopées p et la reconversion de ces zones de type n en type p.

Par « localisé », on entend que le traitement thermique affecte uniquement les
25 zones déterminées (12) de la plaquette, à la différence d'un traitement thermique global qui affecte la totalité de la plaquette. Bien entendu, ces zones (12) de la plaquette soumises au traitement thermique, par exemple à l'irradiation par laser, sont déterminées au regard de l'architecture de la plaquette finale souhaitée.

Les zones (12) de la plaquette dont on souhaite qu'elles deviennent de type p
30 peuvent être portées à une température supérieure ou égale à 600 °C, notamment allant de 600 à 1000 °C, en particulier pendant au moins 10 secondes.

Il appartient à l'homme du métier de mettre en œuvre des moyens connus pour canaliser les flux de chaleur et limiter la propagation latérale de la chaleur pour garder des zones n/p bien délimitées.

5 Le traitement thermique localisé peut être avantageusement opéré par exposition des zones (12) à traiter à un faisceau laser, de préférence un laser à large spot si l'on souhaite irradier des zones de taille importante, par exemple avec une taille de spot de l'ordre du cm.

10 Le laser peut par exemple fonctionner à une longueur d'onde supérieure ou égale à 500 nm, en particulier allant de 500 nm à 1100 nm, ce qui permet une propagation de la chaleur en profondeur dans le matériau.

L'ajustement des conditions du traitement thermique en étape (iv) pour transformer les portions (13) de chacune des zones de type n, contigües à une zone de type p, en zones d'isolation électrique, relève également des compétences de l'homme du métier.

15 L'étape (iv) peut être avantageusement opérée par exposition de chaque portion (13) à un faisceau laser, en particulier de faible taille de spot, par exemple de 20 à 100 μm de largeur.

20 En effet, ce traitement laser additionnel doit être plus localisé que celui mis en œuvre en étape (iii) pour atteindre la largeur (L_3) des zones d'isolation électrique souhaitée, et parvenir ainsi à un bon compromis entre qualité d'isolation et limitation de la taille de la zone compensée, inactive du point de vue photovoltaïque.

25 Les paramètres de durée d'irradiation et de puissance laser peuvent être ajustés pour obtenir l'annihilation d'une fraction des donneurs thermiques dans les zones traitées (13) et leur conversion en des zones d'isolation électrique de forte résistivité.

Selon un mode de réalisation particulier, la plaquette peut être soumise, ultérieurement à l'étape (iv), à un traitement de surface, en particulier par attaque chimique, pour supprimer les éventuelles régions surfaciques écrouies résultant du traitement par laser.

30 Tout type de techniques d'attaque chimique connues peuvent être utilisées. Par exemple, l'attaque chimique peut être effectuée à l'aide d'une solution formée d'un mélange HNO_3 , HF et CH_3COOH , également connu sous le nom de CP133.

2nd mode de réalisation

Il est fait référence dans la description qui suit de ce second mode de réalisation, à la figure 3 annexée.

5 Selon cette seconde variante, une plaquette (10) selon l'invention peut être obtenue *via* un procédé comprenant au moins les étapes suivantes :

(a) disposer d'une plaquette (1) en silicium dopé p telle que décrite précédemment ;

10 (b) doper en hydrogène les zones, dites (11) et (13), de la plaquette dédiées à former les zones dopées n et les zones d'isolation électrique ; et

(c) soumettre ladite plaquette de l'étape (b) à un traitement thermique global propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel au niveau des zones (11) et (13) dopées en hydrogène, et à la conversion desdites zones (11) de type p en type n et desdites zones (13) en zones d'isolation électrique, pour obtenir la plaquette (10)
15 attendue.

Il appartient à l'homme du métier d'ajuster les taux de dopage en hydrogène des zones (11) et (13) en étape (b) pour obtenir la conversion souhaitée des zones en étape (c), sans affecter les zones (12) dépourvues en hydrogène et dédiées à former les zones p
20 de la plaquette finale.

De préférence, le dopage est opéré de manière à permettre une distribution volumique uniforme de l'hydrogène dans les zones concernées et sur toute l'épaisseur de la plaquette.

25 Selon un mode de réalisation particulier, le dopage en étape (b) peut être opéré *via* une première étape (b1) d'implantation d'hydrogène à la surface ou en sub-surface des zones à doper, suivie d'une seconde étape (b2) de diffusion de l'hydrogène sur toute l'épaisseur (e) de la plaquette.

On entend par l'implantation d'hydrogène en « sub-surface », une implantation à des profondeurs allant de quelques nanomètres à quelques dizaines de nanomètres.

30 L'implantation de l'hydrogène peut être effectuée par des techniques classiques, par exemple par traitement plasma, notamment par dépôt chimique en phase

vapeur assisté par plasma (PECVD) ou par plasma d'hydrogène distant induit par micro-ondes (MIRHP).

Elle peut encore être opérée par une technique d'implantation ionique, notamment par une technique de type SmartCut[®].

5 Avantageusement, pour limiter le temps de diffusion de l'hydrogène et les risques d'exo-diffusion, le traitement plasma est réalisé sur les deux faces de la plaquette.

Les zones d'implantation d'hydrogène peuvent être définies à l'aide d'un masque (par exemple, une grille métallique), laissant accessibles uniquement les surfaces des zones à doper, comme illustré dans l'exemple 2 qui suit, par exemple par PECVD.

10 En alternative, on peut déposer l'hydrogène de façon uniforme sur toute la surface de la plaquette, et graver le dépôt, par exemple avec de l'acide fluorhydrique (HF), dans les zones (12) dont on souhaite qu'elles restent de type p.

Le taux de dopage en hydrogène est de préférence accru au niveau des zones (11) destinées à former les zones dopées n.

15 Selon un mode de réalisation particulier, l'implantation d'hydrogène au niveau des zones (11) et (13) peut ainsi comprendre :

- une première étape d'implantation d'hydrogène en surface ou sub-surface des zones (11) dédiées à former les zones dopées n et des zones (13) dédiées à former les zones d'isolation électrique, en masquant les zones (12) dédiées à former les zones dopées p ; et

20 - une seconde étape d'implantation d'hydrogène en surface ou sub-surface des zones (11) dédiées à former les zones dopées n, en masquant les zones (12) dédiées à former les zones dopées p et les zones (13) dédiées à former les zones d'isolation électrique.

25 Il appartient à l'homme du métier d'ajuster les taux surfaciques d'hydrogène implanté, notamment au regard de l'épaisseur de la plaquette (1), de manière à obtenir les taux de dopage volumique souhaités, à l'issue de la diffusion de l'hydrogène sur toute l'épaisseur de la plaquette.

30 Par exemple, le taux de dopage volumique des zones (11) dédiées à former les zones dopées n peut être compris entre 1 et $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, Le taux de dopage volumique des zones (13) dédiées à former les zones d'isolation électrique peut être compris entre 1 et $4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

La diffusion de l'hydrogène dans les zones à doper (étape (b2)) peut être par exemple opérée par exposition desdites zones aux ultrasons, en particulier à l'aide de transducteurs piézoélectriques.

Par exemple, on peut utiliser des transducteurs piézoélectriques travaillant
5 entre 20 kHz et 1 MHz, de préférence entre 50 et 500 kHz, des déformations acoustiques induites entre $5 \cdot 10^{-6}$ et $2 \cdot 10^{-5}$, et des durées de traitement entre 5 et 120 minutes, préférentiellement entre 10 et 60 minutes.

En alternative, la diffusion de l'hydrogène en étape (b2) peut être opérée par recuit thermique de la plaquette, notamment dans un four, en particulier à une température
10 allant de 400 °C à 1000 °C, et pendant une durée allant de 5 secondes à 5 heures.

De fait, le dopage par l'hydrogène va permettre d'accélérer les cinétiques d'activation des donneurs thermiques dans les zones dopées. Un traitement thermique global de la plaquette peut ainsi être opéré dans des conditions propices à l'activation privilégiée des donneurs thermiques au niveau des zones pourvues en hydrogène, et sans
15 affecter les zones qui en sont dépourvues.

Le traitement thermique global en étape (c) peut être par exemple opéré par recuit thermique à une température supérieure ou égale à 300°C et strictement inférieure à 600 °C, en particulier de 400 à 500 °C, et plus particulièrement d'environ 450 °C.

La durée du recuit peut être supérieure ou égale à 30 minutes, en particulier
20 être comprise entre 1 heure et 20 heures, et plus particulièrement d'environ 3 heures.

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAIQUES

L'homme du métier est à même de mettre en œuvre les traitements adéquats classiques, pour l'élaboration d'une cellule photovoltaïque (PV), à partir d'une plaquette
25 (10) selon l'invention, par exemple des traitements appropriés à la formation des jonctions p/n au sein des zones n ou p, ou encore à la formation des contacts assurant la mise en série des sous-cellules.

De préférence, à l'issue du procédé de fabrication de la plaquette (10) selon l'invention, on utilise une technologie basse température de type hétérojonction (silicium
30 amorphe sur silicium cristallin), pour la réalisation de la cellule photovoltaïque.

A titre d'exemples, peuvent être opérées, à l'issue de la fabrication de la plaquette (10) selon l'une ou l'autre des variantes de procédé décrites précédemment, une ou plusieurs étapes suivantes :

- 5 - dépôt d'une première couche de silicium amorphe intrinsèque (typiquement d'une épaisseur de l'ordre de 5 nm) et d'une couche amorphe dopée p⁺ ou n⁺, sur chacune des faces de la plaquette ;
- dépôt de couches d'oxyde transparent conducteur, notamment à base d'ITO, en surface desdites couches de silicium amorphe ;
- 10 - formation d'une ou plusieurs métallisations (également appelées « contacts conducteurs ») en face avant et/ou arrière de la plaquette, notamment par sérigraphie de pâte d'argent, à basse température.

Il est cependant également possible d'élaborer une cellule photovoltaïque en utilisant la technologie classique, à haute température. Dans le cadre de la mise en œuvre d'une telle technologie, il est nécessaire de réaliser les étapes à haute température (par
15 exemple, de diffusion gazeuse), préalablement aux traitements thermiques d'activation/annihilation des donneurs thermiques.

A titre d'exemple, dans le cadre d'une technologie haute température, peuvent être opérées, préalablement aux traitements thermiques d'activation/annihilation des DT mis en œuvre dans l'une ou l'autre des variantes de procédé de préparation de la plaquette,
20 un ou plusieurs étapes suivantes :

- dépôt d'une ou plusieurs couches de passivation et/ou anti-reflet ;
- formation d'une ou plusieurs métallisations en face avant et/ou arrière de la plaquette, notamment par sérigraphie Ag ou Ag/Al. Une étape de recuit des métallisations est réalisée ensuite dans un four à passage à 800 °C environ, pendant quelques secondes.

25 Les cellules PV obtenues selon l'invention peuvent alors être assemblées pour élaborer un module photovoltaïque de taille raisonnable, classiquement de dimension de l'ordre du m², et présentant une tension accrue par rapport aux modules élaborés à partir de cellules classiques.

30 Selon encore un autre de ses aspects, l'invention concerne ainsi un module photovoltaïque formé d'un ensemble de cellules photovoltaïques selon l'invention.

L'invention va maintenant être décrite au moyen des exemples suivants, donnés bien entendu à titre illustratif et non limitatif de l'invention.

EXEMPLES

5 **EXEMPLE 1**

(i) Plaquette de silicium dopé p

On utilise une plaquette de silicium de type p de 220 μm d'épaisseur, obtenue par découpe d'un lingot élaboré par solidification dirigée par la technique de refroidissement sous gradient (« gradient freeze »).

10 Cette plaquette présente une teneur en porteurs de charge de type trous, déterminée *via* la mesure de la résistivité, de $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, et une concentration en oxygène interstitiel, déterminée par analyse FTIR, de $1,5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

(ii) Conversion de la plaquette en type n

15 La plaquette subit un recuit à 450 °C pendant 4 heures afin d'activer des donneurs thermiques. Ce recuit permet la conversion de la plaquette de type p en type n, avec une teneur en électrons, déterminée par mesure de l'effet Hall, de $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

(iii) Traitement thermique localisé

20 La plaquette est ensuite positionnée sous un faisceau laser, mis en forme selon le motif représenté en figure 4a. Les zones non irradiées sont celles que l'on veut conserver de type n, et les zones irradiées (12) sont les zones que l'on souhaite refaire basculer de type p. Les motifs sont de dimension $4 \times 4 \text{ cm}^2$.

25 Le faisceau laser utilise une longueur d'onde dans le rouge/infrarouge, afin d'apporter de la chaleur en profondeur. La puissance laser est réglée dans le but d'élever la température du substrat au moins à 600°C, afin de dissoudre la majorité des donneurs thermiques en présence et reconverter la zone en type p, tout en limitant autant que possible la dégradation de la surface de l'échantillon.

30 Une puissance de 30 W pour un diamètre de faisceau de 100 μm constitue un bon exemple de point de fonctionnement, avec un balayage de zone.

La durée du traitement laser est réglée de manière à permettre la montée en température de toutes les zones irradiées au-delà du seuil de 600 °C pendant au moins 10

secondes, tout en limitant la diffusion latérale de chaleur, afin d'obtenir une mosaïque de types aussi nette que possible.

(iv) Formation des zones d'isolation électrique

5 La plaquette subit une deuxième étape laser, visant à l'élaboration de zones très résistives entre les différentes régions de types opposés. Dans ce but, le faisceau est balayé sur le pourtour (13) de chaque sous élément de type n, sur une largeur de 1 mm (en noir sur la figure 4b).

10 Les paramètres de durée d'irradiation et de puissance laser sont ajustés dans le but d'obtenir des zones localisées où seule une fraction des donneurs thermiques a été dissoute, permettant l'obtention d'une zone d'isolation électrique, et donc très résistive.

15 Enfin, la plaquette subit une attaque chimique type CP133 (HF, HNO₃, CH₃COOH) afin de supprimer les éventuelles zones surfaciques écrouies, résultant des étapes laser.

EXEMPLE 2

(a) Plaquette de silicium dopé p

20 On utilise une plaquette de silicium de type p de 200 µm d'épaisseur, avec une teneur en porteurs trous de 10¹⁵ cm⁻³, et une concentration en oxygène de 7.10¹⁷ cm⁻³.

Les surfaces de la plaquette sont préalablement polies par une attaque chimique type CP133.

(b) Dopage en hydrogène

25 Implantation ionique d'hydrogène

• Une première étape de masquage, à l'aide d'une grille métallique posée au dessus du substrat, est effectuée conformément aux motifs, présentés sur la figure 5a. Les zones masquées (12) correspondent aux zones de la plaquette qui resteront de type p. Les zones découvertes correspondent aux zones (11) et (13) de la plaquette destinées à former
30 les zones de type n et les zones d'isolation électrique.

Les motifs sont de dimension 4x4 cm².

Cette première étape de masquage est suivie d'une implantation ionique d'hydrogène, par immersion plasma à l'aide d'un équipement standard, à une dose surfacique D1 de $4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$, ce qui correspondra pour la plaquette de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur à une dose volumique de $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. L'énergie d'implantation de l'hydrogène utilisée pour cette application est voisine de 135 keV.

• Cette première étape d'implantation ionique est ensuite suivie d'une nouvelle étape de masquage, comme représenté en figure 5b. Les zones masquées sont alors les zones de la plaquette (12) qui resteront de type p (zones non implantées) ainsi que les zones (implantées à la dose D1) de la plaquette (13) destinées à former les zones d'isolation électrique. Cette seconde étape de masquage est suivie d'une seconde étape d'implantation ionique sous l'énergie 135 keV à une dose d'implantation D2 de $4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, ce qui, dans une plaquette de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur, correspondra à une dose volumique de $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

15 Diffusion de l'hydrogène

Les masques sont ensuite enlevés, et la plaquette subit un recuit thermique en four à une température de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 10 minutes, pour permettre à l'hydrogène issu des couches implantées de se répartir de façon homogène sur l'épaisseur de la plaquette.

20 (c) Traitement thermique global

La plaquette subit un recuit thermique à une température voisine de $450 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant une durée de 3 heures, afin de transformer les zones dopées p comprenant l'hydrogène en zones dopées n, comme représenté schématiquement en figure 5c.

A l'issue du traitement thermique, la plaquette présentent une alternance de zones dopées n et de zones dopées p, chacune des zones n et p étant séparées par une zone d'isolation électrique (130) de résistivité élevée.

Références :

- [1] Pozner *et al.*, Progress in Photovoltaics 20 (2012), 197 ;
- [2] US 4,320,247 ;
- [3] Wijaranakula, Appl. Phys. Lett. 59 (1991), 1608.

REVENDEICATIONS

1. Plaquette de silicium (10) monolithique, présentant, dans au moins un plan vertical de coupe, une alternance de zones (110) dopées n et de zones (120) dopées p, chacune des zones s'étendant sur toute l'épaisseur (e) de la plaquette, caractérisée en ce que :

- lesdites zones (110) et (120) présentent chacune, dans le plan de coupe, une largeur (L_1 , L_2) d'au moins 1 mm ;

- les zones dopées n (110) présentent une concentration en donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel distincte de celle des zones dopées p (120) ; et

- lesdites zones dopées n (110) et lesdites zones dopées p (120) sont séparées entre elles par des zones d'isolation électrique (130).

2. Plaquette selon la revendication 1, ladite plaquette comprenant une concentration en oxygène interstitiel comprise entre 10^{17} et $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$, en particulier comprise entre 5.10^{17} et $1,5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$,

3. Plaquette selon la revendication 1 ou 2, dans laquelle lesdites zones dopées n (110) présentent, indépendamment les unes des autres, une largeur (L_1) allant de 1 mm à 10 cm, en particulier de 5 mm à 5 cm.

4. Plaquette selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle lesdites zones dopées p (120) présentent, indépendamment les unes des autres, une largeur (L_2) allant de 1 mm à 10 cm, en particulier de 5 mm à 5 cm.

5. Plaquette selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle chacune desdites zones d'isolation électrique (130) présente une largeur (L_3) allant de 50 μm à 5 mm, en particulier de 200 μm à 1 mm.

6. Plaquette selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle la disposition desdites zones n et p alternées forme un motif bidimensionnel, en particulier de type damier, avec le côté d'un carré étant plus particulièrement compris entre 1 mm et 10 cm, lesdites zones d'isolation électrique formant un pourtour de chacune des zones n et p.

7. Procédé de fabrication d'une plaquette (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant au moins les étapes consistant en :

(i) disposer d'une plaquette (1) en silicium dopé p comprenant une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) comprise entre 10^{14} et $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une concentration en oxygène interstitiel $[O_i]$ comprise entre 10^{17} et $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;

(ii) soumettre ladite plaquette de l'étape (i) à un traitement thermique global, propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel et à la conversion de l'ensemble de la plaquette en type n ;

(iii) soumettre des zones (12) de la plaquette (1') obtenue à l'issue de l'étape (ii), dédiées à former les zones dopées p, à un traitement thermique localisé propice à l'annihilation des donneurs thermiques et à la reconversion desdites zones (12) de type n en type p ; et

(iv) transformer, par traitement thermique, la portion (13) de chaque zone de type n, contigüe à une zone de type p, en une zone d'isolation électrique (130), pour obtenir la plaquette (10) attendue.

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit traitement thermique en étape (ii) est opéré par recuit à une température supérieure ou égale à 300°C et strictement inférieure à 600°C , en particulier allant de 400 à 500°C et plus particulièrement d'environ 450°C .

9. Procédé selon la revendication 7 ou 8, dans lequel lesdites zones (12) dédiées à former des zones dopées p sont portées en étape (iii) à une température supérieure ou égale à 600°C , notamment allant de 600 à 1000°C , en particulier pendant au moins 10 secondes.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, dans lequel ledit traitement thermique localisé en étape (iii) est opéré par exposition desdites zones (12) à un faisceau laser, en particulier avec une taille de spot de l'ordre du cm.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, dans lequel l'étape (iv) est opérée par exposition de chaque portion (13) à un faisceau laser, en particulier de taille de spot allant de 20 à $100 \mu\text{m}$.

12. Procédé de fabrication d'une plaquette (10) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, comprenant au moins les étapes consistant en :

(a) disposer d'une plaquette (1) en silicium dopé p comprenant une concentration en porteurs de charge de type trous (p_0) comprise entre 10^{14} et $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une concentration en oxygène interstitiel $[O_i]$ comprise entre 10^{17} et $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;

(b) doper en hydrogène les zones, dites (11) et (13), de la plaquette dédiées à former les zones dopées n et les zones d'isolation électrique ; et

(c) soumettre ladite plaquette de l'étape (b) à un traitement thermique global, propice à l'activation des donneurs thermiques à base d'oxygène interstitiel au niveau des zones dopées en hydrogène, et à la conversion desdites zones (11) de type p en type n et desdites zones (13) en zones d'isolation électrique, pour obtenir la plaquette (10) attendue.

13. Procédé selon la revendication 12, dans lequel le dopage en étape (b) comprend une étape (b1) d'implantation d'hydrogène à la surface ou en sub-surface des zones à doper, suivie d'une étape (b2) de diffusion de l'hydrogène sur toute l'épaisseur (e) de la plaquette.

14. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel l'implantation d'hydrogène en étape (b1) est effectuée par traitement plasma, en particulier par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma, par plasma d'hydrogène distant induit par micro-ondes, ou par une technique d'implantation ionique.

15. Procédé selon la revendication 13 ou 14, dans lequel l'étape (b2) de diffusion de l'hydrogène dans les zones à doper est opérée par exposition desdites zones aux ultrasons, en particulier à l'aide de transducteurs piézoélectriques ; ou par recuit thermique de la plaquette, en particulier à une température allant de 400 °C à 1000 °C et pendant une durée allant de 5 secondes à 5 heures.

16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, dans lequel l'étape (c) est opérée par recuit à une température supérieure ou égale à 300 °C et strictement inférieure à 600 °C, en particulier de 400 à 500 °C et plus particulièrement d'environ 450 °C.

17. Dispositif photovoltaïque, en particulier cellule photovoltaïque, comportant une plaquette de silicium telle que définie selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.

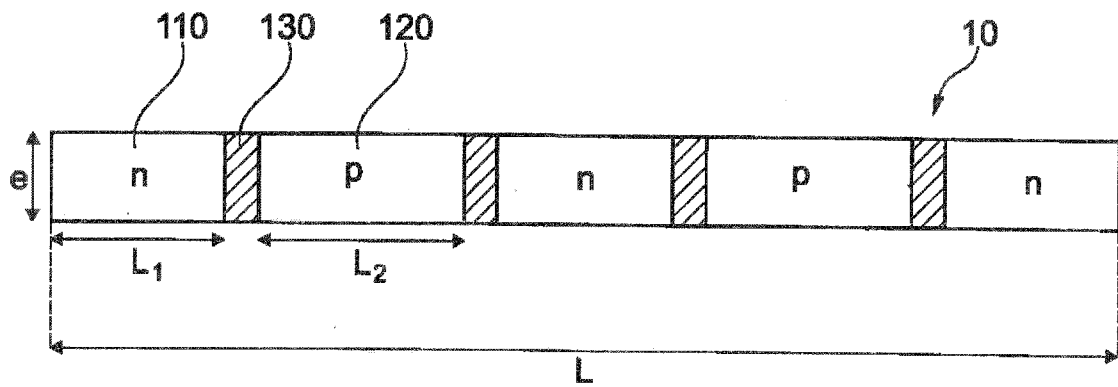


Fig. 1

2/4

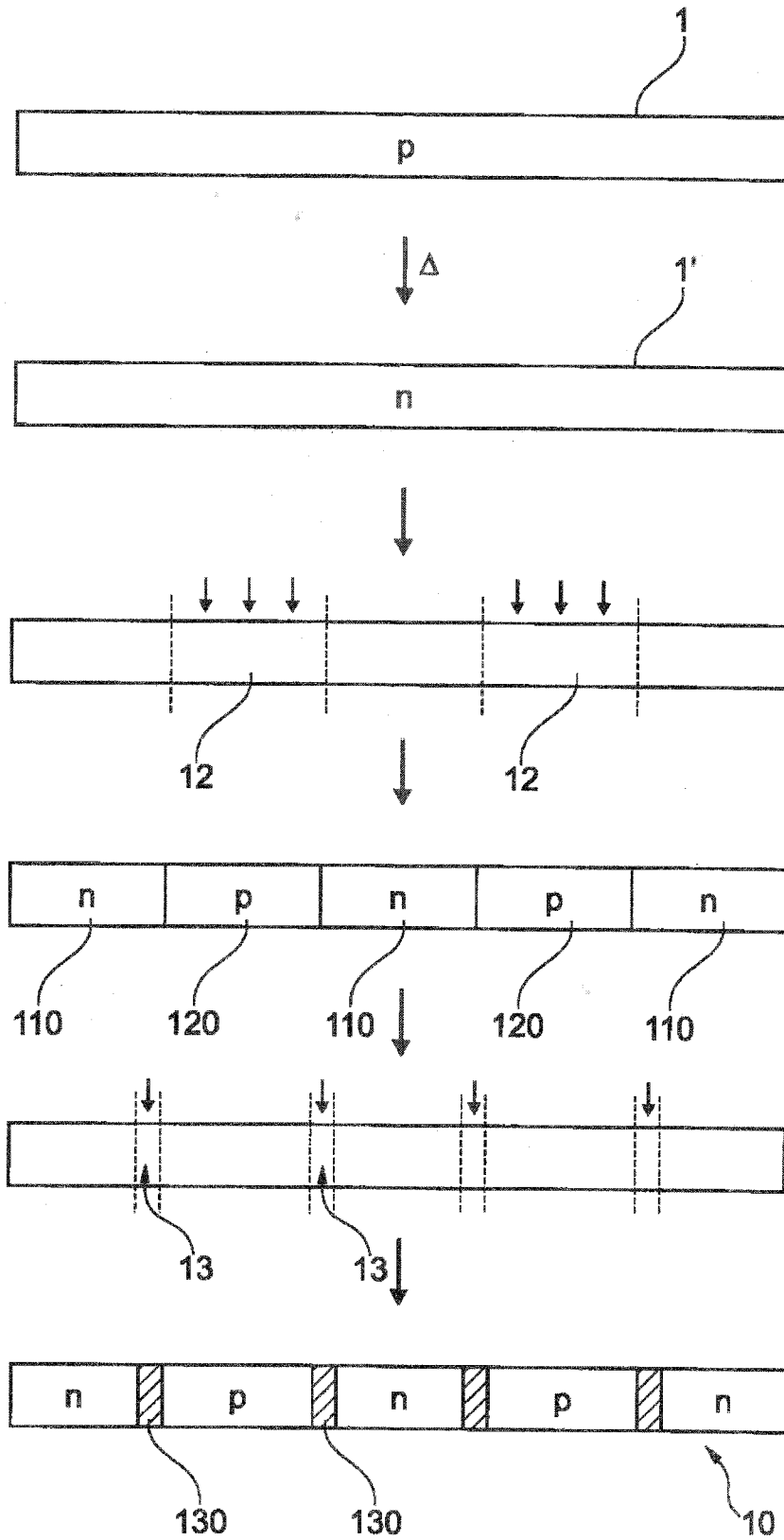


Fig. 2

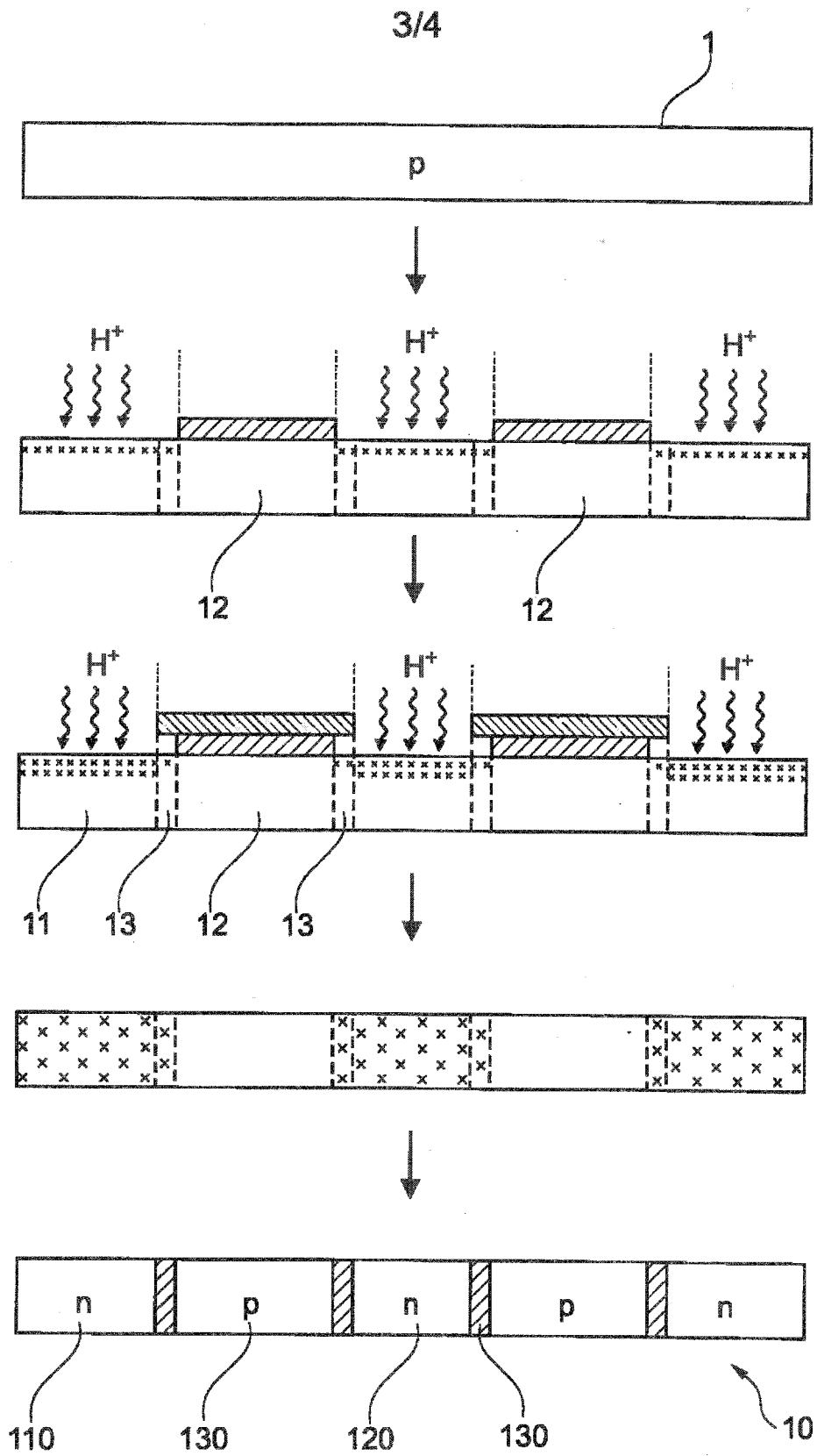


Fig. 3

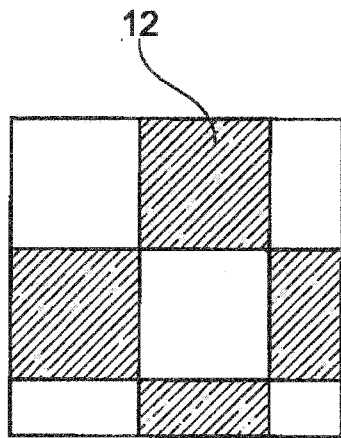


Fig. 4a

4/4

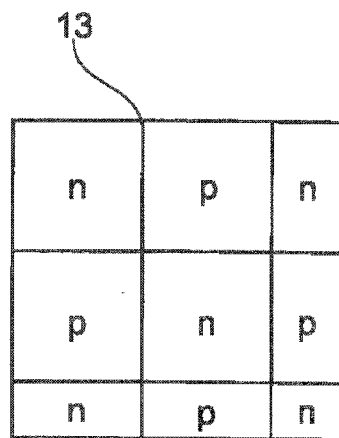


Fig. 4b

Fig. 4

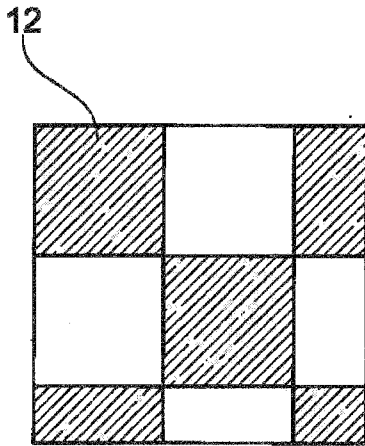


Fig. 5a

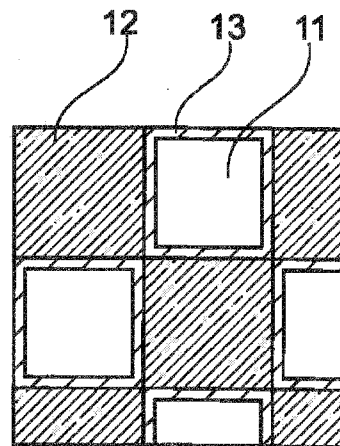


Fig. 5b

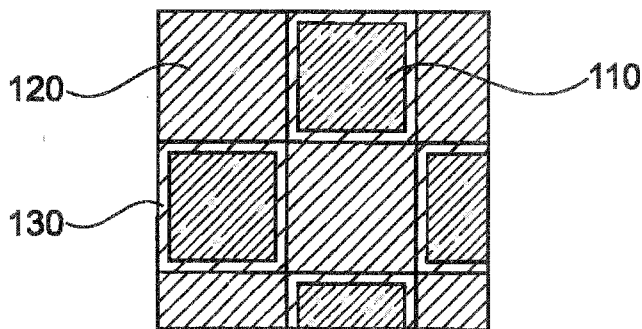


Fig. 5c

Fig. 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/IB2014/059497

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. H01L31/0352 H01L21/761 H01L31/068 H01L31/18 H01L27/142
 ADD. H01L31/0687

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2010/258172 A1 (STRABONI ALAIN [FR]) 14 October 2010 (2010-10-14) paragraphs [0240] - [0243]; figure 19 -----	1-6,17
X	HUANG Y ET AL: "Hydrogen diffusion at moderate temperatures in p-type Czochralski silicon", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, vol. 96, no. 12, 1 January 2004 (2004-01-01), pages 7080-7086, XP012068421, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.1812379	1-6, 12-16
A	the whole document ----- -/--	7

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
5 August 2014	11/08/2014

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Rodríguez-Gironés, M
--	--

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/IB2014/059497

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>US 2012/049242 A1 (ATANACKOVIC PETAR BRANKO [AU] ET AL) 1 March 2012 (2012-03-01) paragraphs [0011] - [0015] paragraph [0149]; figure 6 pages 171-193</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1,12
A	<p>JOB R ET AL: "Electronic device fabrication by simple hydrogen enhanced thermal donor formation processes in p-type Cz-silicon", MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING B, ELSEVIER SEQUOIA, LAUSANNE, CH, vol. 73, no. 1-3, 1 April 2000 (2000-04-01), pages 197-202, XP004192047, ISSN: 0921-5107, DOI: 10.1016/S0921-5107(99)00463-8 the whole document</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	7,12
A	<p>US 4 320 247 A (GATOS HARRY C ET AL) 16 March 1982 (1982-03-16) cited in the application abstract column 2, line 34 - column 4, line 48; figures 1,2,4</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1
A	<p>US 4 110 122 A (KAPLOW ROY ET AL) 29 August 1978 (1978-08-29) abstract column 3, line 36 - column 4, line 32; figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/IB2014/059497

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010258172	A1	14-10-2010	NONE
US 2012049242	A1	01-03-2012	US 2012049242 A1 01-03-2012
		WO 2010121309 A1	28-10-2010
US 4320247	A	16-03-1982	NONE
US 4110122	A	29-08-1978	CA 1072196 A1 19-02-1980
		FR 2353137 A1	23-12-1977
		IL 52160 A	12-03-1979
		JP S538094 A	25-01-1978
		US 4110122 A	29-08-1978
		US 4131984 A	02-01-1979
		ZA 7702631 A	27-12-1978
		ZA 7703186 A	26-04-1978

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/IB2014/059497

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H01L31/0352 H01L21/761 H01L31/068 H01L31/18 H01L27/142 ADD. H01L31/0687				
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB				
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE				
Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H01L				
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche				
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data				
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS				
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées		
X	US 2010/258172 A1 (STRABONI ALAIN [FR]) 14 octobre 2010 (2010-10-14) alinéas [0240] - [0243]; figure 19 -----	1-6,17		
X	HUANG Y ET AL: "Hydrogen diffusion at moderate temperatures in p-type Czochralski silicon", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, 2 HUNTINGTON QUADRANGLE, MELVILLE, NY 11747, vol. 96, no. 12, 1 janvier 2004 (2004-01-01), pages 7080-7086, XP012068421, ISSN: 0021-8979, DOI: 10.1063/1.1812379	1-6, 12-16		
A	le document en entier ----- -/--	7		
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe </td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe			
* Catégories spéciales de documents cités:				
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets			
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 5 août 2014	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 11/08/2014			
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé Rodríguez-Gironés, M			

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 2012/049242 A1 (ATANACKOVIC PETAR BRANKO [AU] ET AL) 1 mars 2012 (2012-03-01) alinéas [0011] - [0015] alinéa [0149]; figure 6 pages 171-193</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1,12
A	<p>JOB R ET AL: "Electronic device fabrication by simple hydrogen enhanced thermal donor formation processes in p-type Cz-silicon", MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING B, ELSEVIER SEQUOIA, LAUSANNE, CH, vol. 73, no. 1-3, 1 avril 2000 (2000-04-01), pages 197-202, XP004192047, ISSN: 0921-5107, DOI: 10.1016/S0921-5107(99)00463-8 le document en entier</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	7,12
A	<p>US 4 320 247 A (GATOS HARRY C ET AL) 16 mars 1982 (1982-03-16) cité dans la demande abrégé colonne 2, ligne 34 - colonne 4, ligne 48; figures 1,2,4</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1
A	<p>US 4 110 122 A (KAPLOW ROY ET AL) 29 août 1978 (1978-08-29) abrégé colonne 3, ligne 36 - colonne 4, ligne 32; figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/IB2014/059497

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2010258172	A1	14-10-2010	AUCUN
US 2012049242	A1	01-03-2012	US 2012049242 A1 01-03-2012 WO 2010121309 A1 28-10-2010
US 4320247	A	16-03-1982	AUCUN
US 4110122	A	29-08-1978	CA 1072196 A1 19-02-1980 FR 2353137 A1 23-12-1977 IL 52160 A 12-03-1979 JP S538094 A 25-01-1978 US 4110122 A 29-08-1978 US 4131984 A 02-01-1979 ZA 7702631 A 27-12-1978 ZA 7703186 A 26-04-1978