

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 79 25517

(54)

Procédé de formation de jonctions N-P, jonctions de ce type et leurs applications.

(51)

Classification internationale (Int. Cl. ³). H 01 L 21/268, 31/06.

(22)

Date de dépôt..... 12 octobre 1979.

(33) (32) (31)

Priorité revendiquée :

(41)

Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 16 du 17-4-1981.

(71)

Déposant : AGENCE NATIONALE DE VALORISATION DE LA RECHERCHE (ANVAR), résidant
en France.

(72)

Invention de : Roland Stuck, Eric Fogarassy, Jean-Claude Muller et Paul Siffert.

(73)

Titulaire : *Idem* (71)

(74)

Mandataire : Cabinet Plasseraud,
84, rue d'Amsterdam, 75009 Paris.

Procédé de formation de jonctions N-P, jonctions de ce type et leurs applications.

L'invention a pour objet un procédé de formation de jonctions N-P, plus particulièrement de celles désignées par N^+-P , à partir de substrats de type P et de dopants donneurs d'électrons ; ces jonctions sont destinées notamment à la formation de piles photovoltaïques.

L'invention vise également, en tant que produits industriels nouveaux, ces jonctions N^+-P ainsi que les piles photovoltaïques constituées à l'aide de ces jonctions.

Les deux principales techniques actuellement utilisées pour la formation de jonctions N-P dans les semi-conducteurs font appel à la diffusion thermique et à l'implantation ionique de dopants au sein du substrat. Mais ces deux techniques impliquent des traitements à température élevée qui peuvent provoquer des dégradations dans les matériaux utilisés.

On a également proposé une technique consistant, pour la constitution de jonctions silicium monocristallin-bore et silicium monocristallin-aluminium, le silicium jouant le rôle de substrat et le bore ou l'aluminium celui de dopant, à déposer le dopant dans des conditions n'impliquant pas le recours à une température élevée, puis traiter le dépôt de dopant à l'aide d'impulsions provenant d'un laser. On a ainsi évité les inconvénients inhérents à un traitement à haute température ; les résultats obtenus quant aux caractéristiques des jonctions N-P formées sont comparables à ceux des jonctions N-P obtenues par mise en oeuvre des méthodes antérieures appelées ci-dessus.

Jusqu'à ce jour, les jonctions N-P obtenues à partir d'un substrat de type P et d'un dopant donneur d'électrons dont la solubilité limite, c'est-à-dire la concentration maximale de dopant qu'il est possible d'obtenir au sein du substrat de type P, est très faible, présentent des caractéristiques relativement médiocres. Ceci est, par exemple, le cas de l'antimoine dont la solubilité limite dans un substrat tel que le silicium de type P est très faible, ce qui implique une très mauvaise qualité des jonctions N-P formées, pour

l'application notamment aux cellules solaires.

Dans le cas où le dopant donneur d'électrons est le bismuth, sa solubilité limite à l'intérieur d'un substrat tel que le silicium de type P est si faible qu'il est pratiquement impossible de réaliser une jonction.

L'invention a donc pour but, surtout, de remédier à ces inconvénients et de fournir un procédé propre à permettre la formation de jonction N^+P de caractéristiques améliorées.

Or, il a été trouvé que, de façon tout à fait inattendue, il était possible d'obtenir, à l'équilibre, une concentration maximale de dopant donneur d'électrons au sein d'un substrat de type P, nettement supérieure à celle prévisible par les limites de solubilité, connues, dudit dopant dans ledit substrat en déposant une pellicule dudit dopant sur ledit substrat et en irradiant la couche de dopant par un faisceau énergétique d'électrons ou de photons.

Le procédé conforme à l'invention est donc caractérisé par le fait que l'on dépose sur un substrat, notamment une plaquette, de type P, une couche mince de dopant donneur d'électrons et que l'on irradie la surface de la couche de dopant à l'aide d'un faisceau d'électrons ou de photons dont les caractéristiques sont choisies de façon telle que, sous l'influence dudit faisceau, les atomes constitutifs du dopant soient introduits dans la structure atomique du substrat.

Suivant un mode de réalisation avantageux, le substrat de type P est constitué de silicium et le dopant donneur d'électrons est choisi parmi ceux qui ont un faible coefficient de ségrégation, permettant ainsi d'obtenir des profils de variation de concentration de dopant dans le substrat à gradient très abrupt ainsi qu'un taux d'intégration tout à fait inattendu et exceptionnel du dopant dans le réseau du substrat, en position substitutionnelle.

Se proposant donc de préparer une jonction de type N^+P , on procède comme suit ou de façon équivalente.

On dépose d'abord sur un substrat de type P une pellicule de dopant donneur d'électrons, en ayant recours à un procédé approprié, par exemple à une évaporation sous vide, à une pulvérisation cathodique ou à un dépôt chimique en phase vapeur.

On s'arrange pour que l'épaisseur de la pellicule déposée soit comprise entre environ 20 et environ 200 Å.

Dans une deuxième phase, on irradie la pellicule de dopant donneur d'électrons ou bien par un faisceau de photons, 5 à l'air, ou bien par un faisceau d'électrons, sous vide d'environ 10^{-5} - 5×10^{-6} torr.

Dans certains cas, le diamètre de l'impact du faisceau est suffisamment grand pour qu'une jonction de surface suffisante soit formée. Dans les autres cas, il convient 10 d'avoir recours à un ensemble d'irradiations successives point par point, chaque impact se recouvrant partiellement avec le suivant.

Les caractéristiques du faisceau sont choisies de façon telle que, sous l'influence dudit faisceau, les atomes 15 constitutifs du dopant soient introduits dans la structure atomique du substrat.

Ces caractéristiques sont l'énergie apportée par le faisceau et, de plus, en ce qui concerne le faisceau de photons, sa longueur d'onde.

20 Bien que le mécanisme physique soit encore mal établi, il semble -- étant entendu que la demanderesse entend ne pas être liée par cette hypothèse -- qu'il se produit une fusion (ou du moins les phénomènes physiques se produisant alors sont analogues à ceux survenant lors d'une fusion) de la couche superficielle du substrat sur une épaisseur pouvant varier 25 d'environ 3000 à environ 5000 Å et, en général, d'environ 4000 Å. Cette épaisseur varie, bien entendu, avec l'énergie mise en jeu par le faisceau utilisé.

L'énergie du faisceau d'électrons ou de photons utilisé 30 lisé doit être suffisante pour que ce qui vient d'être ci-dessus appelé fusion ait lieu, et ne doit pas être supérieure à une valeur à partir de laquelle le substrat est dégradé.

Dans le cas du faisceau d'électrons, l'énergie apportée doit être d'environ 10 keV.

35 Dans le cas du faisceau de photons, du point de vue pratique, la valeur de l'énergie apportée par le faisceau est choisie entre environ 1 et environ 2 à 3 joules/cm², avantageusement entre 1,1 et 1,8 joules/cm² et, de préférence, voisine de 1,4-1,5 joules/cm².

Pour apporter cette énergie, on peut avoir recours soit à un laser pulsé, soit à un laser continu.

Dans le premier cas, la puissance du faisceau est d'environ 10 à environ 100 mégawatts/cm² et la durée de l'ordre de 20 ns par impulsion.

Dans le cas du laser continu, cette puissance est de 10 à 20 watts/cm² et la durée de 1 milliseconde à 1 seconde.

La longueur d'onde du laser doit être d'environ 0,5 à environ 0,7 μ .

On utilisera avantageusement un laser pulsé à rubis (longueur d'onde : 0,6943 μ) ou du type YAG (longueur d'onde : 0,53 μ) ou un laser continu au CO₂.

Le refroidissement se produit, après l'impact du faisceau, très rapidement en environ 200 à 300 ns et une recristallisation par épitaxie se fait à partir du volume vers la surface. On obtient des couches de grande perfection cristalline dans lesquelles la répartition du dopant donneur d'électrons s'effectue selon les lois de ségrégation à l'interface liquide solide.

Selon un mode de réalisation préféré du susdit procédé, on a recours, en tant que substrat, à du silicium de type P, monocristallin ou polycristallin.

Le silicium monocristallin de type P peut être dopé au bore.

Selon un autre mode de réalisation avantageux du susdit procédé, on a recours, à titre de substrat, à l'un de ceux du groupe comprenant GaAs et CdTe.

Lorsque le substrat est du GaAs, on l'amène à l'état P par dopage, par exemple, au Zn, Mg, Be, Cd ou Hg.

Lorsque le substrat est du CdTe, on a recours à un dopant choisi par exemple parmi Cu, Ag et Au.

Lorsque le substrat est constitué par le silicium de type P, le dopant donneur d'électrons est choisi dans le groupe comprenant le phosphore, l'arsenic et, de préférence, l'antimoine, le bismuth et le lithium pour lesquels le coefficient de ségrégation vis-à-vis du silicium est compris entre environ $4 \cdot 10^{-4}$ et environ 10^{-2} .

Lorsque le substrat est du GaAs de type P, le dopant

donneur d'électrons est choisi parmi S, Se et Te.

Lorsque le substrat est du CdTe, le dopant donneur d'électrons est choisi parmi F, Cl, Br et I.

Dans le cas où l'on utilise le couple "silicium monocristallin de type P / antimoine" ou le couple "silicium monocristallin de type P / bismuth", l'antimoine et le bismuth sont déposés sur le substrat à raison d'environ 20 à environ 200 Å, de préférence de 40 à 200 Å.

L'exemple qui suit, donné à titre illustratif, permettra de mieux comprendre l'invention et concerne un mode de réalisation particulièrement avantageux de celle-ci.

Il est relatif à la formation de jonctions N⁺-P, dans lesquelles le substrat est du silicium de type P et le dopant donneur d'électrons est de l'antimoine.

Les échantillons de silicium auxquels on a eu recours sont des plaquettes de silicium de 300 µm d'épaisseur, orientées selon l'axe cristallographique <1,1,1>, lesdites plaquettes ayant été découpées à partir d'un monocristal de silicium dopé au bore et possédant une résistivité de 1,5 Ω cm; on peut par exemple avoir recours aux plaquettes de silicium de ce type commercialisées par la Société RADIOTECHNIQUE COMPELEC. Ces échantillons de silicium sont polis chimiquement à l'aide d'un décapant constitué par un mélange comportant 3 parties en poids de HNO₃ et une partie en poids de HF, puis rincés dans de l'acide fluorhydrique pour enlever l'oxyde formé en surface.

Pour le dépôt du dopant, on peut avoir recours à une enceinte d'évaporation dans laquelle on place les plaquettes de silicium.

Dans cette enceinte, on établit une pression inférieure à $1,0 \times 10^{-5}$ torr. On fait évaporer par effet Joule, à l'intérieur de l'enceinte, de l'antimoine pur devant se déposer sur les plaquettes et on poursuit l'expérience, l'épaisseur de la pellicule d'antimoine déposée sur les plaquettes de silicium étant contrôlée par une balance à quartz jusqu'à ce que ladite épaisseur atteigne la valeur requise. On fait en sorte que la vitesse de dépôt de l'antimoine sur le substrat de silicium soit au moins égale à 2 Å par seconde de manière à ce que les couches déposées soient homogènes.

On a traité plusieurs échantillons ; les épaisseurs de la couche de dopant varient pour ces échantillons de 20 à 150 Å, mesurées par une balance à quartz.

Pour les échantillons présentant les plus grosses épaisseurs, à savoir celles supérieures à 100 Å, on a procédé à un contrôle par mesure électromécanique établie à l'aide d'un appareil à palpeur connu sous la marque "TALYSTEP". Un autre contrôle de l'épaisseur de la pellicule d'antimoine a été effectué à l'aide de la méthode dite de R.B.S. (Rutherford Back-scattering Spectrometry) ou rétrodiffusion Rutherford.

On irradie ensuite les plaquettes de silicium recouvertes de la susdite pellicule d'antimoine en utilisant l'impulsion issue de la sortie monomode amplifiée d'un laser à rubis dont les densités d'énergie sont comprises dans le domaine de 1,1 à 2 joules/cm².

La durée d'une impulsion est de 20 ns.

Le spot du laser est presque uniforme le long de son diamètre d'environ 1 cm et, en général, il a suffi d'une seule impulsion.

Après l'irradiation, les plaquettes sont décapées dans un mélange constitué de parties pondérales égales de HCl, H₂O et HNO₃, afin d'éliminer l'antimoine qui n'a pas diffusé dans le cristal de silicium.

Les jonctions ainsi obtenues ont été soumises à un certain nombre de mesures.

On détermine tout d'abord le profil de concentration de la totalité de l'antimoine présent dans le réseau cristallin du silicium, ainsi que celui de l'antimoine qui se trouve en position substitutionnelle ; pour ce faire, on effectue des expériences de rétrodiffusion Rutherford en ayant, à cet égard, recours à un faisceau de particules ⁴He⁺, faisceau dont l'énergie est de 2 MeV et le diamètre de 2 mm. Des mesures effectuées par spectroscopie d'ions secondaires ont donné pratiquement les mêmes résultats.

Ces expériences de rétrodiffusion de particules ⁴He⁺ ont montré que le nombre d'atomes d'antimoine était de l'ordre de 10¹⁶ atomes/cm², plus de 90 % de ces atomes d'antimoine se trouvant en position substitutionnelle ; la concentration maximale d'antimoine est de 1,1 x 10²¹ atomes/cm³, c'est-à-dire

présente une valeur bien supérieure à la solubilité limite de l'antimoine dans le silicium telle qu'elle est obtenue actuellement par diffusion thermique à 1200°C, cette solubilité étant de 6×10^{19} atomes par cm^3 .

Il y a lieu de noter que la valeur de la concentration maximale d'antimoine dans le silicium, obtenue dans le procédé conforme à l'invention, est pratiquement indépendante de la puissance d'irradiation mise en jeu.

On a mesuré ensuite la résistance superficielle de ces jonctions. Les résultats obtenus montrent que cette résistance superficielle est, pour des épaisseurs de dopant supérieures ou égales à 40 Å, inférieure à 20 $\Omega/\square$, résultat inattendu et surprenant car, dans le cadre des jonctions obtenues par diffusion d'antimoine dans du silicium de type P, la résistance superficielle est d'environ 200 $\Omega/\square$. Des mesures effectuées selon les normes de Van der Pauw ont montré que la concentration de dopant électriquement active est très proche de celle de l'antimoine en position substitutionnelle.

Ces résultats sont rassemblés dans le tableau I.

20

TABLEAU I

Epaisseur ° (Å)	Sb électriquement actif (cm^{-2})	Sb en position substitutionnelle (cm^{-2})
20	$6,6 \times 10^{15}$	$6,9 \times 10^{15}$
40	$1,1 \times 10^{16}$	$1,2 \times 10^{16}$
70	$1,8 \times 10^{16}$	$1,7 \times 10^{16}$
110	$1,7 \times 10^{16}$	$1,67 \times 10^{16}$

Energie du laser = 2 J/cm^2 .

Lorsque le dopant donneur d'électrons est constitué par le phosphore ou l'arsenic, la quasi totalité des atomes en position substitutionnelle est électriquement active.

Les jonctions $\text{N}^+\text{-P}$ selon l'invention et qui peuvent être obtenues par mise en oeuvre du procédé venant d'être décrit, sont constituées par un substrat de type P, plus particulièrement par du silicium mono- ou polycristallin de type P et par un dopant donneur d'électrons ; dans ces jonctions,

la concentration maximale du matériau dopant donneur d'électrons dans le substrat atteint une valeur au moins égale à environ 1.10^{20} atomes/cm³.

Dans ces jonctions, au moins 90 % des atomes du dopant donneur d'électrons se trouvent en position substitutionnelle, c'est-à-dire, en d'autres termes, en position électriquement active, la valeur de 90 % étant considérée par rapport à la concentration totale du dopant donneur d'électrons dans le substrat de type P.

Le substrat peut également être constitué par du GaAs ou du CdTe, de type P, le dopant donneur d'électrons étant choisi par exemple parmi S, Se et Te dans le cas du GaAs et parmi F, Cl, Br et I dans le cas du CdTe.

Le dopant donneur d'électrons est choisi, dans le cas du silicium de type P, dans le groupe comprenant l'arsenic, le phosphore et, de préférence, l'antimoine, le bismuth et le lithium dont le coefficient de ségrégation vis-à-vis du silicium est compris entre environ 4.10^{-4} et environ 10^{-2} .

Pour contrôler la concentration du dopant donneur d'électrons, on a procédé à des expériences de rétrodiffusion de particules $^4\text{He}^+$ de quelques MeV qui ont permis de déterminer la solubilité limite des dopants après traitement au laser.

Les résultats de cette expérience se trouvent rassemblés dans le tableau II, dans lequel, pour les cinq corps suivants : l'antimoine, le bismuth, le lithium, le phosphore et l'arsenic, on a indiqué par :

- k, la valeur du coefficient de ségrégation vis-à-vis du silicium,

- C_{max}, la concentration maximale en atomes par cm³, c'est-à-dire la solubilité limite dans le silicium, obtenue par diffusion thermique à 1200°C,

- C_{max laser}, la concentration maximale en atomes par cm³ (solubilité limite) dans le silicium obtenue après traitement au laser, conformément à l'invention.

TABLEAU II

	k	C _{max} ³ (at/cm ³)	C _{max} laser (at/cm ³)
Sb	2×10^{-2}	6×10^{19}	1×10^{21}
Bi	7×10^{-4}	$4-5 \times 10^{17}$	3×10^{20}
Li	1×10^{-2}	voisine de 10^{20}	environ égale à 10^{21}
As	0,30	$1,5 \times 10^{21}$	$1,5 \times 10^{21}$
P	0,35	$1,5 \times 10^{21}$	$1,5 \times 10^{21}$

10 Ces résultats montrent que, pour les dopants donneurs d'électrons ayant un coefficient de ségrégation vis-à-vis du silicium, compris entre $4 \cdot 10^{-4}$ et 10^{-2} , à savoir Sb, Bi et Li, la solubilité limite, après traitement au laser, est très supérieure à celle obtenue par la méthode de diffusion thermique à 1200°C .

15 Pour ce qui est plus particulièrement du cas où le dopant donneur d'électrons est l'antimoine, la solubilité limite de celui-ci dans le silicium atteint la valeur de $1,1 \times 10^{21}$ atomes/cm³, et la valeur de la concentration substitutionnelle atteint $1,0 \times 10^{21}$ atomes/cm³.

20 Dans le cas des jonctions selon l'invention dans lesquelles le dopant est l'arsenic ou le phosphore, les caractéristiques électriques sont nettement meilleures que dans le cas des jonctions "Si de type P/As" et "Si de type P/P" de l'art antérieur pour lesquelles la concentration en atomes de dopant donneur d'électrons est supérieure à environ $2 \cdot 10^{20}$ atomes par cm³.

25 La résistance superficielle des jonctions N⁺-P selon l'invention est au plus égale à environ 20 Ω/□, ce qui constitue un avantage considérable par rapport aux jonctions N⁺-P obtenues par les procédés de l'art antérieur. En effet, les jonctions N⁺-P obtenues par diffusion présentent une résistance superficielle de 100 Ω/□.

30 Les jonctions N⁺-P de la présente invention trouvent leur application notamment dans la réalisation de cellules

les solaires photovoltaïques.

Ces cellules solaires possèdent :

- de très bonnes caractéristiques électriques,
- une bonne qualité cristallographique due à l'absence
5 de défauts cristallographiques, entraînant une très bonne
collecte des porteurs photogénérés sous éclairage solaire,
- des fenêtres d'entrée très minces, présentant un pro-
fil de dopage et une concentration en dopants tout à fait
remarquable.

10 Les rendements de conversion des photopiles obtenues
à partir de ces jonctions sous éclairage AM1 (100 milli-
watts/cm² au sol) et sans champ arrière sont les suivants :

- 11 % sans couche antireflet (tension en circuit
ouvert $V_{co} = 560$ mV, intensité de courant en circuit ouvert
15 $I_{co} = 26$ mA/cm², facteur de qualité = 0,75),
- 14 % avec couche antireflet obtenue par applica-
tion d'un film de SiO₂.

En suite de quoi et quel que soit le mode de réali-
sation adopté, on dispose ainsi de jonctions N⁺-P et d'un
20 procédé pour les obtenir dont les caractéristiques résultent
suffisamment de ce qui précède pour qu'il soit inutile d'in-
sister à ce sujet et qui présentent de nombreux avantages,
notamment :

- en ce qui concerne les jonctions,
- 25 . une très bonne caractéristique électrique (haut
niveau de dopage dans la couche superficielle, profil de do-
page très abrupt),
- . une très bonne qualité cristallographique et
- . une longueur de diffusion dans le matériau de
30 base intacte (en raison de l'absence de mise en oeuvre d'une
température susceptible de dégrader le matériau),
- en ce qui concerne le procédé,
- . une grande simplicité de mise en oeuvre,
- . une non-dégradation du matériau,
- 35 . une économie.

Comme il va de soi et comme il résulte d'ailleurs
déjà de ce qui précède, l'invention ne se limite nullement
aux modes d'application et de réalisation qui ont été plus
particulièrement envisagés ; elle en embrasse, au contraire,

toutes les variantes, notamment celles dans lesquelles on applique le procédé selon l'invention à des substrats métalliques et à des substances jouant par analogie le rôle du dopant dans le procédé sus-décrit et susceptibles de former des alliages avec les substrats métalliques, l'invention visant bien entendu, dans ces cas, également les produits ainsi obtenus qui se distinguent notamment par des propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion améliorées.

REVENDICATIONS

1. Procédé de réalisation d'une jonction N^+-P , notamment pour la formation de piles photovoltaïques par irradiation, à l'aide d'un faisceau d'électrons ou de photons, d'une pellicule de dopant déposée sur un substrat, caractérisé en ce que l'on dépose sur un substrat, notamment une plaquette, de type P, une couche mince de dopant donneur d'électrons, le faisceau d'électrons ou de photons ayant des caractéristiques choisies de façon telle que, sous influence du faisceau, les atomes constitutifs du dopant soient introduits dans la structure atomique du substrat.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on a recours à un substrat de type P constitué par du silicium monocristallin de type P.

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on a recours à un substrat de type P constitué par du silicium polycristallin de type P.

4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on a recours à un substrat de type P constitué par GaAs.

5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on a recours à un substrat de type P constitué par CdTe.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'on a recours à un dopant donneur d'électrons constitué par de l'antimoine.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'on a recours à un dopant donneur d'électrons choisi dans le groupe constitué par le bismuth, le lithium, l'arsenic ou le phosphore.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 et 4, caractérisé en ce que l'on a recours à un dopant donneur d'électrons choisi dans le groupe constitué par le soufre, le sélénium ou le tellure.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 et 5, caractérisé en ce que l'on a recours à un dopant donneur d'électrons choisi dans le groupe constitué par le fluor, le chlore, le brome ou l'iode.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendica-

tions 1 à 9, caractérisé en ce que l'on dépose sur le substrat avant l'irradiation une pellicule de dopant d'une épaisseur comprise entre environ 20 et environ 200 Å, de préférence de 40 à 200 Å.

5 11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que l'on a recours à un faisceau choisi dans le groupe constitué, d'une part, par les faisceaux issus de laser pulsé, notamment à rubis ou du type YAG ayant une puissance d'environ 10 à environ 100 mégawatts, 10 d'autre part, par les faisceaux issus d'un laser continu, notamment laser au CO_2 , ayant une puissance d'environ 10 à environ 20 watts et, d'autre part encore, par les faisceaux d'électrons ayant une énergie égale à environ 10 keV.

12. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ caractérisée en ce qu'elle est ob- 15 tenue par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11.

13. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ constituée à partir d'un substrat de silicium monocristallin ou polycristallin de type P, et d'un dopant donneur d'électrons, caractérisée en ce que la 20 concentration maximale du dopant donneur d'électrons au sein du substrat atteint une valeur d'environ $1 \cdot 10^{20}$ atomes/cm³.

14. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ selon la revendication 13, caractérisée en ce que la concentration en position substitutionnelle des atomes du dopant donneur d'électrons dans le réseau 25 du substrat, est supérieure ou égale à environ 90 %.

15. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ selon l'une quelconque des revendications 12 à 14, caractérisée en ce que la résistance superficielle est au plus égale à environ 20 $\Omega/\square$.

16. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, caractérisée en ce que le dopant donneur d'électrons est choisi dans le groupe constitué par l'anti- 30 moine, le bismuth et le lithium.

17. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ selon la revendication 12, caractérisée en ce que la quasi totalité des atomes en position 35 substitutionnelle est électriquement active, le dopant donneur d'électrons étant constitué par le phosphore ou l'arsenic.

18. Jonction $\text{N}^+\text{-P}$ selon la revendication 16, caractérisée en ce que le dopant donneur d'électrons est de l'anti-

moine, en ce que sa concentration maximale au sein du silicium monocristallin est d'environ $1,1 \times 10^{21}$ atomes/cm³ et en ce que sa concentration substitutionnelle est d'environ 1×10^{21} atomes/cm³.

5 19. Jonction N⁺-P selon la revendication 16, caractérisée en ce que le dopant donneur d'électrons est du bismuth, en ce que sa concentration maximale au sein du silicium monocristallin est d'environ 3.10^{20} atomes/cm³.

10 20. Jonction N⁺-P selon la revendication 13, caractérisée en ce que le substrat est constitué par le GaAs ou CdTe de type P et le dopant donneur d'électrons par Zn, Mg, Be, Cd ou Hg dans le cas de GaAs et par Cu, Au ou Ag dans le cas de CdTe.

15 21. Pile photovoltaïque caractérisée en ce qu'elle comprend une jonction N⁺-P selon l'une quelconque des revendications 11 à 18.