

Optimisation d'un Tandem Mécanique de Cellules Solaires (AlGaAs/GaAs) / (SnO₂/SiO₂/Si)

R. Zerdoum et A. Gueddim

Institut de Génie-Electrique, Centre Universitaire de Laghouat
BP 37G, 03000, LAGHOUAT

Résumé – La conversion multispectrale permet l'obtention de rendements énergétiques élevés. Aussi nous sommes-nous intéressés à étudier un système de deux cellules empilées mécaniquement, la première est une hétérojonction Al_yGa_{1-y}As/GaAs à gradient de bande interdite et la deuxième est une structure MIS SnO₂/SiO₂/N-Si. Le système est à trois sorties de sorte qu'aucune adéquation des courants n'est nécessaire. Un rendement de conversion global de 27.99 % a été obtenu à température ambiante et sans concentration (AM1.5).

Abstract – The multispectral conversion allows us to obtain high energetic efficiencies. We interested then in the study of a system of two cells mechanically bound. The first is a Al_yGa_{1-y}As/GaAs heterojunction with a forbidden zone gradient and the second is SnO₂/SiO₂/N-Si MIS structure. The system is a three output one so that no current adequation is necessary. A global conversion efficiency of 27.99 % has been obtained at ambient temperature and without concentration.

Mots clés : (AlGaAs/GaAs) / (SnO₂/SiO₂/Si) Tandem

1. INTRODUCTION

Le rendement d'une cellule solaire à base d'homojonction ou d'hétérojonction est limité par les multiples pertes qui se produisent dans cette cellule et en particulier celles relatives aux photons et aux porteurs. On est amené donc à l'utilisation de plusieurs cellules, chacune d'elles n'étant sensible que dans une bande spectrale, l'ensemble couvrant une plus large partie du spectre solaire. C'est le concept de conversion multispectrale.

Trois systèmes permettent la mise en œuvre de ce concept : le système dichroïque ou multicouche, le système cascade ou multicolore [1] et le système à empilement mécanique ou tandem qui consiste en une succession de cellules indépendantes les une des autres et placées sur le même trajet optique et dans lequel, les cellules ne peuvent être réalisées en un seul bloc monolithique du fait que les matériaux dont elles sont faites présentent des désaccords de maille et/ou de coefficients de dilatation thermique.

Dans ce travail, nous nous proposons l'étude d'un tandem AlGaAs/SnO₂/SiO₂/N-Si empilé mécaniquement.

2. ETUDE DE LA CELLULE SUPERIEURE

La cellule supérieure est une hétérostructure P-Al_yGa_{1-y}As/N-GaAs. L'état graduel de la bande interdite de la couche AlGaAs résulte en un champ interne qui réduit les pertes par recombinaison à la surface et en volume.

La figure 1 montrée le diagramme des bandes d'énergie de la structure traitée :

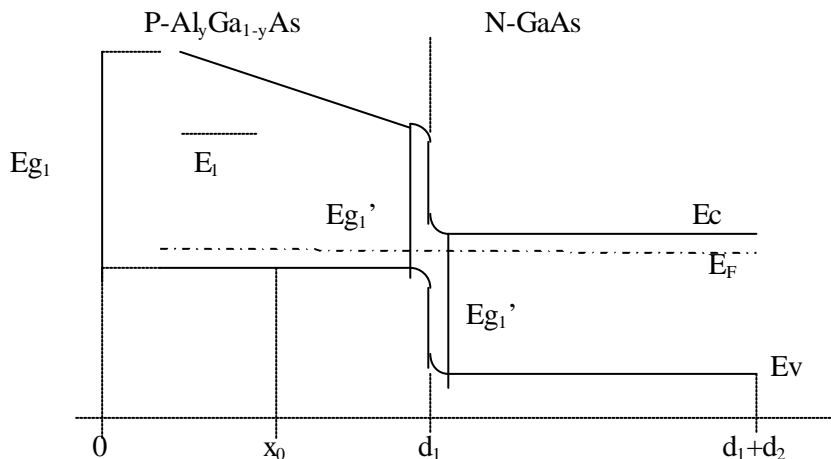


Fig. 1: Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction

La jonction est constituée d'une mince couche P-AlGaAs à gradient de bande interdite s'étendant depuis $x = 0$ à $x = d_1$, suivie d'une couche plus épaisse N-GaAs s'étendant depuis $x = d_1$ à $x = d_1 + d_2$.

2.1. Courant d'éclairement

2.1.1. Courant dans la région d'émetteur

La densité du courant dans la région d'émetteur caractérisée par son gap graduel est donnée, suivant le domaine énergétique considéré, par [2] :

a- Si $h\nu \geq E_{g1}$

$$J_{ccn} = q \cdot \frac{\exp(\alpha_n d_1)}{2} \cdot \frac{(\alpha_n - f_n + S/D_n) \cdot Q_{n1}(d_1) + (\alpha_n + f_n + S/D_n) \cdot Q_{n2}(d_1)}{f_n \cosh(f_n d_1) + (\alpha_n + S/D_n) \sinh(f_n d_1)} \quad (1)$$

avec:

$$Q_{n1}(d) = - \int_0^d [\exp - (a_n + f_n)x] G_n(x) dx$$

$$Q_{n2}(d) = \int_0^d [\exp - (\alpha_n - f_n)x] G_n(x) dx$$

Où $G_n(x)$ représente le taux de génération des porteurs et α_n et f_n des constantes.

b- Si $E_{g1} < h\nu < E_{g2}$

$$J_{ccn} = q \cdot \frac{\exp(\alpha_n d_1)}{2} \cdot \frac{(\alpha_n - f_n + S/D_n) \cdot [Q_{n1}(d_1) - Q_{n1}(x_0)] + (\alpha_n + f_n + S/D_n) \cdot [Q_{n2}(d_1) - Q_{n2}(x_0)]}{f_n \cosh(f_n d_1) + (\alpha_n + S/D_n) \sinh(f_n d_1)} \quad (2)$$

c- Si $h\nu < E_{g1}$,

$$\text{Quel que soit } x \in [0, d_1], \quad J_{ccn} \equiv 0. \quad (3)$$

2.1.2. Courant dans la région de base

Le courant J_{ccp} , dû au trous dans la région de base de type N, est donné par [3]:

$$J_n = [qF(1 - R) a x] a L_p \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \left(\cosh \left(\frac{d'}{L_p} \right) - \exp(-ad') \right) + \sinh \left(\frac{d'}{L_p} \right) + a L_p \exp(ad')}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \left(\frac{d'}{L_p} \right) + \cosh \left(\frac{d'}{L_p} \right)} \right] \quad (4)$$

où $d' = d - x_j - w$ est l'épaisseur de la région quasi-neutre de base.

Il faut noter toutefois que le flux arrivant à la jonction, dépend lui-même de la fréquence :
Le courant d'éclairement total est la somme des courants de l'émetteur et de la base:

$$J_{cc} \equiv J_{ccn} + J_{ccp} \quad (5)$$

Pour cette cellule supérieure, nous avons examiné l'effet de la vitesse de recombinaison superficielle et de la profondeur de jonction liée à l'épaisseur de l'émetteur sur les différents paramètres photovoltaïques.

3. ETUDE DE LA CELLULE INFÉRIEURE

La cellule inférieure est une structure MIS $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{N-Si}$. Le choix de cette structure repose sur les caractéristiques que possède le SnO_2 . C'est un oxyde à haute conductivité lorsqu'il est dopé, à large bande

interdite (3.6 eV) et ayant un indice de réfraction intéressant (compris entre 1.9 et 2). Il peut être donc utilisé comme électrode supérieure, joue le rôle de couche fenêtre et de revêtement antireflet [4].

La couche de silice interposée entre le métal et le semi-conducteur permet de réduire le courant d'obscurité et d'augmenter ainsi la tension de circuit ouvert.

Le diagramme des bandes d'énergie correspondant à cette cellule est représentée sur la figure 2.

$$J = J_{TH} - J_{TE} \quad (6)$$

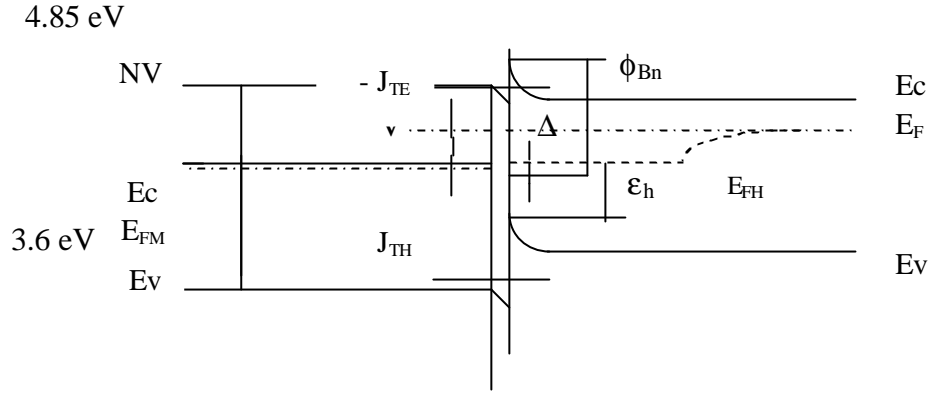


Fig. 2: Diagramme des bandes d'énergie de la structure MIS éclairée.

Nous avons étudié essentiellement l'effet de l'épaisseur de la couche de silice et de la densité d'états d'interface sur les paramètres photovoltaïques de cette structure.

3.1. Courant tunnel des électrons

Le courant tunnel des électrons est donné par [3,4] :

$$J_{TE} = J_S \left[\exp\left(\frac{qV_S}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

avec

$$J_S = A_{TE} T^2 \exp\left(\frac{-\phi_{Bn}}{kT}\right) \cdot \exp(-\chi_e^{1/2} \cdot \delta) \quad (8)$$

V_S étant la tension développée du côté semi-conducteur ,

δ est l'épaisseur de la couche SiO_2 isolante,

A_{TE} est la constante de Richardson pour les électrons ($A_{TE} = 120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$)

ϕ_{Bn} est la hauteur de la barrière donnée par [2,3] :

$$\phi_{Bn} = \phi_{B0} + (1-\gamma)(E_g - \phi_0) \quad (9)$$

$$\text{où } \phi_{B0} = \phi_m - \chi_e \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \beta} \quad (11)$$

$$\text{et } \beta = \frac{qD_s d}{e_i} \quad (12)$$

ϕ_m est le travail de sortie du métal, χ_e est l'affinité électronique du semi-conducteur, D_s est la densité des états d'interface, ϵ_i est la permittivité de la couche SiO_2 et ϕ_0 est le niveau, à partir de la bande de valence, auquel les états de surfaces sont plein, pour le semi-conducteur isolé.

Suivant Mead et Spitzer [4], ϕ_0 est pris égal à $E_g/3$.

3.2. Courant des trous

Le courant des trous, J_{TH} , est donné par [2,3]:

$$J_{TH} = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{V_s}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right) - 1 \right] \quad (13)$$

avec:

$$J_0 = \frac{qp_{n0}D_p}{L_p} \quad (14)$$

$$J_{ph} = qF \left[1 - \frac{\exp(-\alpha w)}{1 + \alpha L_p} \right] \quad (15)$$

et $\Delta = E_g - \phi_{Bn} - \epsilon_h$ (16)

où ϵ_h représente le quasi-niveau de Fermi des trous,

p_{n0} est la concentration des trous dans le semi-conducteur type N, D_p leur constante de diffusion et L_p leur longueur de diffusion.

3.3. Courant tunnel des trous

Le courant tunnel des trous est donné par [3,4] :

$$J_{TH} = A_{TH} T^2 \exp(-\chi_e^{1/2} \cdot \delta) \left[\exp\left(\frac{-\epsilon_h}{kT}\right) - \exp\left(\frac{E_g - \phi_{Bn} - V_I}{kT}\right) \right] \quad (17)$$

avec

A_{TH} : constante de Richardson pour les trous ($A_{TH} = 32 \text{ Acm}^2\text{K}^{-2}$)

V_I : tension développée côté isolant donnée par :

$$V_I = -\beta\Delta \quad (18)$$

3.4. Courant de court-circuit et tension de circuit ouvert

Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert sont déterminés à partir de la caractéristique courant-tension et sont donnés par [3,4]:

$$J_{CC} = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{\Delta + \beta\Delta}{kT}\right) - 1 \right] - J_s \left[\exp\left(\frac{\beta\Delta}{kT}\right) - 1 \right] \quad (19)$$

$$V_{CO} = kT \ln \frac{J_{ph} + J_0 + J_s}{J_0 \exp\left(\frac{\Delta + \beta\Delta}{kT}\right) + J_s \exp\left(\frac{\beta\Delta}{kT}\right)} \quad (20)$$

Notons que ces calculs correspondent au cas où les états de surface sont en équilibre avec les porteurs minoritaires. C'est en effet, le cas le plus probable dans une structure MIS selon J.P. Singh et R.S. Srivastava [4].

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Cellule supérieure

4.1.1. Réponse spectrale

La figure 3 montre la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde pour la cellule AlGaAs/GaAs à gradient de bande interdite et pour la cellule classique correspondante.

L'intérêt que présente la cellule à gap graduel comparée à la cellule classique ($E_1 = 0$) de mêmes caractéristiques y apparaît clairement. Pour la cellule classique une grande vitesse de recombinaison en surface provoque une variation brusque de la réponse spectrale pour une valeur de l'énergie égale à E_{g1} ($\lambda \cong 0.62 \mu\text{m}$), par contre pour la cellule à gradient de bande interdite la décroissance de la réponse spectrale pour une énergie inférieure à E_{g1} est faible. Aussi, aux fortes énergies ($\lambda \cong 0.5 \mu\text{m}$) correspondant au maximum du spectre solaire, le rendement de collecte total augmente de 20.5% pour la cellule classique à 89.5% pour la cellule à gradient de bande interdite c'est à dire dans un rapport de 4.

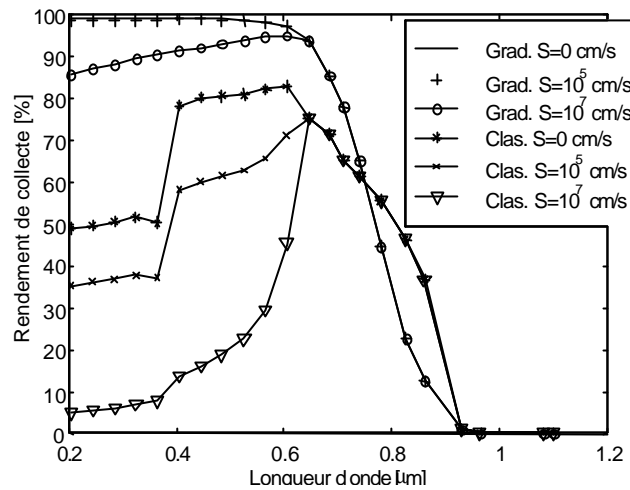


Fig.3: Effet de la vitesse de recombinaison en surface

La figure 3 montre aussi que les courbes des rendements de collecte pour des vitesses de recombinaison en surface respectivement de 0 et 10^5 cm.s^{-1} sont pratiquement confondues dans le cas de la cellule à gap graduel. Ceci permet de considérer comme négligeable l'effet des recombinaisons superficielles tant que leur vitesse demeure inférieure à 10^5 cm.s^{-1} .

4.1.3. Influence de E_1 et d_1

En augmentant l'épaisseur d_1 de la couche frontale de 1 à 8 μm tout en diminuant le champ électrique y existant, de manière à maintenir le produit $E_1.d_1$ constant, nous remarquons sur la figure 4 que le rendement de collecte diminue assez rapidement aux fortes énergies ($\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$) et augmente aux faibles énergies ($\lambda \approx 0.75 \mu\text{m}$).

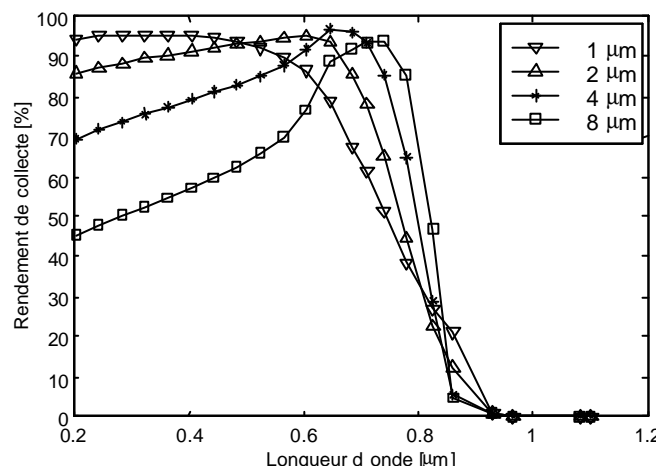


Fig. 4: Effet de l'épaisseur de l'émetteur Sur le rendement de collecte

4.2. Etude de la cellule inférieure

4.2.1. Effet de l'épaisseur de la couche de silice sur la tension de circuit ouvert

Ici, nous nous sommes d'abord intéressés à l'effet de l'épaisseur δ du film SiO_2 interposé entre le métal et le semi-conducteur sur la tension de circuit ouvert.

Nous avons fait varier δ dans l'intervalle $[0-40] \mu\text{m}$. Les autres paramètres sont :

$$N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3},$$

$$D_n = 26 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1},$$

$$L_p = 29 \mu\text{m},$$

$$\mu_p = 352 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1},$$

$$D_p = 9.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1},$$

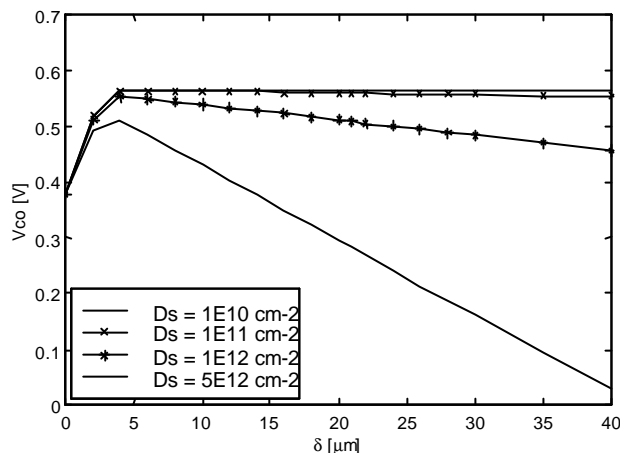
$$L_p = 0.5 \mu\text{m}.$$

La densité des états d'interface, D_s , prend successivement les valeurs : 10^{10} cm^{-2} , 10^{11} cm^{-2} , 10^{12} cm^{-2} et $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

La figure 5 représente les variations de la tension de circuit ouvert, V_{CO} , de cette cellule en fonction de l'épaisseur δ de la couche de silice.

La tension de circuit ouvert, V_{CO} croit d'abord avec l'épaisseur de la couche de silice jusqu'à une valeur maximale qui dépend de la densité des états d'interface puis diminue. Le taux de cette diminution est d'autant plus grand que la densité des états d'interface est grande.

L'augmentation de V_{CO} est due essentiellement à ce que le courant d'obscurité a diminué. Par contre la diminution observée par la suite trouve son explication dans le fait que le passage des porteurs se fait par effet tunnel et que cet effet n'est favorisé que pour les faibles épaisseurs des barrières de potentiel.



. Fig. 5: Tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la couche de silice

4.2.2. Effet de l'épaisseur de la couche de silice sur le rendement de conversion énergétique

Pour déterminer l'effet de l'épaisseur δ du film SiO_2 sur le rendement de conversion énergétique, nous avons fait varier δ dans l'intervalle $[0 \text{ } 40] \mu\text{m}$. Les autres paramètres conservent les mêmes valeurs que précédemment.

La figure 6 représente les variations du rendement de conversion énergétique avec l'épaisseur δ de la couche de silice.

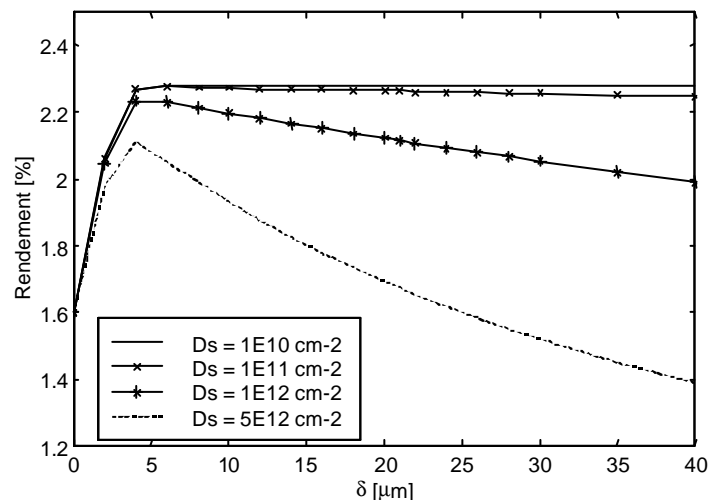


Fig. 6: Rendement de conversion en fonction de l'épaisseur de la couche de silice

En augmentant l'épaisseur du film SiO₂, on remarque que le rendement de conversion augmente dans un premier temps puis il chute avec un taux qui augmente avec la densité des états d'interface. Ce comportement similaire à celui de la tension de circuit ouvert, peut être justifié par les mêmes raisons que précédemment.

Notons, en fin, que le cas limite où δ devient nulle correspond à une structure MS ou Schottky. Sa tension de circuit ouvert est de 0.378 V alors que son rendement est de 1.60 %. Ces valeurs sont compatibles avec celle rapportées dans [5].

4.3. Tandem (Al_yGa_{1-y}As/GaAs)/SnO₂/SiO₂/Si

Le tableau 1 résume les différents paramètres des deux cellules supérieure et inférieure optimisées et du tandem résultant de leur association.

Tableau 1: Paramètres photovoltaïques des cellules supérieure, inférieure et tandem.

	J _{CC} (mA.cm ⁻²)	V _{CO} (V)	FF	η (%)
Cellule Al _y Ga _{1-y} As/GaAs	21.85	1.11	0.89	25.71
Cellule SnO ₂ /SiO ₂ /Si	4.15	0.56	0.74	2.28
Tandem (Al _y Ga _{1-y} As/GaAs)/MIS	26	-	-	27.99

5. CONCLUSION

Nous nous sommes intéressés à montrer l'influence de la vitesse de recombinaison superficielle et de la profondeur de jonction sur les paramètres photovoltaïques de la cellule supérieure. Nous avons établi que cette cellule est gouvernée par les conditions dans l'émetteur.

Pour la cellule inférieure SnO₂/SiO₂/Si, notre intérêt a été porté sur l'effet de l'épaisseur de la couche de silice et de la densité des états d'interface.

Les conditions optimales déterminées pour obtenir les meilleurs rendements de conversion sont :

1. Pour la cellule supérieure :

$$N_a = N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}, D_n = 40 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}, L_n = 3 \text{ } \mu\text{m}, D_p = 15 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}, L_p = 1 \text{ } \mu\text{m}, \\ d_1 = 4 \text{ } \mu\text{m}, d_2 = 3 \text{ } \mu\text{m}, \mu_n = 3000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, \mu_p = 400 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, E_{g1} = 2 \text{ eV}.$$

2. Pour la cellule inférieure :

Nous avons ainsi déterminé l'effet de la densité des états d'interface essentiellement sur la tension du circuit ouvert et le rendement de conversion énergétique ainsi que l'épaisseur optimale de la couche de silice correspondant au meilleur rendement. Cette épaisseur optimale est de l'ordre de 8 μm . Elle correspond à un rendement de conversion de 2.28%.

Le tandem réalisé en empilant mécaniquement les deux cellules précédentes présente, par conséquent, les meilleurs caractéristiques. En effet, il exploite un domaine spectrale plus large et possède un rendement de conversion énergétique de 27.99% sous le spectre AM1.5 à température ambiante et sans concentration.

Les résultats que nous avons obtenus se comparent favorablement avec ceux rapportés par les nouvelles publications [6].

REFERENCES

- [1] S. Smaoui et R. Zerdoum, "Etude et Optimisation des Cellules Solaires Tandem à Haut Rendement Ga_{0.2}Al_{0.8}As-Ga_{0.68}Al_{0.32}As-GaAs, avec Trois Sorties", Colloque sur l'Héliothermie, l'Environnement et la Maîtrise des Systèmes Solaires, Blida 13-15 Mai 2000.
- [2] J. E. Bourée, Revue de phys. appl. 12 (1977) p 559.
- [3] S. M. Sze, "Physics of Semiconductors Devices", J.Wiley & sons. 2^eed. (1981).
- [4] J. P. Singh and R.S. Srivastava, Indian J. Pure and Appl. Phys., vol.20,feb. 1982.
- [5] M. Orgeret, "Les piles Solaires", Masson. Ed. 1985
- [6] F. Dimroth, U. Schubert and A.W. Bett, IEEE Electron Dev. Let., vol. 21, n° 5, May 2000.