

MODELISATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES D'UNE CELLULE SOLAIRE CONVENTIONNELLE

M. Zitouni-Amini

*Unité de Développement de la Technologie du Silicium Laboratoire d'Analyse et Simulation
2, Bd Frantz Fanon B.P. Alger-Gare Algérie*

Résumé

La modélisation et l'optimisation des performances d'une cellule solaire N⁺P au silicium monocristallin de référence [11] sont effectués à l'aide du code de simulation unidimensionnelle LASSI-1D [16,17]. Ce programme est basé sur l'algorithme de Mayergoyz [1,2] pour la résolution séquentielle des équations du semi-conducteur discrétisées par les différences finies. L'optimisation des performances de cette cellule solaire consiste en l'adjonction d'un champ de surface arrière uniforme P⁺ ou BSF (Back Surface Field) dont l'épaisseur, W_{bsf} et la concentration, N_{bsf} , sont déterminées de telle sorte que la vitesse de recombinaison effective S_{eff} à la surface arrière soit la plus faible possible. Les résultats de la simulation nous permettent de définir deux types de BSF optimaux ($W_{bsf} > 12\mu m$, $N_{bsf} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $S_{eff} < 25 \text{ cm/s}$) et ($W_{bsf} = 3 \mu m$, $N_{bsf} = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $S_{eff} = 43 \text{ cm/s}$).

1-Introduction

La recherche dans le domaine photovoltaïque est motivée principalement par l'amélioration du rendement de conversion énergétique et par la réduction du coût de réalisation.

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par optimisation des paramètres physiques internes pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés.

La simulation de la cellule solaire étudiée est menée à l'aide du programme LASSI-1D qui résout les trois équations de base du semiconducteur en régime permanent. La technique de résolution est définie par l'algorithme de Mayergoyz et la méthode de Gummel [3] où chaque équation est résolue séquentiellement.

Cette méthode a plusieurs avantages :

- . la convergence globale dans tous les cas,
- . la résolution simultanée est évitée car chaque variable est calculée à chaque itération.

Nous introduisons en premier lieu le modèle numérique adopté puis les différentes techniques d'optimisation du rendement en simulant l'effet de l'amincissement de l'émetteur et du champ de surface arrière sur les performances de la cellule solaire de référence.

2-Modèles physiques

Pour reproduire assez fidèlement le comportement de la cellule solaire, les modèles décrivant les paramètres physiques sont inclus dans le programme.

- . La concentration intrinsèque a été corrigée à la valeur de Green et Sproul [4] $n_0 = 1.01 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

- . Le modèle de Slotboom [5] a été utilisé pour la simulation du rétrécissement de la bande interdite E_g .

- . Les mobilités μ_n et μ_p sont simulées à l'aide du modèle de Scharfetter et Gummel [7] qui tient compte de l'influence des impuretés ionisées à 300 K.

- . La recombinaison radiative est négligeable par rapport aux pertes totales dans les cellules solaires au silicium. En faible injection la

recombinaison bande à bande est modélisée par Auger dont les coefficients sont donnés par les relations de Dzewior et Schmid [8].

. La recombinaison Shockley-Read-Hall $R_{n,p}$ [9] est ajustée par le biais de τ_n (la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base), afin de reproduire la tension V_{oc} mesurée sur la cellule solaire de référence.

. La résistance série due aux contacts n'est pas prise en compte.

. Le profil de dopage N_d-N_a est obtenu par diffusion de phosphore à partir d'une source solide ($P_2O_5 : SiO_2$) [11] : les atomes de phosphore s'échappent de la plaquette de silicium dopée portée à haute température. Ils se répandent dans le four, de sorte qu'il existe à la surface des plaquettes de silicium vierge, une concentration constante (proche de la solubilité solide) de phosphore pendant toute la durée de la diffusion.

Le profil de dopage caractérisé par SIMS et simulé avec le code PROMIS [15] représente un profil typique de phosphore modélisé par Fair et Tsai [6]. Ce modèle distingue les trois régions de diffusion surface, intermédiaire, et queue figs 1a et 1b.

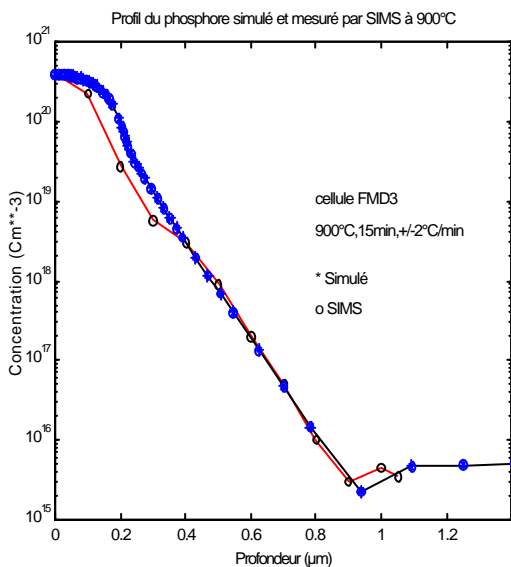


Fig 1a : Profil de diffusion du phosphore simulé à 900°C avant le etch-back.

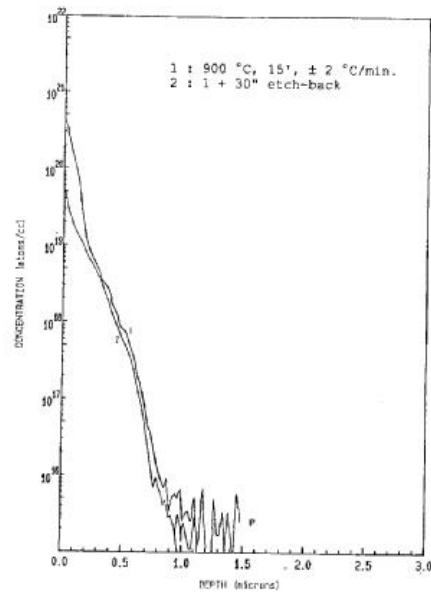


Fig 1b : Profil de diffusion du phosphore à 900°C par source solide avant et après le etch-back caractérisé par SIMS .

. La génération optique fig 2 a été approximée par la relation analytique de H.C.Hsieh et al [10] :

$$g(x) = \sum_{i=1}^4 g_i / (x + a_i) \quad i=1, \dots, 4$$

l'unité de g_i est $10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ et a_i est en cm

Pour AM1 :

$$\begin{aligned} g_1 &= 3.7 & a_1 &= 6.37 \cdot 10^{-7} \\ g_2 &= 77 & a_2 &= 5.6 \cdot 10^{-5} \\ g_3 &= -77 & a_3 &= 6.14 \cdot 10^{-4} \\ g_4 &= 4.95 & a_4 &= 2.23 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

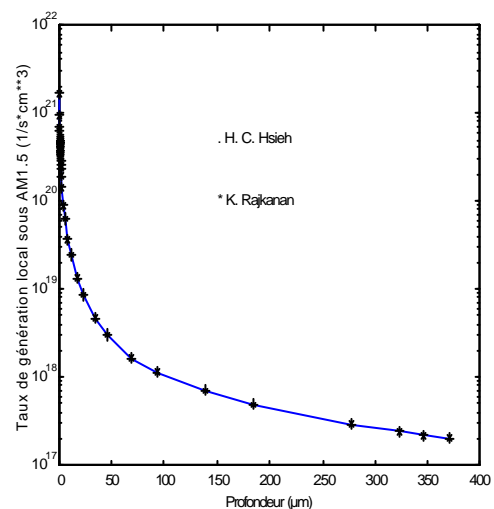


Fig 2 : Comparaison du taux de génération approximé par [10] et [14] .

4- Résultats et discussion

4.1. Simulation des cellules solaires FMD3 et SC4 avec émetteur aminci :

Sur la base du modèle numérique précédent implémenté dans le programme LASSI-1D, les résultats de la simulation des cellules solaires décrites au tableau 1 et les résultats obtenus avec le code BAMBI [19] fig 3 et 4 concordent

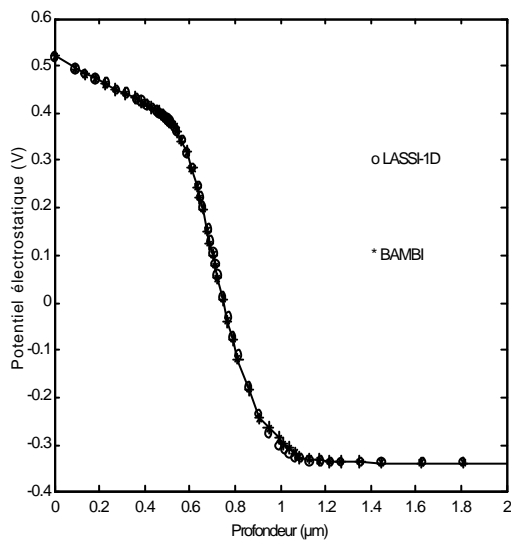


Fig 3 : Potentiel électrostatique au court-circuit de la cellule SC4.

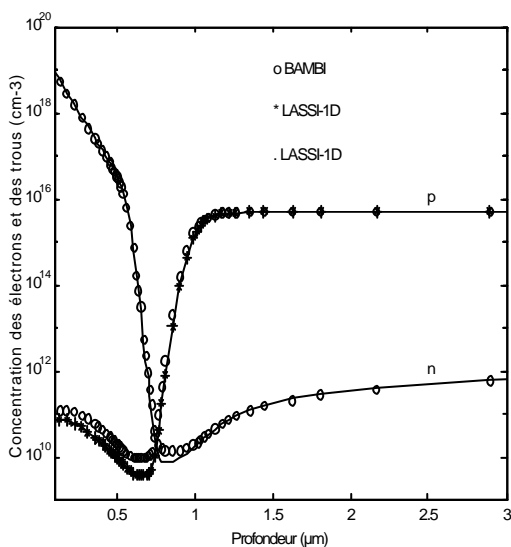


Fig 4 : Concentration des électrons n et des trous p au court-circuit de la cellule SC4.

Tableau 1

structure N ⁺ P :	Surfaces avant et arrière planaires.
Substrat :	Si <100> de type p
Résistivité	3. ? -cm
Epaisseur	370 μm
Profil de dopage :	
Concentration en surface Ns de FMD3	4 10 ²⁰ cm ⁻³
surface Ns de SC4	5 10 ¹⁹ cm ⁻³
Profondeur de jonction Xj de FMD3	0.9 μm
de SC4	0.7 μm
Grille frontale :	
largeur des doigts	250 μm
espace inter-doigts	2.5mm
Contact arrière	entièrement métallisé
Vitesse de recombinaison	
.au contact	Sn=Sp=?
.surface oxydée	Sn=Sp=1000cm/s

L'amincissement de l'émetteur de 0.2μm par attaque chimique (etch-back) permet d'améliorer l'état de surface de la cellule solaire par élimination de la couche fortement dopée où se concentrent les défauts et les dislocations. Ainsi nous obtenons une plus faible recombinaison en surface et une meilleure collecte des porteurs minoritaires aux faibles longueurs d'ondes et donc un courant de court-circuit plus important fig 5.

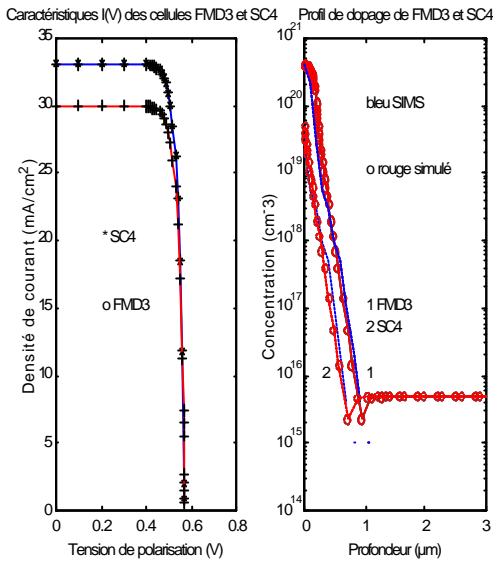


Fig 5 :Caractéristiques I-V à 1 soleil et Profils dedopage de FMD3 et SC4.

4.2. Calcul de la vitesse de recombinaison effective S_{eff} en fonction de W_{bsf} et de N_{bsf} :

La région fortement dopée de la surface arrière p^+ (BSF) est souvent modélisée par une vitesse de recombinaison effective S_{eff} qui est définie à la limite de la région quasi neutre de la base et du BSF.

Dans cette approche la région fortement dopée est remplacée par une quasi surface de vitesse de recombinaison S_{eff} d'épaisseur W_{bsf} .

S_{eff} est donnée par la relation [12]:

$$S_{eff} = \frac{(N/N^+)(D^+/L^+)(S_b L^+/D^+) + \tanh(W_{bsf}/L^+)}{1 + (S_b L^+/D^+) \tanh(W_{bsf}/L^+)}$$

où S_b , la vitesse de recombinaison au contact arrière est supposée infinie, L^+ et D^+ sont respectivement la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion, des porteurs minoritaires dans la région du BSF.

Pour le calcul de N^+ , la concentration effective du BSF, nous avons tenu compte du rétrécissement de la bande interdite décrit par le nouveau modèle de Klaassen et Slotboom [13].

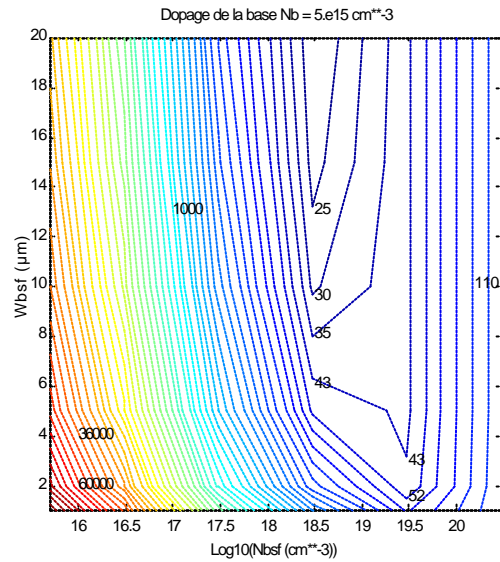


Fig 6 : Contours de S_{eff} en cm/s à l'interface $p-p^+$ en fonction de l'épaisseur du BSF et de $Log10(N_{bsf})$.

Nous remarquons, fig 6, que S_{eff} décroît lorsque N^+ augmente. La valeur minimale de S_{eff} est obtenue pour $N_{bsf} = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $W_{bsf} = 3 \mu\text{m}$ valeur typique d'un BSF de bore[19] et pour $N_{bsf} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $W_{bsf} = 6 \mu\text{m}$ valeur typique d'un BSF d'Al [18]. Pour des valeurs supérieures à $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, S_{eff} augmente.

Le profil du bore reste le modèle idéal pour une structure $p-p^+$.

L'autre possibilité est d'augmenter l'épaisseur du BSF car pour $N_{bsf} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $W_{bsf} = 12.5 \mu\text{m}$, S_{eff} est de 25 cm/s. Mais le principal inconvénient de cette technique est l'absorption de la lumière par un BSF trop épais.

4.3. BSF d'Aluminium :

La forme, l'épaisseur et la concentration de dopage du BSF d'aluminium peuvent être calculés à partir de la quantité d'aluminium déposée et de la température du recuit par la relation de Mc Alistair [20]:

$$W_{bsf} = \left(\frac{F}{g_{Al} / \rho_s} \right) \left[\frac{E}{100-F} - \frac{E}{100-E} \right]$$

où :

g_{Al} est la quantité d'Al déposée en g/cm^2
 ρ_{Si} est la densité du Si.

E et F sont définis par le diagramme de phase du système binaire Al-Si fig 7.

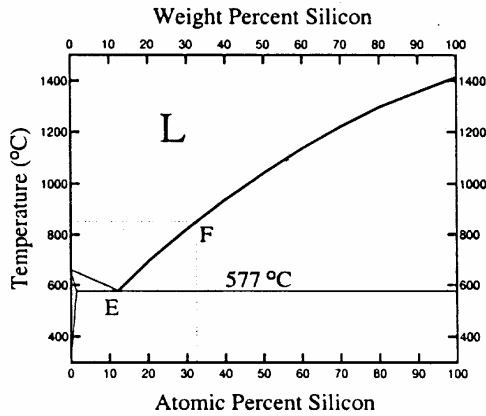


Fig 7 : Diagramme de phase du système binaire Al-Si.

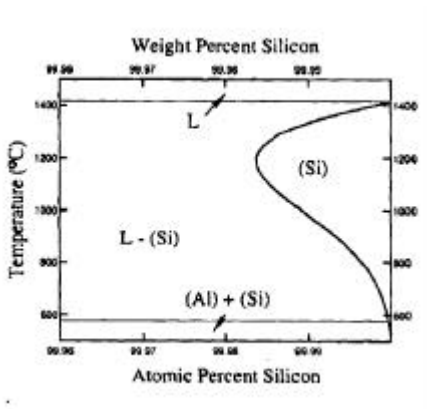


Fig 8 : Solubilité solide de l'Aluminium dans le silicium.

4.4. BSF de Al/Bore:

Nous avons vu que la concentration de dopage optimale d'un BSF de $3\mu m$ utilisé pour passiver la surface arrière d'une cellule solaire est de $3 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ alors que pour le BSF d'Al à $850^\circ C$ elle est de $3 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ (solubilité solide de l'Al dans Si plus faible). Pour obtenir $3 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ la température doit être supérieure à $1100^\circ C$ [21] ce qui peut affecter la jonction N^+P . L'autre possibilité est d'augmenter l'épaisseur du BSF d'Al en augmentant la quantité de pâte d'Al utilisée. Les principaux inconvénients de cette technique sont : une consommation importante

d'Al et l'absorption de la lumière par un BSF trop épais.

Pour éviter ces inconvénients P. Lölgen [18] à utilisé une technique qui combine le processus de dopage par l'Al et la solubilité solide plus élevée du Bore à des températures plus faibles [21]. Il montre que le BSF de Al/B permet d'obtenir la même vitesse de recombinaison effective en surface que le BSF d'Al pour une épaisseur $W_{Al/B \text{ BSF}} = \frac{1}{2} W_{Al \text{ BSF}}$. Ainsi la moitié de la quantité de pâte d'Al sera déposée par sérigraphie ; d'où une absorption plus faible de la lumière par le BSF. De plus cette technique permet de bénéficier de l'effet de gettering de l'Al et des propriétés de bon contact de l'Al-Si. On constate fig 10 que le BSF Al+Bore fig 9 donne les mêmes performances que le BSF de Bore.

En effet la vitesse de recombinaison effective optimale S_{eff} calculée par [21] dans le cas d'un substrat de $1.E16$ pour un BSF de Al/B de profondeur de $4\mu m$ est de $400cm/s$, et celle d'un BSF de Al de $8\mu m$ (le double) est de $500cm/s$. Ainsi on remarque que seulement la moitié de la pâte d'Al a été utilisée dans le process pour obtenir une meilleure passivation. De plus la profondeur du BSF et la concentration peuvent être ajustées indépendamment l'une de l'autre en jouant soit sur la quantité de pâte déposée soit sur la température.

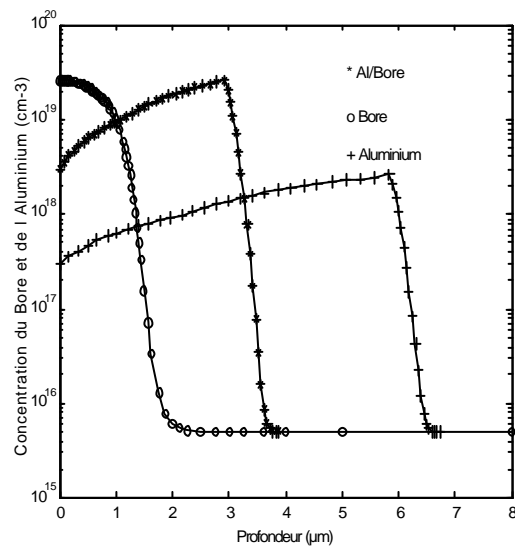


Fig 9: Simulation des Profils de diffusion de Bore , d'Aluminium et de Al/Bore dans un substrat de 5E15cm-3.

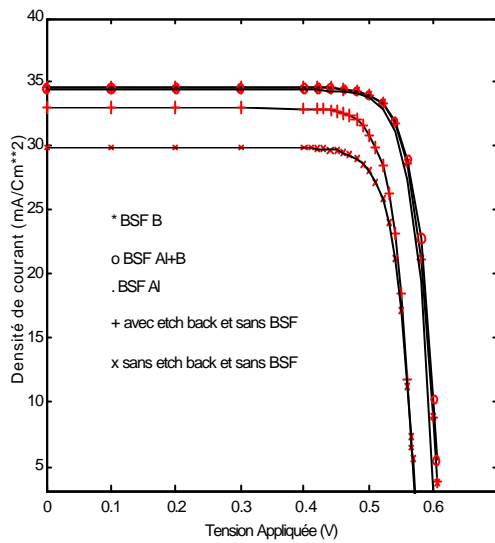


Fig 10 : Caractéristiques I-V simulées à 1 soleil de la cellule solaire SC4 avant et après optimisation.

Tableau 2

	FMD3	SC4	SC4+BSF	SC4+BSF
Paramètres électriques	calculés	mesurés	calculés	calculés
		Xj=0,7µm[11]		
Jsc(mA/cm²)	30	33	33.06	33.6
Voc(mV)	572	573	572.6	608
FF(%)	81.8	-	82	82
? (%)	14.	-	15.5	16.75

L'adjonction d'un BSF a contribué à augmenter aussi bien le courant de court-circuit que la tension en circuit ouvert, fig 7, par diminution de la recombinaison des porteurs minoritaires au contact arrière.

6-Conclusion :

Le modèle numérique implémenté dans le code LASS-1D nous a permis d'étudier l'effet de l'amincissement de l'émetteur sur le courant de court-circuit et d'un champ de surface arrière uniforme sur la vitesse de recombinaison effective en surface (résumés au tableau 2). Le BSF optimal est obtenu pour une concentration en surface de 310^{18}cm^{-3} et une épaisseur de 6

µm avec un BSF d'Al [18] ou bien 310^{19}cm^{-3} et 3 µm avec un BSF d'Al / Bore [18].

Le BSF Al / Bore donne les mêmes performances que le BSF de Bore pour une opération de diffusion moins coûteuse et plus facilement transférable à l'industrie où les dépôts se font par sérigraphie.

Références :

- [1] : Mayergoyz I. D., 86 'Solution of nonlinear poisson équation of semiconductor device theory' . J. Appl. Phys.59 1, 195-199.
- [2] : Korman Can E. , Mayergoyz I. D., 90 'A globally convergent algorithm for the solution of the steady-state semiconductor device equations.' J.Appl. Phys. 68 (3), 1324-1334.
- [3] : Gummel H. K. 64 ' A self-consistent iterative scheme for one-dimensionnal steady state transistor calculations. 'IEEE Trans. Electron Devices ED-11 , 455-465.
- [4] : Sproul A. B. and Green M. A. 90, 'Experimental measurement of the intrinsic carrier concentration of silicon.', 21 Photovoltaic Specialists conf. 1990, 380-385.
- [5] : Slotboom J.W. and DeGraff H.C.77, 'Bandgap narrowing in silicon bipolar transistors.' IEEE. Trans. Electron Devices.ED-24, 1123-1125.
- [6] : Fair R.B. 81, 'In Impurity Doping Processes in Silicon,' Ed. By F.F.Y. Wang. North-Holland ,Amsterdam, 1981, pp.315-442.
- [7] : Scharfetter D.L., Gummel H.K. 69,'Large signal analysis of a silicon read diode ascillator,' IEEE. Trans. Electron Devices ED-16, 64-77.
- [8] : Dziewior J. and Schmid W. 77,' Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon,' Appl. Phys.Lett. 31, 346-348.
- [9] : Fossum J.G. 76 ,'Computer -aided numerical analysis of silicon solar cells.' Sol. Stat. Electronics SSE- 19, 269-277.
- [10]: Hsieh H.C., Hu C., Drowel C. I. 80,'A new method of analysing the short-ircuit current of silicon solar cells. 'IEEE Trans. Electron Devices ED-27, 883-885.

[11]: Boubkeur H. 93, 'Etude de la région d'émetteur d'une cellule photovoltaïque au silicium monocristallin. Effet des forts dopages N^+ sur substrat de type p.' Thèse de Magister U.D.T.S., Alger.

[12]: Godlewski M.P., Baraona C.R., Brandhost H.W., Jr. 73 'Low high junction theory applied to solar cells.' Proc. 10th IEEE PVSC, 40-44.

[13]: Klaassen DB.M., Slotboom J.W., H.C. de Graff H.C. 92, 'Unified apparent bandgap narrowing in n and p-type silicon.' Sol. Stat. Electronics, SSE-35, 125-129.

[14]: Rajkanan K., Singh R., Shewchu J.79, 'Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations.' Sol. Stat. Electronics, SSE-22, 793-795.

[15]: PROMIS 91, 'PROcess Modeling In Semiconductors Program.' Microelectronics Institute University of Vienna .

[16]: Oulebsir A. 97, 'Analyse et simulation d'un dispositif au silicium monocristallin ; Résolution séquentielle des équations au régime transitoire ; Application au détecteur de particules alpha.' Thèse de Magister. USTB, Blida .

[17]: Zitouni-Amini M., 'LASSI (Large area Semiconductor device SIMulation).' Rapport interne. U.D.T.S. 1999.

[18]: Lölgen P. 95, 'Surface and volume recombination in silicon solar cells'.Thèse de Phd. Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur en terrenkunde. Nederlands.

[19]: BAMBI (Basic analyser of Mos and Bipolar devices). 91, University of Vienna.

[20]: Murray J. L., Alister A. J. Mc. 84, 'Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 5, No. 1 p. 74-80.

[21]: Lölgen et al.94, 'Boron doping of silicon using coalloying with aluminium.' App. Phys. Lett. 65(22) , 2792-2795.

Profil de dopage d'une cellule solaire à jonction flottante et à U groove

