

MODELISATION DE L'EFFET DE LA PASSIVATION ARRIERE ET FRONTALE POUR L'OPTIMISATION DU RENDEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE À BASE DE SILICIUM POLYCRISTALLIN

Reçu le 06/07/2009 – Accepté le 15/05/2012

Résumé

Dans ce travail, nous proposons une modélisation d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin sous l'effet de la couche arrière de passivation. Une comparaison de différentes couches de passivation arrière, notamment la couche épaisse d'oxyde thermique et la couche d'aluminium diffusée utilisé comme contact électrique sera faite. L'aluminium peut être évaporé directement sur la couche arrière de la cellule ou évaporé sur une couche de silicium fortement dopée, créant un champ électrique sur l'arrière de la cellule (structure BSF). Les couches de passivation arrière peuvent refléter des photons à l'intérieur de la cellule. Ainsi, ils prolongent leur trajet, facilitant leur absorption, tout en diminuant la vitesse de recombinaison en surface des porteurs minoritaires dans la région de base. La réflectivité interne devrait être aussi élevée que possible permettant un bon piégeage des photons. Parmi les différentes couches de passivation arrière étudiées, la structure oxyde de silicium / nitrure de silicium / oxyde de silicium obtenu par PECVD est avérée optimum. La taille de grain du polysilicium joue un rôle dominant dans la détermination des propriétés électriques et photovoltaïques du silicium. Les joints de grain agissent en tant que pièges et centres de recombinaison. Si la taille de grain est petite, les porteurs rencontrent un plus grand nombre de joints de grains. Sachant que le joint de grains se comporte souvent comme piège pour les électrons, la résistance augmente, ce qui conduit à un léger échauffement de la cellule solaire. Dans ce travail, nous avons également proposé une passivation frontale de l'émetteur par une couche de nitrure de silicium. Nous avons ainsi noté une amélioration très nette, du rendement de conversion pour des rapports de gaz élevés. Enfin, les résultats montrent que la structure de la cellule $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{P}^+ \text{N} / \text{oxyde} / \text{SiN}_x / \text{oxyde}$ est la plus performante.

Mots clés : *Silicium polycristallin, passivation arrière, taille de grain, nitrure de silicium. Rendement de conversion.*

Abstract

In the present paper we propose a simple modelling of rear passivation effect on the performance of the polycrystalline solar cell. We investigate three different rear surface passivation technologies. The thin silicon oxide/silicon nitride/silicon oxide obtained by PECVD was the subject of multiple researchs, for its quality of rear passivation. The rear passivation layers can reflect photons to the interior of the cell, thus, prolonging their trajet and making easy their absorption while decreasing the surface recombination velocities of minority carriers at the base area. The internal reflectivity should be as high as possible to enable a good trapping of photons. These photons are absorbed in the intrinsic layer. The grain size of polysilicon plays a dominant role in determining the electrical and photovoltaic properties of silicon. Grain boundaries act as traps and recombination centers. If the grain size is small the electrons will encounter a larger number of grain boundaries. The grain boundary behaves as trap for the electrons, there is an increase in the resistance which produces a slight warming of the cell. Finally, front passivation by the silicon nitride of polycrystalline solar cell has been beneficial. Thus we noted a very clear improvement of the efficiency for high gas flow ratio. The optimum efficiency is obtained using thin oxide /silicon nitride/silicon oxide PECVD as rear passivation system, at the conclusion of this study, we show that $\text{Si}_3\text{N}_4 / \text{P}^+ \text{N} / \text{thin oxide} / \text{SiN}_x / \text{SiO}_x$ PECVD rear passivation structure is the most performant one.

Keywords : *Polycrystalline silicon, rear passivation, grain size, front passivation, silicon nitride, conversion efficiency*

**N. BENLOUCIF
F. MANSOUR**

Laboratoire LEMEAMED
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri
Constantine – Algérie

ملخص

في هذه العمل نقترح وضع نموذج بسيط لخلية ضوئية من سلسيوم متعدد البلورات تحت تأثير حماية خلفية. من بين مختلف الطبقات للحماية الخلفية رقيقة أكسيد السيليكون / نتريد السيليكون / أكسيد السيليكون التي حصلت عليها تقنية PECVD كانت موضوع بحث متعددة حول الحماية الخلفية. الطبقة الخلفية تعكس الفوتونات إلى داخل الخلية وتمددها رها، مما يسهل عملية الامتصاص مع تقليل من سرعة العودة إلى السطح. الانعكاس الداخلي ينبغي ان يكون اعلى مستوى ممكن لتمكين جيد لاستيعاب الفوتونات. من بين نماذج الحماية الخلفية $\text{SiO}_x / \text{SiN}_x / \text{SiO}_x$ المتحصل عليها PECVD هي المختارة. ان سمك الحبيبات يلعب دور مهم في تبين الخصائص الكهربائية و الضوئية للسلسيوم. ان رباط الحبيبات تتفاعل ككفاح ومراكز للتجمع. اذا كانت سمك الحبيبات صغير الحوامل تلتقي عدد كبير من رباط الحبيبات. مع العلم ان رباط الحبيبات تتصرف كمصيدة إلكترونات، المقاومة ترتفع هذا يؤدي إلى تسخين خفيف للخلية الضوئية. في هذا العمل نقترح أيضا الحماية العلوية للخلية برقيقة نتريد السيليكون. أين لاحظنا ارتفاع واضح في الفعالية من أجل نسبة عالية من الغاز. في الختام هذه الدراسة نبرهن ان التركيبة $\text{P}^+ \text{N} / \text{Si}_3\text{N}_4 / \text{SiO}_x / \text{SiN}_x / \text{SiO}_x$ المتحصل عليها PECVD هي أكثر فعالية.

الكلمات المفتاحية : *سلسيوم متعدد البلورات، حماية الخلفية، سمك الحبيبات، نتريد السيليكون، الفعالية.*

Les performances des cellules solaires à couches minces sont nettement améliorées depuis quelques années. Le silicium polycristallin est un matériau de plus en plus impliqué dans leur fabrication car il présente l'avantage d'un coût de revient relativement bas, en plus d'une grande facilité de dépôt en couches minces. Les nouvelles structures technologiques des cellules solaires telles que la cellule à champ arrière, la cellule passivée, la cellule à couches antireflets ou à surface avant texturée permettent d'obtenir un rendement élevé. La passivation des défauts en surface et en volume reste critique pour améliorer le rendement des cellules solaires au silicium polycristallin. Il est essentiel que la passivation empêche les pertes des porteurs par recombinaison aux surfaces externes et internes. Il existe plusieurs techniques telles que la passivation des liaisons pendantes à la surface par la croissance d'un oxyde thermique. Cependant la réalisation de nos structures nécessite un passivant avec de bonnes propriétés électriques d'interface, une bonne uniformité et une faible densité de pièges.

L'un des processus généralement utilisés dans ce domaine est le dépôt de nitrure de silicium en phase vapeur à basse pression (LPCVD), à partir d'un mélange de dichlorosilane, (SiH_2Cl_2) et d'ammoniaque (NH_3) aux températures entre 700°C et 900°C . L'utilisation de basses pressions (1 Torr) a généralement comme conséquence une excellente uniformité d'épaisseur de film [1]. Le nitrure de silicium est employé comme couche de passivation du silicium, utilisant un excès d'ammoniaque. La surface arrière de la cellule contribue de façon importante à l'efficacité du dispositif du fait que les exigences en termes de réflexion de la lumière et de passivation de surface augmentent lorsque l'épaisseur diminue.

Les couches arrière de passivation permettent de réfléchir les photons vers l'intérieur de la cellule, prolongeant ainsi leur trajet dans le matériau, ce qui favorise leur absorption, tout en diminuant la vitesse de recombinaison en surface de la base. La réflectivité interne devrait être la plus élevée pour permettre un bon piégeage des photons. Les couches d'oxyde thermique d'épaisseur environ 100 nm sont généralement employées pour la réalisation de la cellule solaire de polysilicium à forte efficacité. C'est un élément important de la cellule dont le rôle est d'améliorer la qualité optique (réflexion interne) et électrique (passivation extérieure) [2]. Les paramètres électriques essentiels du polysilicium tels que la mobilité des porteurs et leur durée de vie, jouent un rôle important dans l'estimation des photocourants [3]. Les couches minces de silicium polycristallin ont été élaborées par LPCVD à partir de dissilane Si_2H_6 , cette filière gazeuse a l'avantage de fournir des vitesses de dépôt très élevées.

Enfin, dans ce travail, où nous considérons une cellule de type PIN, nous nous intéressons aux deux couches de passivations, arrière et frontale. Pour cela, nous allons étudier différentes structures utilisées pour la passivation arrière de la cellule solaire, à savoir, un oxyde thermique, une couche d'aluminium diffusée et une couche empilée

oxyde mince/ nitrure de silicium /oxyde de silicium PECVD. Nous allons également nous intéresser à la passivation frontale de la cellule en comparant l'effet du nitrure de silicium et celui d'une couche mince d'oxyde thermique.

1. MODELE THEORIQUE

L'étude théorique que nous développons est basée d'abord sur la formulation du coefficient d'absorption. Ses valeurs peuvent être trouvées dans la littérature [4, 5]. En particulier, nous avons adopté les données de Cody [4], où le coefficient d'absorption est donné par :

$$\alpha(\lambda) = \begin{cases} \alpha_{\text{runc}}(\lambda) = \frac{\beta^2}{E} (E - E_g)^2 \text{ pour } E_0 \leq E \leq E_{\text{max}}; \lambda_{\text{min}} \leq \lambda \leq \lambda_c \\ \alpha_{\text{urbach}}(\lambda) = \alpha_0 e^{\frac{E-E_0}{E_0}} \text{ pour } E_{\text{min}} \leq E \leq E_0; \lambda_c \leq \lambda \leq \lambda_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

Le taux de génération des paires électron-trou à une distance x de la surface éclairée de la cellule est donné par :

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - r(\lambda)) e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2)$$

Où l'indice de réflexion $r(\lambda)$ est l'indice de réflexion de la structure pn avec passivation frontale.

Le taux de génération prenant en compte l'effet de la

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - r(\lambda)) e^{-\alpha x} + \alpha(\lambda) F(\lambda) (1 - r(\lambda)) e^{-\alpha H} r_r e^{\alpha(H-x)} \quad (3)$$

couche arrière de passivation est donné par :

$$G(\lambda, x) = F(\lambda) \alpha(\lambda) (1 - r(\lambda)) e^{-\alpha x} (1 + r_r(\lambda)) \quad (4)$$

Avec $r_r(\lambda)$ la réflectivité interne de la couche arrière de passivation

Sachant que la détermination de la répartition du champ électrique dans les trois régions P, I, N est basée sur la résolution de l'équation de Poisson :

$$\overrightarrow{\text{div}}(\mathbf{E}) = \frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (5)$$

On obtient donc :

$$E(x) = \begin{cases} E_1(x) = \frac{-qn_i}{\epsilon} (x - x_{in}) ; x_{in} \leq 0 \leq x \leq x_p \\ E_2(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon} (x - x_p) - \frac{qp_i}{\epsilon} (x - x_{in}) ; x_p \leq x \leq W_p \\ E_3(x) = \frac{-qn_i}{\epsilon} (x_{ip} - x_{in}) = \text{constante} ; W_p \leq x \leq W_2 \\ E_4(x) = \frac{qn_i}{\epsilon} (x - x_{ip}) + \frac{qN_d}{\epsilon} (x - x_N) ; W_2 \leq x \leq x_N \\ E_5(x) = \frac{qn_i}{\epsilon} (x - x_{ip}) ; x_N \leq x \leq H \leq x_{ip} \end{cases} \quad (6)$$

Avec : $W_2 = W_p + W_I$ et $H = W_p + W_I + W_N$,
l'épaisseur totale de la cellule.

Les densités de courants dans les régions P, I, N s'écrivent respectivement :

$$J_p(\lambda) = J_p(x, \lambda) \Big|_{x=x_p} = qn\mu_n E_1(x) + qD_n \frac{dn}{dx} \Big|_{x=x_p} \quad (7)$$

$$J_{ip}(\lambda) = J_{ip}(x, \lambda) \Big|_{x=W_p} = qp\mu_p E_3(x) - qD_p \frac{dp}{dx} \Big|_{x=W_p} \quad (8-1)$$

$$J_{in}(\lambda) = J_{in}(x, \lambda) \Big|_{x=W_2} = qn\mu_n E_3(x) + qD_n \frac{dn}{dx} \Big|_{x=W_2} \quad (8-2)$$

$$J_N(\lambda) = J_N(x, \lambda) \Big|_{x=x_N} = qp\mu_p E_5(x) - qD_p \frac{dp}{dx} \Big|_{x=x_N} \quad (9)$$

Afin de calculer la densité de courant dans les régions extrinsèques (P, N), nous utilisons l'équation de continuité de la région N :

$$\frac{dp}{dt} = G_p - U_p - p\mu_p \frac{dE_N}{dx} - \mu_p E_N \frac{dp}{dx} + D_p \frac{d^2 p}{dx^2} \quad (10)$$

En régime permanent, on obtient une équation différentielle du deuxième ordre avec second membre avec des coefficients qui dépendent de x.

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - p_1(x) \frac{dp}{dx} - q_1 p = f_1(x)$$

La première condition aux limites est la continuité de la densité de courant à la surface en $x = H$, caractérisé par la vitesse de recombinaison en surface, S_p [4] :

$$S_p \Delta p = -D_p \frac{dp}{dx} \Big|_{x=H} \quad (11)$$

H est l'épaisseur totale de la cellule.

La deuxième condition est la continuité de la densité des porteurs minoritaires. Elle est donnée à $x = x_N$, par :

$$p = p_0 = \frac{n_i^2}{N_d} \Big|_{x=x_N} \quad (12)$$

Où x_N l'abscisse qui délimite la région N.

Dans cette région la densité de courant, $J_N(\lambda)$ est donnée par :

$$J_N(\lambda) = J_N(x, \lambda) \Big|_{x=x_N} = qp\mu_p E_5(x) - qD_p \frac{dp}{dx} \Big|_{x=x_N} \quad (13)$$

2. RESOLUTION NUMERIQUE

Nous allons résoudre par une méthode numérique appropriée, l'équation différentielle d'ordre 2 à coefficients variables, donnée par la formulation suivante [6, 7] :

$$\begin{cases} y''(x) - P_1(x) y'(x) - Q_1 y(x) = f_1(x) \\ y(a) = \alpha, y(b) = \beta \end{cases} \quad (14)$$

$$\forall x \in [a, b]:$$

Pour cette résolution, on découpe $[a, b]$ en (N+1) intervalles de longueur, h, tel que:

$$h = \frac{b-a}{N+1} \text{ et } x_i = a + ih ; i = 0, \dots, (N+1)$$

La formule de Taylor donne:

$$y'_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h}$$

et

$$y''_i = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2}$$

tel que

$$y(x_i) = y_i, y(x_i + h) = y_{i+1} \text{ et } y(x_i - h) = y_{i-1}$$

on cherche alors :

$$y_0, y_1, \dots, y_N, y_{N+1}$$

qui représente la solution y(x) de l'équation (14) aux points $i = 0$, à $N+1$ qui s'écrit sous forme d'une matrice tridiagonale :

$$A = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{N-1} & b_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_N & b_N \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N-1} \\ y_N \end{bmatrix} \text{ et } K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_{N-1} \\ K_N \end{bmatrix} \quad (15)$$

Dans notre étude, la concentration des porteurs minoritaires $p(x)$ de la région N est équivalente à $y(x)$. L'intervalle $[a, b]$ de la formule de Taylor est représenté par $[x_N, H]$.

On obtient un système d'équations linéaires à matrice tridiagonale : $AY=K$, tel que :

$$\begin{aligned} a_i &= 2 + hp_1(x_i); \quad i = 2, \dots, N; \\ b_i &= -(4 + 2h^2q_1) = \text{Constante}; \quad i = 1, \dots, N; \\ c_i &= 2 - hp_1(x_i); \quad i = 1, \dots, (N-1); \end{aligned}$$

L'algorithme de résolution d'un système tridiagonal est une adaptation de la méthode de Gauss [6].

La résolution se fait en écrivant la première équation du système matriciel sous la forme suivante :

$$y_1 + w_1 y_2 = Z_1$$

On a donc posé :

$$w_1 = \frac{c_1}{b_1}; Z_1 = \frac{K_1}{b_1}$$

En utilisant l'algorithme de Thomas [6] l'équation matricielle s'écrit comme suit :

$$(b_N - a_N w_{N-1}) y_N = K_N - a_N Z_{N-1} \Rightarrow y_N = \frac{K_N - a_N Z_{N-1}}{b_N - a_N w_{N-1}}$$

La discrétisation de la première condition à la limite donne:

$$p(H) = p_{N+1} = \frac{1}{1 + \frac{hS_p}{D_p}} p_N + \frac{n_i^2}{N_d \left(1 + \frac{D_p}{hS_p}\right)} = \beta \quad (16)$$

En prenant :

$$\alpha = p_0 = \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$\Delta p(x)_{x=H} = p_{N+1} - \frac{n_i^2}{N_d} \text{ et } \frac{dp(x)}{dx} \Big|_{x=H} = \frac{p_{N+1} - p_N}{h} \quad (17)$$

Ce qui conduit au changement de b_N et K_N qui deviennent :

$$b_N = -(4 + 2h^2q_1) + \frac{2 - hp_1(x_N)}{1 + \frac{hS_p}{D_p}}$$

et

$$K_n = 2 h^2 f_1(x_n) - \frac{[2 - hp_1(x_N)] n_i^2}{N_d \left(1 + \frac{D_p}{hS_p}\right)}$$

Après utilisation de l'algorithme de Thomas pour trouver la solution $y = (p_i)$ pour $i = 1$ à N et en utilisant la formulation :

$$\frac{dp(x)}{dx} \Big|_{x=x_N} = \frac{p(x_1) - p(x_0)}{h} = \frac{p_1 - \frac{n_i^2}{N_d}}{h}$$

on aboutit finalement à l'expression de la densité de courant, $J_N(\lambda)$:

$$J_N(\lambda) = q \mu_p \frac{n_i^2}{N_d} \left[\frac{qn_i}{\xi} (x_N - x_{ip}) \right] - qD_p \left[\frac{p_1 - \frac{n_i^2}{N_d}}{h} \right] \quad (18)$$

La caractéristique de sortie J-V (courant - tension) réelle est donnée par :

$$J = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{V + R_s J}{QU_i}} - 1 \right) - \frac{V + R_s J}{R_{sh}} \quad (19)$$

Où R_s est la résistance de perte ohmique dans la surface frontale et R_{sh} la résistance de courant de fuite.

Si la cellule est en court-circuit c'est à dire $V = 0$ et $J = J_{sc}$ on obtient le courant de court-circuit selon l'expression suivante :

$$J_{sc} = J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{R_s J_{sc}}{QU_i}} - 1 \right) - \frac{R_s J_{sc}}{R_{sh}} \quad (20)$$

Où J_s est la densité de courant de saturation et J_{ph} est le photocourant total. Cette équation est une équation non linéaire qui peut être résolue numériquement.

Si la cellule est en circuit ouvert, $V = V_{co}$ et $J = 0$, l'équation devient :

$$J_{ph} - J_s \left(e^{\frac{V_{co}}{QU_i}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (21)$$

Par conséquent, on peut déduire la puissance maximale quand le produit (J.V) est maximum:

$$P_m = (JV)_{\max}$$

Le facteur de forme et le rendement de conversion, sont donnés par:

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} V_{co}}, \quad \eta = \frac{P_m}{P_i},$$

Où P_i est la puissance incidente.

3. RESULTATS DE LA SIMULATION

Après avoir proposé différentes équations qui décrivent le comportement de la structure empilée de cellule solaire nitrure de silicium/PIN/oxyde mince/ nitrure de silicium / PECVD oxyde de silicium (figure 1), nous présentons dans ce qui suit l'étude qui permet l'évaluation des caractéristiques physiques et géométriques de cette cellule.

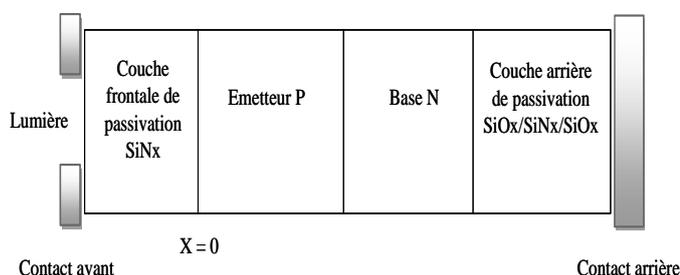


Figure 1 : Schéma d'une structure empilée de cellule solaire

3.1. Effet de la passivation arrière sur le rendement de conversion

Le silicium polycristallin est caractérisé par un gap optique compris entre 1.6 et 2 eV. Dans le cas réel, la cellule solaire à base de polysilicium sans couche de passivation frontale, est caractérisée une résistance série $R_s=8.5 \Omega$, une résistance shunt $R_{sh}=116 \Omega$, pour une concentration des atomes accepteurs et donneurs $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ respectivement [8]. Le silicium polycristallin est caractérisé par un gap optique compris entre 1.6 et 2 eV. Pour la structure PIN que nous proposons, nous avons choisi une géométrie de $W_p=0.01 \mu\text{m}$, $W_i=0.5 \mu\text{m}$, $W_n=0.1 \mu\text{m}$. Nous avons étudié comparativement l'effet de différentes couches de passivation, à savoir un oxyde thermique épais, une couche diffusée d'aluminium, et une structure empilée oxyde/nitrure de silicium/oxyde.

Les résultats donnant l'évolution du rendement de conversion en fonction du gap optique dans la gamme 1.6 à 2 eV, montrent une très nette amélioration du rendement, lorsque le gap optique augmente.

La valeur 1.8 eV du gap est un bon compromis comme l'indique la figure 2, où le rendement de conversion ne dépasse pas 9.55 % sans passivation arrière. Dans le but d'assurer un meilleur rendement pour notre cellule sous l'effet de la passivation arrière, la région base de notre cellule est faiblement dopée ($N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Ce choix est confirmé par la littérature [3].

La réflectivité interne est un facteur très important dans la simulation de la cellule solaire avec passivation arrière, le rendement de conversion croît avec l'augmentation de cette dernière [2].

De plus, la passivation arrière fait diminuer la vitesse de recombinaison en surface. Elle est spécifique à chaque système de passivation. Les photons ayant de grandes longueurs d'onde arrivent au niveau de la couche arrière de passivation puis ils sont réfléchis vers l'intérieur de la cellule prolongeant ainsi leur trajet. Ces photons sont par conséquent absorbés dans la couche intrinsèque.

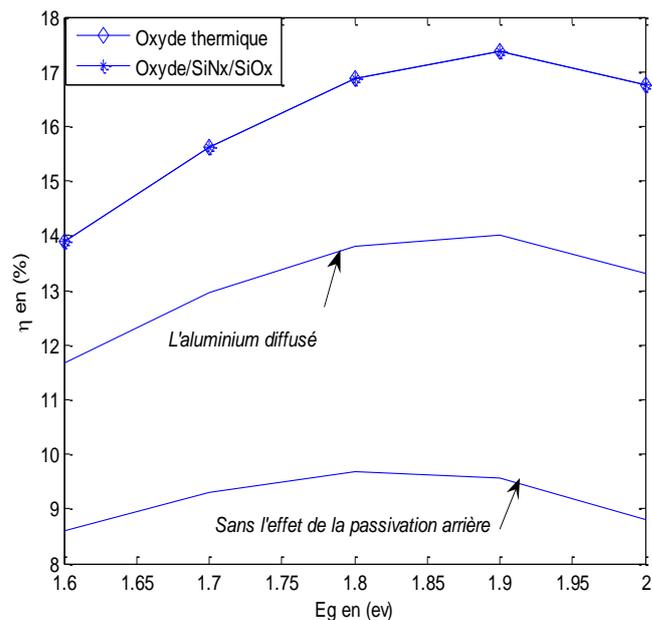


Figure 2 : Variation du rendement de conversion avec différentes couches de passivation arrière

Le rendement de conversion atteint environ 17.37 % aussi bien avec la couche épaisse d'oxyde thermique comme système de passivation arrière, qu'avec l'utilisation de la structure oxyde mince/ nitrure de silicium /oxyde de silicium obtenu par PECVD.

Nous constatons que ces deux matériaux de passivation arrière donnent les mêmes valeurs du rendement car nous avons utilisé dans nos simulations des valeurs similaires de la réflectivité interne et de la vitesse de recombinaison en surface.

En effet, nous avons pris en compte $r = 90\%$, $S_p=200 \text{ cm/s}$ pour l'oxyde épais et $r=90\%$, $S_p=300 \text{ cm/s}$ pour la structure empilée oxyde/nitrure de silicium/oxyde [2]. Le rendement de conversion a été évalué seulement à 14.01% en utilisant une couche à base d'aluminium diffusé avec $r = 50\%$, $S_p=1800 \text{ cm/s}$.

Ces résultats prouvent que la réflectivité interne devrait être aussi haute que possible, et ceci en corrélation avec de bonnes propriétés de passivation afin d'obtenir un rendement élevé.

L'effet de la couche arrière de passivation est donc observé sur la figure 3 qui représente la variation de la caractéristique J-V avec et sans couche de passivation arrière, pour l'énergie de gap optimum issue des résultats précédents.

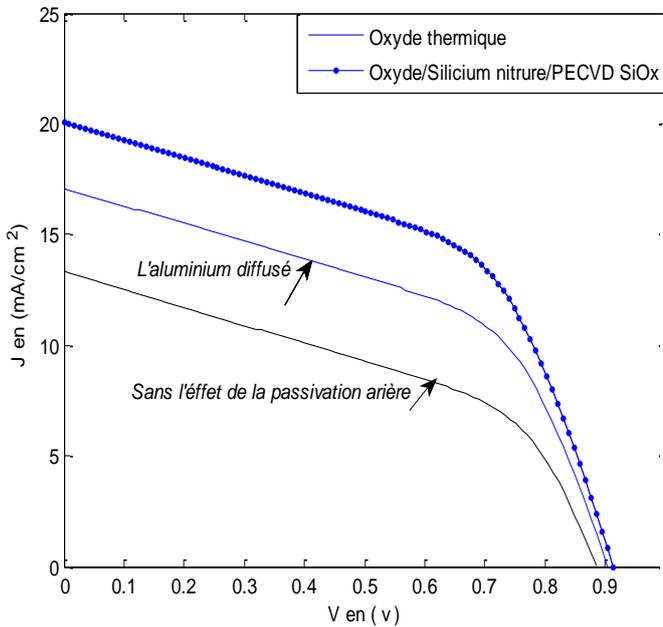


Figure 3 : Variation de la caractéristique J-V réelle sans et avec passivation arrière

Par le biais de la simulation, nous avons obtenu les différentes caractéristiques de sortie de la cellule. Sur le tableau 1, nous avons reporté les valeurs du courant de court circuit, il atteint sa plus grande valeur pour une passivation arrière en couche épaisse d'oxyde thermique, ceci est en accord avec la littérature [2]. La tension en circuit ouvert dépend du gap du matériau, elle constitue une limitation du rendement de la cellule. Sa valeur est de 0,91V.

Tableau 1 : Valeurs des caractéristiques de sortie de la cellule avec passivation arrière

Couches minces de passivation arrière (80nm) [2]	Jsc mA/cm ²	Vco V	FF %	η %
L'oxyde thermique (100 nm)	20.19	0.91	51.75	17.37
L'oxyde mince/ SiN _x / PECVD -SiO _x	20.19	0.81	51.75	17.37
L'aluminium diffusé	17.02	0.90	49.60	14.01

Le facteur de forme traduit la qualité de la cellule. Ce dernier augmente avec l'augmentation des performances de la couche de passivation arrière. En utilisant la couche de passivation arrière optimale "Oxyde mince/Nitrure de silicium / Oxyde de silicium PECVD" le facteur de forme est estimé à 51,75%, et il atteint seulement 49,60% pour une passivation arrière par une couche d'aluminium diffusée.

3.2. Influence de la taille des grains de la région base dans l'optimisation du rendement

Afin d'optimiser le dopage de la région base, nous avons tracé la variation du rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de cette région W_n , pour différentes valeurs du dopage. Le résultat est montré dans la figure 4, où nous avons constaté que le rendement de conversion croît avec l'augmentation du dopage, jusqu'à atteindre la concentration maximale de dopage 10^{16} cm^{-3} . Par contre pour $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, il apparaît une très nette diminution du rendement.

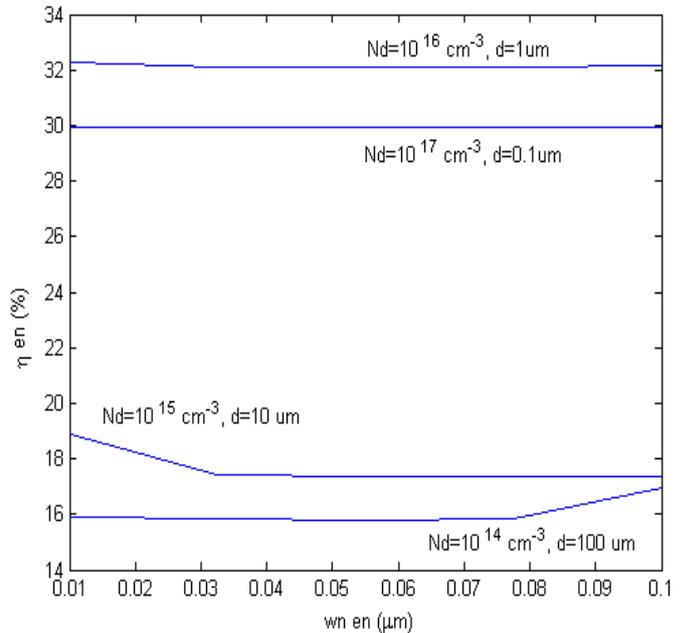


Figure 4 : Effet de la taille des grains de la région base sur le rendement

Nous pouvons estimer que la faible concentration de 10^{15} cm^{-3} donne un rendement optimum, et ceci pour une faible épaisseur $W_n = 0,01 \mu\text{m}$. On préfère donc que le dopage de la base soit faible. Pour une faible concentration de 10^{14} cm^{-3} , lorsque l'épaisseur atteint $0,1 \mu\text{m}$, le rendement est supérieur à 16,92%. La figure 4 montre clairement que $0,1 \mu\text{m}$ est l'épaisseur optimale de la région base. Notre choix porte donc sur une épaisseur large de la région base.

Dans le cas du polysilicium, le dopage de la région base devrait être aussi faible que possible parce que la zone de charge d'espace s'étale vers l'émetteur qui est fortement dopé.

Le grain peut être défini par sa taille et par sa qualité cristalline. La relation entre le dopage et la taille des grains est donnée par $N_d = 10^{12} / d$ [3] dans une couche mince de polysilicium type N. Dans notre étude, une faible concentration du dopage de la base ($N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) et une taille de grains élevée ($d = 10 \mu\text{m}$), nous ont donné un rendement optimum. Ce résultat est confirmé par la littérature [3]. La taille des grains joue un rôle prépondérant dans la détermination des propriétés du polysilicium.

Si la taille des grains est petite les porteurs rencontrent un plus grand nombre de joints de grain. Sachant que le joint de grain se comporte souvent comme piège pour les électrons, ceci a pour effet d'augmenter la résistance du joint. On observe donc un léger échauffement de la cellule solaire. Nous pouvons conclure qu'à l'issue de notre simulation, les paramètres optimaux (dopage de base 10^{15}cm^{-3} , épaisseur de base $0.1 \mu\text{m}$) donnent un rendement de 17.37% sans couche de passivation frontale.

3.3. Effet de la passivation frontale nitrure de silicium dans l'amélioration du rendement de conversion

Après avoir optimisé l'épaisseur et le dopage de la région base, donnant un rendement estimé à 17.37% sans couche de passivation frontale, nous étudions à présent l'effet comparatif de la passivation par une couche mince de SiO_2 (100 nm) et par une couche de nitrure de silicium obtenue avec différents débits gazeux. Pour notre simulation, nous prenons les valeurs de la vitesse de recombinaison en surface issues de la littérature qui sont de l'ordre de 10 cm/s pour le SiO_2 [9] et de 20 cm/s pour le Si_3N_4 [10], respectivement. Le rendement obtenu atteint 21.46%. La passivation par dépôt d'une couche de nitrure de silicium de (Si_3N_4) sur la couche avant de la cellule, permet de réduire le coefficient de réflexion de la structure ainsi que la vitesse de recombinaison en surface de la couche frontale. Connaissant l'influence du rapport des débits gazeux $R = \Phi(\text{SiH}_2\text{Cl}_2) / \Phi(\text{NH}_3)$, sur l'indice de réfraction mesuré par ellipsométrie [1], par conséquent nous déduisons son effet sur l'indice de réflexion de la structure. Pour un faible rapport des débits $R=1$, le rendement de conversion est estimé à 24.03%. Ce dernier croît avec l'augmentation du rapport des débits jusqu'à atteindre 24.85% pour une valeur de $R=10$.

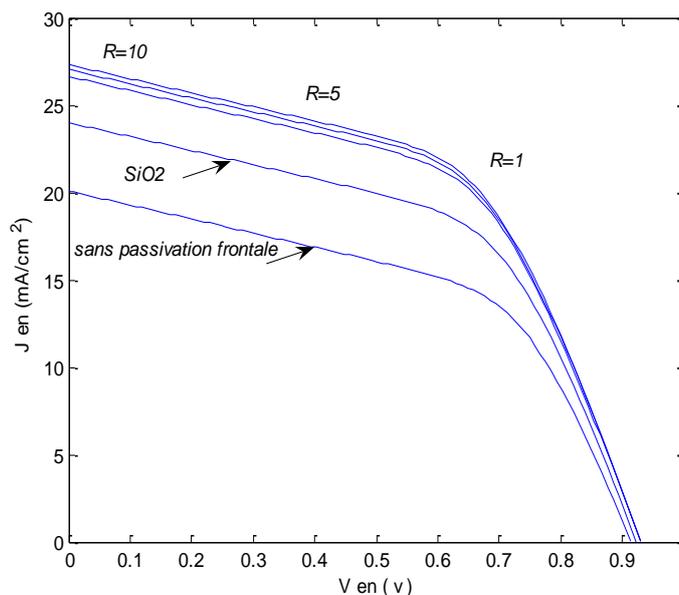


Figure 5 : Caractéristique J-V en fonction du rapport des débits de gaz de la couche de passivation frontale nitrure de silicium

Nous avons constaté donc une très nette amélioration du rendement pour des rapports R élevés. Ceci est en bon accord avec la littérature [11]. Cette étude nous est utile pour déterminer les différentes caractéristiques de sortie de la cellule réelle en fonction du rapport des débits gazeux de la couche de nitrure. La variation de la caractéristique courant-tension en fonction du rapport des débits gazeux est montrée sur la figure 5.

A partir de cette caractéristique, nous pouvons déduire le courant de court circuit et la tension en circuit ouvert que débite la cellule. Les différentes caractéristiques de sortie de cette étude sont regroupées dans le tableau 2, où nous constatons que le courant de court-circuit suit la variation du rendement en fonction du débit gazeux. L'utilisation du nitrure de silicium comme couche de passivation frontale s'est avérée bénéfique, ce résultat est validé par la référence [12].

Tableau 2 : Caractéristiques de sortie de la cellule en fonction du rapport des débits gazeux R de la couche de passivation frontale nitrure de silicium

Couches minces de passivation frontale (100 nm) [11]	J_{sc} mA/cm^2	V_{co} V	FF %	η %
SiO_2	24.20	0.92	52.94	21.46
Si_3N_4 ($R=1$)	26.40	0.92	53.07	24.03
Si_3N_4 ($R=5$)	26.80	0.92	53.05	24.39
Si_3N_4 ($R=10$)	27.25	0.93	53.03	24.85

3.4. Optimisation du dopage de l'émetteur passive

Dans ce travail, nous nous intéressons également aux caractéristiques de l'émetteur passivé avec le nitrure de silicium ayant un haut rapport de débits gazeux ($R=10$), vu que ce dernier permet d'obtenir le rendement le plus élevé. Nous avons présenté la caractéristique de sortie en fonction du dopage de l'émetteur.

La figure 6 montre clairement que le rendement de conversion de la cellule passivée est très sensible à la variation du dopage de l'émetteur. Il augmente considérablement pour un dopage élevé et atteint son maximum pour des épaisseurs très minces ($W_p = 0.01 \mu\text{m}$).

Ce qui est en bon accord avec la littérature [13,14]. Ceci est nettement observé sur les figures 7, 8 et 9, où nous avons constaté une importante dégradation du rendement pour des épaisseurs supérieures à $0.03 \mu\text{m}$.

Après avoir optimisé l'épaisseur de l'émetteur passivé à $0.01 \mu\text{m}$, pour un dopage élevé, de l'ordre de 10^{18}cm^{-3} , nous avons obtenu un rendement de conversion estimé à 24.85%. Le rendement croît jusqu'à atteindre 28.20% pour une valeur très élevée du dopage.

Dans notre étude, nous avons optimisé le dopage de l'émetteur passivé à 5.10^{19}cm^{-3} .

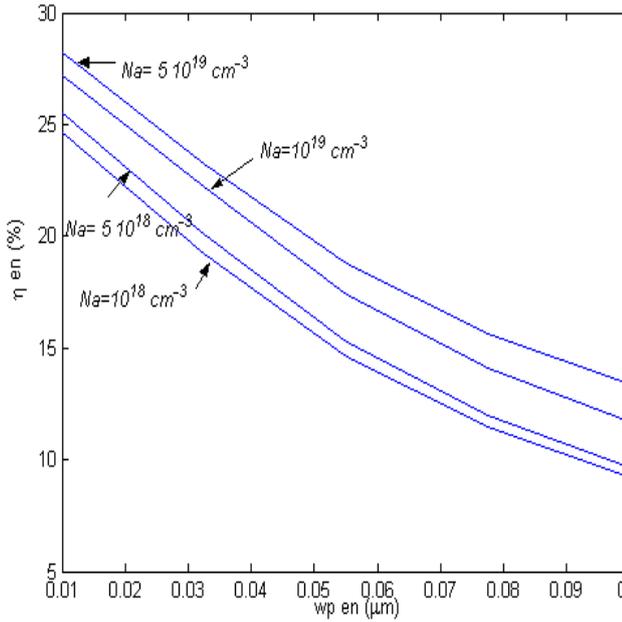


Figure 6 : Variation du rendement de conversion en fonction du dopage de l'émetteur passivé et de son épaisseur

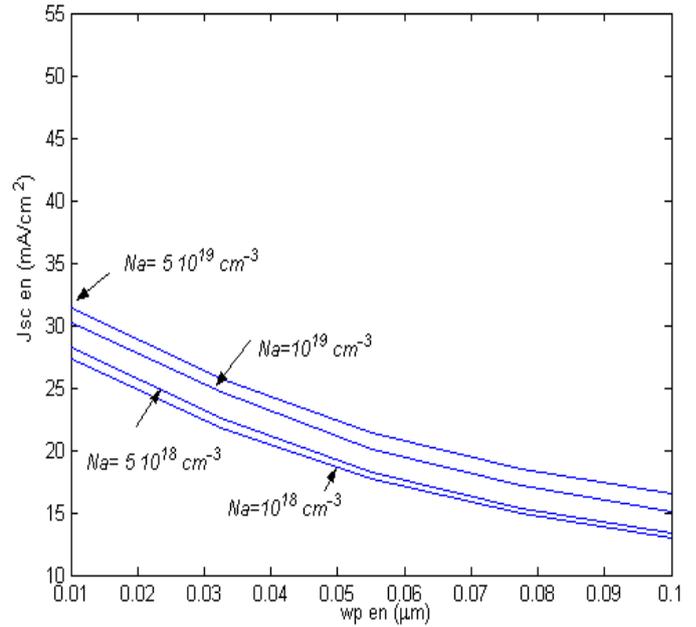


Figure 8 : Variation du courant de court circuit en fonction du dopage de l'émetteur passivé

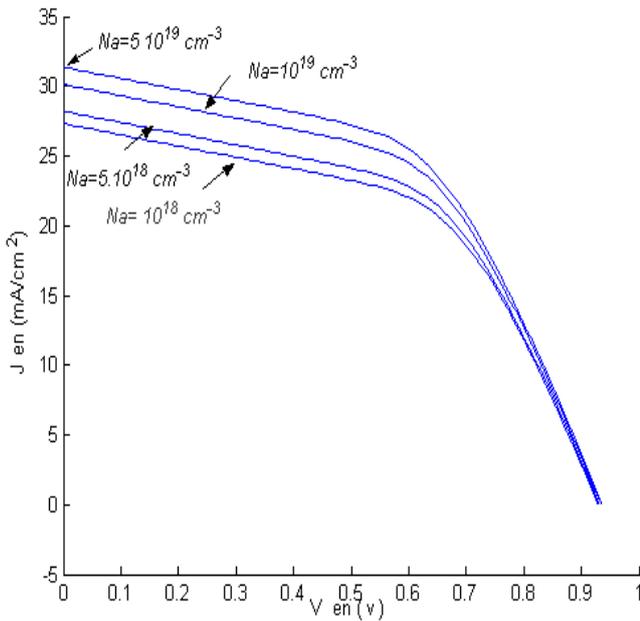


Figure 7 : Variation de la caractéristique J-V en fonction du dopage de l'émetteur pour une épaisseur optimale $W_p = 0.01 \mu m$

En observant la figure 8, on constate que le courant de court circuit suit la même évolution que le rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

Ce dernier atteint son maximum pour une faible épaisseur de l'émetteur, de l'ordre de $0.01 \mu m$. Nous avons noté une diminution très rapide du courant de court circuit, à partir de $0.03 \mu m$.

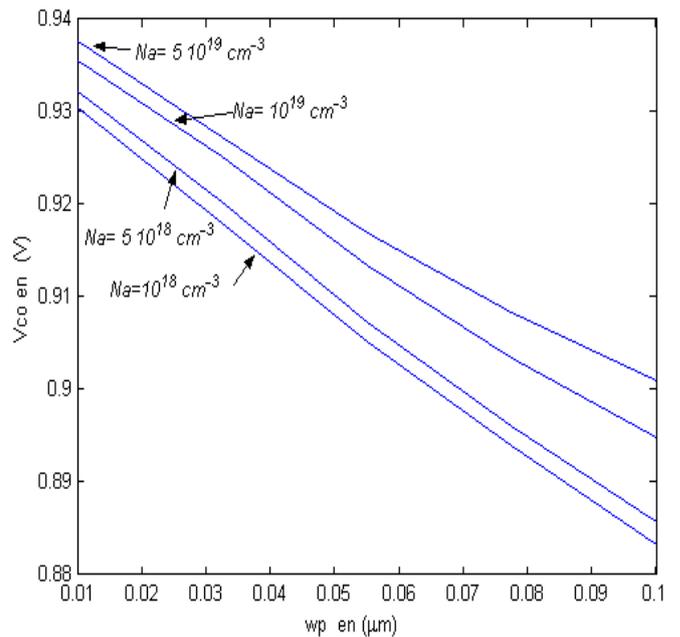


Figure 9 : Variation de la tension en circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur passivé

De même, la variation de tension de circuit ouvert qui est représentée sur la figure 9 suit la variation du courant de court circuit.

Pour une couche mince émettrice la tension en circuit ouvert augmente avec l'augmentation du dopage, sa valeur atteint $0.93 V$. Enfin, par la simulation, nous avons obtenu les caractéristiques optimales $J_{sc} = 32 \text{ mA/cm}^2$ (figure 8) et $FF = 52.42 \%$, pour la cellule étudiée.

3.5. Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque

Dans cette étude, nous avons vu que le nitrure de silicium jouait un rôle important dans la passivation frontale où le rapport des débits gazeux contrôle précisément le rendement de conversion. Dans ce paragraphe, nous allons tracer les variations des caractéristiques de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque W_i .

La figure 10 montre la variation des caractéristiques de la cellule. Nous notons qu'une augmentation de la couche intrinsèque permet d'améliorer le rendement de conversion et que ce rendement atteint un maximum de 27.95% pour $W_i = 0,5 \mu\text{m}$. Nous avons pris en compte pour notre simulation un rapport des débits gazeux optimum $R=5$.

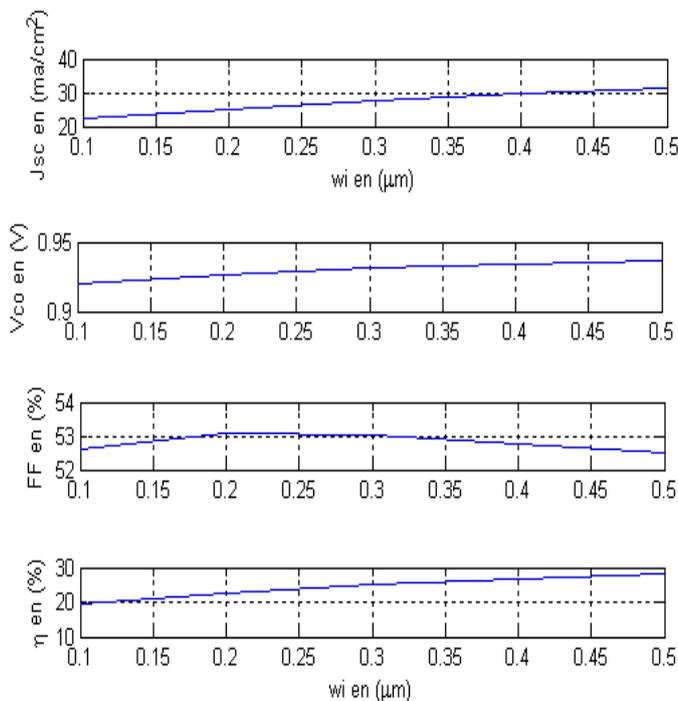


Figure 10 : Variation des caractéristiques de sortie en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque

Sur la figure 10, on observe que la tension en circuit ouvert est constante en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque, elle est de l'ordre de 0.94 V. Le facteur de forme augmente proportionnellement avec l'épaisseur de la couche intrinsèque et diminue à partir de 0.3 μm . Ce résultat nous mène à optimiser l'épaisseur de la couche intrinsèque à 0.5 μm . On remarque aussi que le courant de court circuit augmente avec l'épaisseur de W_i , il atteint la valeur de 30 mA/cm^2 .

CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin et à sa passivation arrière et frontale au moyen de différentes structures, notamment l'empilement multicouche oxyde mince/ SiN_x / SiO_x PECVD, et le nitrure de silicium Si_3N_4 . Ce travail présente donc une simulation des caractéristiques de la cellule avec passivation arrière et frontale, dans le but d'optimiser ses différents paramètres.

Les résultats montrent que la variation du rendement de conversion en fonction du gap présente un maximum pour $E_g = 1.9 \text{ eV}$. Nous avons constaté une amélioration du rendement qui passe de 9.55% sans couche de passivation arrière à 17.37% pour une passivation arrière par une couche empilée oxyde mince / nitrure de silicium / oxyde de silicium PECVD.

A l'issue de la simulation, nous avons optimisé le dopage de la base à la valeur de 10^{15} cm^{-3} . Nous avons montré qu'il est donc préférable que le dopage de la base soit faible, ce qui correspond à une taille des grains relativement importante (10 μm).

Pour la passivation frontale, le nitrure mince a prouvé son efficacité, dans le sens où il réduit considérablement le coefficient de réflexion de la structure. Le rapport des débits gazeux $R = \Phi(\text{SiH}_2\text{Cl}_2) / \Phi(\text{NH}_3)$, durant le dépôt de ce nitrure, contrôle précisément le rendement de conversion. Ce dernier croît avec des rapports de gaz élevés. En effet, le rendement est estimé à 24.85 % pour $R=10$. Par la suite, nous avons optimisé les paramètres de l'émetteur passivé, ce qui nous a conduit à un fort dopage d'émetteur ($N_a = 5.10^{19} \text{ cm}^{-3}$) et une faible épaisseur ($W_p = 0.01 \mu\text{m}$). Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque nous a permis d'améliorer le rendement de conversion.

L'épaisseur optimale est de 0.5 μm et le rendement est estimé à 27.95%. Enfin, nous pouvons conclure que le choix de la structure empilée oxyde/ SiN_x /oxyde, en tant que couche de passivation arrière, et que la couche de nitrure de silicium, en tant que passivation frontale, s'est avéré judicieux pour l'obtention d'une cellule solaire PIN avec de bonnes performances.

REFERENCES

- [1] J.G.E.Gardeniersa and H.A.C. Tilmans LPCVD silicon – rich silicon nitride films for applications in micromechanics, studied with statistical experimental design. J.Vac.Sci.Technol.A.14 (5), Sep/Oct 1996.
- [2] O.Schultz, M.Hofmann,S.W.Glunz, G.P.Wileke Fraunhofer, Silicon oxide/ Silicon Nitride Stack system for 20% Efficient silicon solar cells. Institute for Solar Energy Systems' Heidenhofstrabe 2, Freiburg, D-79110. 31st IEEE, PVSC Orlando, Florida 2005.

- [3] Amal. K. Ghosh, Charles Fishman, and Tom Feng 'Theory of the electrical and Photovoltaic properties of polycrystalline Silicon', J.Appl.Phys. Vol.51, No.1, January 1980.
- [4] G.D.cody, T. Tiedje, B.Abeles, B.Brooks et Y.Goldstein, Phys.Rev. Lett.47, 1480 (1981).
- [5] M. Hack et M.Shur, J.Appl.Phys.58, 997 (1985).
- [6] J.Baranger, Introduction à l'analyse numérique, Hermann Paris, Collection Méthodes.
- [7] M.Boumahrat et A.Gourdir, Méthodes Numériques appliqués, OPU.
- [8] J. Y. W. Seto, J.Appl.Phys.46, 5247 (1975).
- [9] Alain Ricaud, Photopiles Solaires, Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, 1997.
- [10] K. Shirasawa, H.Takahashi, Proc 23rd .IEEE. PVSC. Louis Ville 256, (1993).
- [11] Ken Coates, Scott Morrison, S. Narayanan, 'Deposition of Silicon Nitride to Improve the conversion efficiency of multicrystallin silicon solar cells', Proceeding of 16th European Photovoltaic Solar Energy conference, Glasgow, p 1279, 2000.
- [12] Nisrine.Benloucif, F. Mansour. 'Modelling of current density and surface recombination velocity effect at grain boundary in order to optimize the polycrystalline silicon solar cell conversion efficiency', International Review of PHYSICS (IREPHY), pp102-108, 2009.
- [13] Bouchekouf, B.Brahma, M.Marir. ' Etude de la cellule solaire en couches minces a base de CIGS ', Revue Sciences technologies développement – ANDRU- N^o 1-2007
- [14] J.J.Liou, W.Wong, 'Comparison and Optimization of the Performance of Si and GaAs Solar cells', Solar Energy Materials and Solar Cells, 28, pp.9- 28, 1992.