

AUGMENTATION DE LA HAUTEUR DE BARRIERE
DES CELLULES SOLAIRES AU SILICIUM

INCREASE OF THE BARRIER HEIGHT
OF SILICON SOLAR CELLS

J.P. PONPON, P. SIFFERT
CENTRE DE RECHERCHES NUCLEAIRES
Laboratoire de Physique des Rayonnements et
d'Electronique Nucléaire
67037 STRASBOURG CEDEX

Le rendement des cellules solaires au silicium réalisées par diode Schottky dépend essentiellement de la hauteur de la barrière de potentiel au contact métal-semiconducteur. On propose ici deux procédés permettant de porter cette barrière aux environs de 1 eV , soit par évaporation de hafnium sur du silicium P, soit par une implantation d'ions avant la formation d'une diode Schottky à l'or sur du silicium N.

The efficiency of Schottky silicon solar cells depends strongly upon the barrier height of the metal-semiconductor contact. Increasing this barrier height up to about 1 eV is possible as shown here, either by use of hafnium contacts on P type silicon, or by making an ion implantation before the realisation of a gold schottky diode on N type silicon.

AUGMENTATION DE LA HAUTEUR DE BARRIERE
DES CELLULES SOLAIRES AU SILICIUM

J.P. PONFON, P. SIFFERT
CENTRE DE RECHERCHES NUCLEAIRES
Laboratoire de Physique des Rayonnements et
d'Electronique Nucléaire
67037 STRASBOURG Cedex

INTRODUCTION

Les cellules solaires au silicium, largement utilisées dans les expériences spatiales pour la conversion en électricité de l'énergie solaire, sont préparées par diffusion d'une impureté donatrice dans un substrat de type P. Leur rendement de conversion atteint actuellement 15 % dans les meilleurs des cas (à savoir pour une profondeur de diffusion de l'ordre de $0,2 \mu$ et des conditions de réalisation optimales pour ce qui concerne la grille collectrice et la couche antiréfléchissante [1,2]) alors que la limite calculée est d'environ 23 %. L'application terrestre à grande échelle de ces cellules nécessite une réduction importante des coûts de production, d'un facteur 100 au moins. Les diodes Schottky représentent une alternative intéressante pour la réalisation de

tels dispositifs du fait de leur plus faible prix de revient et de leur mince fenêtre d'entrée, qui permettrait une amélioration de la réponse de côté des courtes longueurs d'onde. Toutefois, peu de travaux ont été effectués dans ce domaine [3,4,5] et les rendements atteignent à peine 8 %. Comme on le verra ci-après, ceux-ci sont limités par la faible hauteur de barrière ϕ_{Bn} au contact métal-semiconducteur. Nous montrons ici qu'il est possible de porter les valeurs de ϕ_{Bn} à 1 eV et, par conséquent, d'augmenter considérablement l'efficacité de conversion .

I. RENDEMENT DE CONVERSION DES DIODES SCHOTTKY AU SILICIUM

LOFERSKI [6] a montré que l'efficacité de conversion η d'une cellule solaire, égale au rapport de la puissance délivrée par la cellule à la puissance photonique d'entrée P par unité de surface est donnée par la relation :

$$\eta = \frac{e V_m I_0}{kT P} \exp\left(\frac{e V_m}{kT}\right) \quad (1)$$

$$\text{dans laquelle } I_0 = A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{e \phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2)$$

A^{**} étant la constante effective de Richardson et V_m représente la tension aux bornes de la cellule à la puissance maximale, calculée d'après l'expression :

$$\left(1 + \frac{e V_m}{kT}\right) \exp\left(\frac{e V_m}{kT}\right) = 1 + \frac{I_p}{I_0} \quad (3)$$

où I_p est le photocourant généré sous illumination.

Les autres symboles ont leur signification habituelle.

Nous avons calculé l'efficacité maximale η pour un éclairage dans l'espace (AMO) en négligeant les pertes par réflexions et recombinaisons et en supposant le rendement quantique égal à l'unité. Dans ces conditions $P = 0,135 \text{ W/cm}^2$; $I_p = 60 \text{ mA/cm}^2$; $A^{**} = 96 \text{ A/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^2$.

Les résultats de ces calculs sont reportés sur la figure 1 en fonction de la hauteur de barrière ϕ_{Bn} pour différentes températures de fonctionnement. A température ambiante, on montre que :

$$\eta (\%) = 41,2 \phi_{\text{Bn}}(\text{eV}) - 22,7 \quad (4)$$

Généralement les valeurs de ϕ_{Bn} sont de l'ordre de 0,8 eV quelle que soit la résistivité du matériau de base [7], dans une grande plage de température, ce qui limite les rendements à 10 % environ. Une augmentation de ϕ_{Bn} à 1 eV conduirait presque à doubler ce chiffre. Nous proposons deux méthodes pour atteindre ce but.

II. BARRIERE HAFNIUM-SILICIUM P

Nous avons montré récemment que le hafnium déposé sur le silicium de type P, donne une hauteur de barrière ϕ_{Bn} égale à 0,95 eV à température ambiante, sans formation de siliciure. Ces résultats, ayant fait l'objet d'une publication récente [8], ne seront pas développés ici.

barrière était initialement 0,8 eV et avons utilisé des ions gallium de 30 keV dans du silicium contenant en moyenne $5,5 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$ impuretés ionisées. La courbure des bandes V_0 étant égale à 0,5 V la valeur de D_0 est de l'ordre de $6 \cdot 10^{11}/\text{cm}^2$; nous avons par conséquent introduit des doses comprises entre 10^{12} et $2,5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^2$ et procédé à un recuit des échantillons à 400°C afin de rendre une partie des ions implantés électriquement actifs. Les hauteurs de barrière ont été déterminées par une mesure de la capacité C des diodes en fonction de la tension de polarisation inverse. L'extrapolation des droites S^2/C^2 (où S est la surface des diodes) donne la valeur V_S de la courbure des bandes ; ϕ_{Bn} se calcule alors par la relation :

$$\phi_{Bn} = V_S + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_C}{N_D - N_A}\right) \quad (6)$$

où N_C est le nombre d'états dans la bande de conduction. Pour des doses implantées de 10^{12} , $5 \cdot 10^{12}$ et 10^{13} ions Ga^+/cm^2 les valeurs de ϕ_{Bn} trouvées sont respectivement égales à 0,91, 0,96 et $0,99 \pm 0,02$ eV. Une dose de $2,5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^2$ provoque la formation d'une jonction P-N.

On peut noter que la capacité des diodes varie avec la fréquence du signal de mesure délivré par le capacimètre, ce qui indique la présence de niveaux d'énergie profonds situés dans la bande interdite et produits lors du bombardement. Une étude plus détaillée des conditions du recuit devrait permettre d'éliminer ces derniers. On peut également envisager l'implantation d'ions plus légers (bore) qui créent moins de dommages. Toutefois, afin

III. BARRIERE OR-SILICIUM N PREBOMBARDE

La présence d'une zone superficielle de très faible épaisseur et de type de conduction opposé à celui du substrat peut provoquer, dans certaines conditions, une augmentation notable de la hauteur de la barrière de potentiel d'une diode Schottky, du fait de la modification de la courbure des bandes. Une telle zone peut être produite par implantation ionique, processus qui permet un contrôle aisé de la densité d'impuretés introduites et de leur profondeur de pénétration. Dans du silicium de type N, l'introduction d'ions accepteurs crée une zone de charge d'espace négative qui augmente le potentiel à la surface pour les électrons, à condition que la dose implantée soit supérieure à une valeur minimale D_0 telle que :

$$D_0 = \left[\frac{2 \epsilon V_0}{e} (N_D - N_A) \right]^{1/2} \quad (5)$$

où $(N_D - N_A)$ représente la densité d'impuretés ionisées du substrat N et V_0 la courbure des bandes de la barrière de Schottky conventionnelle. La hauteur de barrière ϕ_{BN} augmente avec la dose tant que la zone implantée demeure totalement désertée en l'absence de toute polarisation extérieure. Au-delà il y a formation d'une jonction P-N.

L'utilisation de ce procédé a permis à SHANNON [9] de porter la hauteur de barrière de diodes nickel-silicium P de 0,49 à 0,75 eV en implantant des ions antimoine de 5 keV. Nous avons étudié des diodes or-silicium N, pour lesquelles la hauteur de

barrière était initialement 0,8 eV et avons utilisé des ions gallium de 30 keV dans du silicium contenant en moyenne $5,5 \cdot 10^{14}/\text{cm}^3$ impuretés ionisées. La courbure des bandes V_0 étant égale à 0,5 V la valeur de D_0 est de l'ordre de $6 \cdot 10^{11}/\text{cm}^2$; nous avons par conséquent introduit des doses comprises entre 10^{12} et $2,5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^2$ et procédé à un recuit des échantillons à 400°C afin de rendre une partie des ions implantés électriquement actifs. Les hauteurs de barrière ont été déterminées par une mesure de la capacité C des diodes en fonction de la tension de polarisation inverse. L'extrapolation des droites S^2/C^2 (où S est la surface des diodes) donne la valeur V_S de la courbure des bandes; ϕ_{Bn} se calcule alors par la relation :

$$\phi_{Bn} = V_S + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_C}{N_D - N_A}\right) \quad (6)$$

où N_C est le nombre d'états dans la bande de conduction. Pour des doses implantées de 10^{12} , $5 \cdot 10^{12}$ et 10^{13} ions Ga^+/cm^2 les valeurs de ϕ_{Bn} trouvées sont respectivement égales à 0,91, 0,96 et $0,99 \pm 0,02$ eV. Une dose de $2,5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^2$ provoque la formation d'une jonction P-N.

On peut noter que la capacité des diodes varie avec la fréquence du signal de mesure délivré par le capacimètre, ce qui indique la présence de niveaux d'énergie profonds situés dans la bande interdite et produits lors du bombardement. Une étude plus détaillée des conditions du recuit devrait permettre d'éliminer ces derniers. On peut également envisager l'implantation d'ions plus légers (bore) qui créent moins de dommages. Toutefois, afin

BIBLIOGRAPHIE

1. J. LINDMAYER et J. ALLISON, 3 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Silver Springs (1972) p. 83.
2. D. AMINGUAL, P. COLARDELLE et T. NGUYEN DUY, Int. Conf. on Photovoltaic Power Generation, Hambourg 197. p. 85 ;
E.L. RALPH, J. SCOTT-MONCK, Int. Conf. on Photovoltaic Power Generation, Hambourg 1974 p. 1Q3.
3. E. AHLSTROM, Journal of Appl. Phys., 33 (1962) 2602.
4. W-A. ANDERSON, A.E. DELAHOY et R.A. MILANO, Journal of Appl. Phys., 45 (1974) 3913.
5. D.L. PULFREY et R.F. Mc OUAT, Appl. Phys. Lett., 24 (1974) 167.
6. J.J. LOPERSKI, Journal of Appl. Phys., 27 (1955) 777.
7. C.Y. CHANG, S.M. SZE, Solid State Electr., 13 (1970) 727.
8. A.N. SAXENA, J.J. GROB, M. HAGE-ALI, P. SIFFERT, Metal Semiconductor Contacts Conf. Series n° 22, the Institute of Physics London (1974).
9. J.M. SHANNON, Appl. Phys. Lett., 25 (1974) 75.

LEGENDE DES FIGURES

- Fig. 1 Evolution du rendement de conversion des cellules solaires du type diode Schottky en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel, à différentes températures.
- Fig. 2 Détermination, par mesure de la capacité inverse, de la courbure des bandes ψ_s de diodes Schottky à l'or préombardées par des ions gallium.

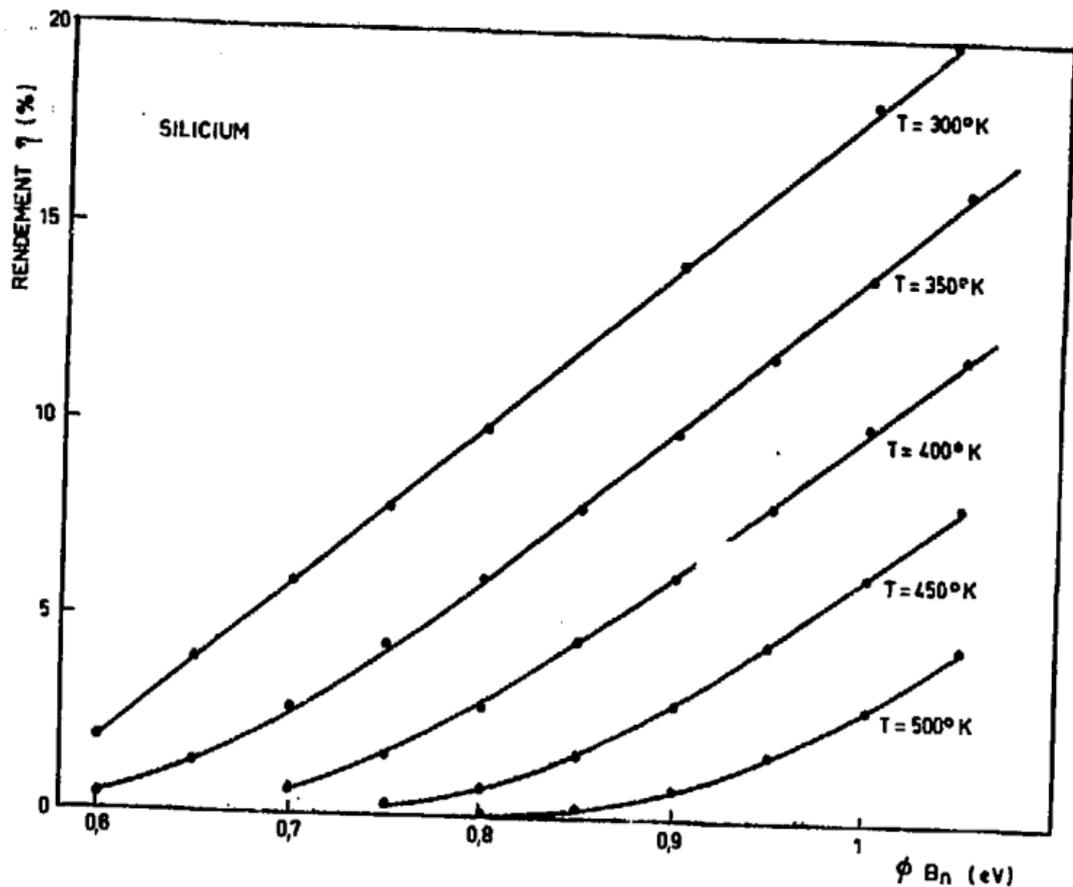


Fig.1

