

## Technique de détermination de l'épaisseur optimum de la base appliquée à une photopile n+ /p / p + au silicium sous éclairage monochromatique de courtes longueurs d'onde

### [ Optimum base thickness determination technique as applied to n/p/p+ silicon solar cell under short wavelengths monochromatic illumination ]

*Meimouna MINT SIDI DEDE, Mor Ndiaye, Sega GUEYE, Mamadou Lamine BA, Ibrahima DIATTA, Marcel Sitor DIOUF, El Hadj SOW, Amadou Mamour BA, Massamba DIOP, and Gregoire SISSOKO*

Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Énergie Solaire, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** An n/p/p+ silicon solar cell under monochromatic illumination with short wavelength is studied in steady state. Photogenerated minority carrier's density in the base is obtained by solving the diffusion equation with boundary conditions at the surfaces of both the junction and the back. The photocurrent density is calculated and represented as function of junction surface recombination velocity for different absorption coefficient values in the short wavelength range. Then at short-circuit current condition given for large junction recombination values, the back-surface recombination expression is derived as silicon absorption coefficient dependent. As a result, compared with the intrinsic recombination velocity, optimum thickness is extracted for given absorption coefficient corresponding to short wavelength illumination and modeled in mathematic relationship.

**KEYWORDS:** Silicon solar cell, Absorption Coefficient, Back surface recombination velocity, Optimum thickness.

**RESUME:** Une photopile n+/p/p+ silicium sous l'éclairage monochromatique de courtes longueurs d'onde, est étudiée en régime statique. La densité de porteurs minoritaires photogénérés dans la base est obtenue en résolvant l'équation de diffusion munie des conditions limites aux surfaces de la jonction et de la face arrière. La densité photocourant est calculée et représentée en fonction de la vitesse surfacique de recombinaison à la jonction, pour différentes valeurs du coefficient d'absorption dans la plage des courtes longueurs d'onde. Ensuite, dans les conditions de court-circuit à court-circuit de la photopile correspondant aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, l'expression de la recombinaison en face arrière est déduite, dépendante du coefficient d'absorption du silicium. Par suite, comparée à la vitesse intrinsèque de recombinaison, l'épaisseur optimale est extraite pour chaque coefficient d'absorption donné, correspondant à l'éclairage de courte longueur d'onde et modélisée dans la relation mathématique.

**MOTS-CLEFS:** Photopile au silicium, Coefficient d'absorption, Recombinaison en face arrière, Epaisseur optimum.

## 1 INTRODUCTION

La caractérisation des photopiles permet de rechercher les paramètres physiques [1], [2] décrivant les phénomènes qui s'y déroulent lors de son fonctionnement.

### 1.1 PARAMÈTRES PHYSIQUES

Ces paramètres physiques sont liés:

- i) A la fabrication, tel que le taux de dopage, dans les régions de l'émetteur et de la base, qui constituent les différentes parties de la photopile [3]
- ii) Aux dimensions géométriques définissant la taille de grains et les épaisseurs des différentes régions, qui donnent les limites de chaque région [4]
- iii) Au choix du matériau semi-conducteur qui peut être le silicium, le germanium, le cadmium ou d'autres compositions binaires ou ternaires. Le semi-conducteur de type (n) ou (p) est défini par son énergie de largeur de bande d'énergie (gap), qui peut être direct (Ge) ou indirect (Si), et influence ses propriétés optiques (coefficient d'absorption).

### 1.2 PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Les phénomènes physiques sont :

- i) L'absorption de la lumière monochromatique, qui donne naissance aux variables physiques que sont, les coefficients de réflexion ( $R(\alpha_\lambda)$ ) et d'absorption ( $\alpha_\lambda$ ) monochromatiques associés à la longueur d'onde ( $\lambda$ ) de la lumière incidente [5].
- ii) La génération des paires électron-trou, suite à l'absorption de photons de longueur d'onde ( $\lambda$ ), montre le lien entre le coefficient d'absorption et l'énergie de gap [6].
- iii) La diffusion des paires électron-trou, corrélée au taux de dopage ( $N_e$  ou  $N_b$ ) [7] des régions (émetteur et base), définira la longueur ( $L$ ) et la durée de vie ( $\tau$ ) des porteurs minoritaires de charge électrique photo-générés, à travers la loi d'Einstein [8].
- iv) Les recombinaisons [8] des porteurs minoritaires de charge électrique photo-générés s'effectuent en volume (ou durée de vie) et aux limites des surfaces de grains et des régions, induisant respectivement les vitesses de recombinaison surfaciques aux joints de grain ( $S_g$ ) [9], à la face avant ( $S_e$ ) [10], à la jonction émetteur-base ( $S_f$ ) [11], et en face arrière de la base ( $S_b$ ) [7], [12]. Les modèles théoriques d'étude à 1 dimension [13] et à 3 dimensions [14] prennent en compte ces paramètres.

Dans le but de déterminer les paramétrés phénoménologiques ( $L$ ,  $D$ ,  $\tau$ ,  $S_e$ ,  $S_b$ ,  $S_f$ ,  $S_g$ ), plusieurs travaux ont été effectués sur la base de la photopile à jonction horizontale [15] (lumière incidente perpendiculaire à la surface de la jonction) de type (n/p, p/n, n+/p/p+ ou p+/p/n+), car d'épaisseur plus importante que l'émetteur, et produisant par conséquent plus de courant électrique. Les photopiles à jonction verticale multiples [16] (éclairage incident parallèle à la jonction) de type parallèle (n/p) [17] ou série (n/p/p+) [18] utilisent des matériaux de faible qualité électronique et sous concentration de lumière [19] pour compenser ce handicap.

### 1.3 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

L'épaisseur de la base constitue un enjeu important, dont les effets ont été étudiés sur la réponse de la photopile [20], [21], [22], mais sa détermination reste complexe, car liée aux conditions de fonctionnement de la photopile, notamment le régime, qui peut être statique [23], [24], [25], dynamique fréquentiel [26], [27] ou transitoire [11], [28], [29], [30]. Les conditions extérieures auxquelles est soumise la photopile peuvent être:

- i) Présence de champ électromagnétique externe [31], [32],
- ii) Effet de particules électriques irradiantes [33],
- iii) De température [34], [35]).

Ces conditions également influencent les paramètres phénoménologiques [36].

Ce présent travail étudie la photopile sous éclairage monochromatique [37], [38] à travers la solution de l'équation de diffusion relative aux porteurs minoritaires de charge en excès, et exploite l'expression de la vitesse de recombinaison en face arrière ( $S_b$ ) [12] dépendante du coefficient d'absorption ( $\alpha_\lambda$ ) monochromatique, déduite du photocourant, pour la détermination de l'épaisseur optimum ( $H_{opt}(\alpha_\lambda)$ ) de la base.

## 2 DESCRIPTION DE LA PHOTOPILE

L'étude porte sur une photopile de type n+-p-p+ éclairée par la face avant par une lumière monochromatique, représentée par la figure 1 ci-dessous [39].

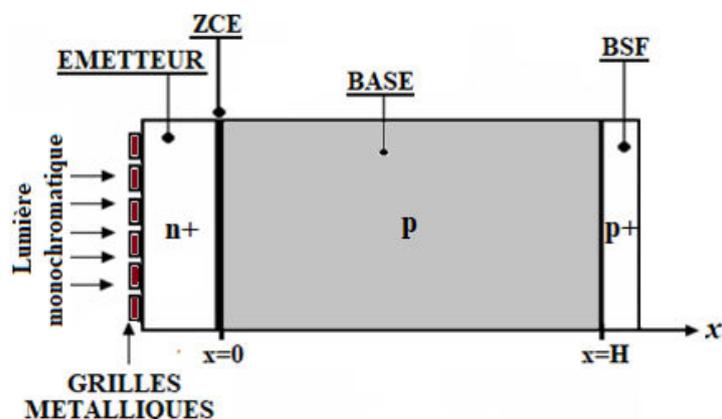


Fig. 1. Photopile n+-p-p+ au silicium

La photopile étudiée est constituée:

- D'un émetteur de type n<sup>+</sup> fortement dopé ( $10^{17}$  à  $10^{19}$  atom.cm<sup>-3</sup>) en atomes donneurs (Phosphore). Son épaisseur varie de 0,5 à 1 μm. L'émetteur représente la face avant où arrive la lumière incidente. Il est recouvert d'une grille métallique (Aluminium) qui permet de collecter les charges électriques photogénérées.
- D'une base de type p moins dopée que l'émetteur ( $10^{15}$  à  $10^{17}$  atom.cm<sup>-3</sup>) en atomes accepteurs (Bore) dont l'épaisseur varie de 200 à 400 μm où les porteurs minoritaires sont les électrons.
- D'une zone de charge d'espace (ZCE) qui se trouve entre l'émetteur et la base où règne un champ électrique intense qui permet de séparer les paires électron-trou qui arrivent au niveau de la jonction. Elle est assimilée à un condensateur plan, formé par diffusion de charges électriques selon le principe d'Helmozt de compensation.
- D'une zone arrière de type p<sup>+</sup> surdopée ( $10^{17}$  à  $10^{19}$  atom.cm<sup>-3</sup>) en atomes accepteurs appelée aussi Back Surface Field (BSF) située entre la base (p) et la face arrière (p<sup>+</sup>) de la base. Il y règne un champ électrique résultant de la création de la jonction p/p<sup>+</sup>, permettant de renvoyer les porteurs de charge photocréés près de la face arrière vers la jonction émetteur-base.

## 3 THÉORIE

Prenant en compte les phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion au sein de la base de la photopile éclairée par la face avant par une lumière monochromatique, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charges en excès  $\delta(x, \alpha_\lambda)$  dans la base en régime statique est donnée par l'équation 1:

$$D \times \frac{\partial^2 \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \alpha_\lambda)}{\tau} + G(x, \alpha_\lambda) = 0 \quad (1)$$

Où:

$D$  est le coefficient de diffusion des électrons dans la base;

$\delta(x, \alpha_\lambda)$  représente la densité des porteurs de charge photogénérés (électrons) dans la base;

Avec:

$$\tau = \frac{L^2}{D} \quad (2)$$

$L$  est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en excès dans la base. Elle représente aussi la distance moyenne parcourue par les électrons avant leur recombinaison dans la base [40];

$G(x, \alpha_\lambda)$  est le taux de génération des paires électron-trou à une profondeur  $x$  dans la base sous éclairage monochromatique. Son expression est donnée par:

$$G(x, \alpha_\lambda) = \alpha_\lambda \times \varphi_\lambda \times (1 - R_\lambda) \times \exp(-\alpha_\lambda \cdot x) \quad (3)$$

$\alpha_\lambda$  représente le coefficient d'absorption monochromatique du matériau pour une longueur d'onde  $\lambda$ ,

$R_\lambda$  est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau pour une longueur d'onde  $\lambda$ ,

$\varphi_\lambda$  est le flux incident de la lumière monochromatique,

La résolution de l'équation (1) permet d'obtenir l'expression de la densité des porteurs sous la forme suivante:

$$\delta(x, \alpha_\lambda) = A \times \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L}\right) + B \times \operatorname{sh}\left(\frac{x}{L}\right) + K \times \exp(-\alpha_\lambda \cdot x) \quad (4)$$

Avec:

$$K = \frac{-\alpha_\lambda \times \varphi_\lambda \times (1 - R_\lambda) \times L^2}{D \times [\alpha_\lambda^2 \times L^2 - 1]} \quad (5)$$

Les constantes A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites.

➤ **A la jonction émetteur-base ( $x = 0$ )**

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D} \times \delta(0, \alpha_\lambda) \quad (6)$$

$S_f$ : représente la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la jonction imposée par la charge extérieure et caractérise le point de fonctionnement de la photopile variant du circuit ouvert au court-circuit [11], [41].

➤ **A la face arrière ( $x = H$ )**

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \alpha_\lambda)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-S_b}{D} \times \delta(H, \alpha_\lambda) \quad (7)$$

$S_b$ : représente la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la face arrière. Elle est la conséquence du champ électrique créé par la jonction p/p+ et caractérise le comportement des porteurs de charges au niveau de l'interface base-face arrière [12], [42], [43].

## 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 4.1 DENSITÉ DES PORTEURS MINORITAIRES DANS LA BASE

La **figure 2**, matérialise les profils de la densité des porteurs de charges minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes grandes valeurs du coefficient d'absorption.

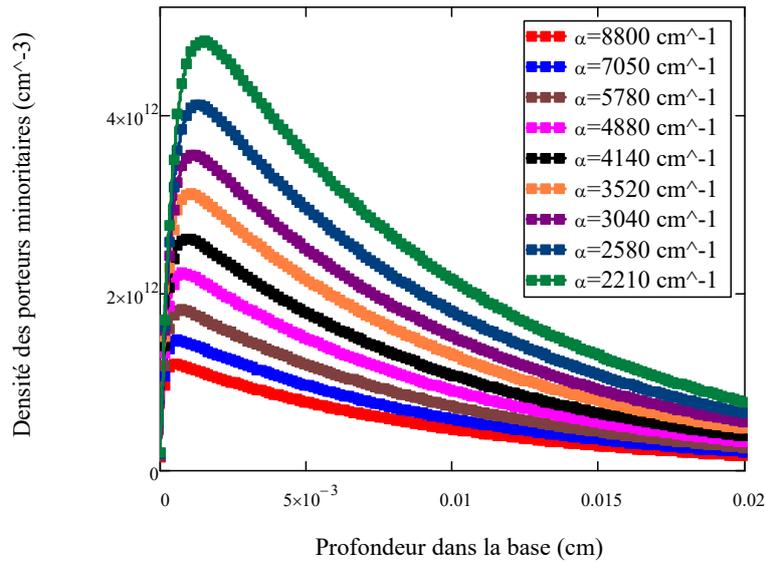


Fig. 2. Densité de porteurs de charges minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour différentes grandes valeurs du coefficient d'absorption avec  $S_f=6 \cdot 10^6$  cm/s;  $S_b2$

La figure 2, montre que la lumière ayant de grands coefficients d'absorption pénètre faiblement dans la base, créant ainsi une densité très élevée des porteurs de charges près de la jonction. La lumière à grands coefficients d'absorption génère donc une faible densité des porteurs de charges en face arrière correspondant à des grandes vitesses de recombinaison à la face arrière (Eq.7), ce qui montre l'inutilité des fortes épaisseurs dans ces conditions d'éclairage.

La figure 3, montre aussi que les maxima de la densité des porteurs de charges se déplacent vers la jonction lorsque le coefficient d'absorption de la lumière augmente. Les porteurs sont ainsi créés près de la jonction ( $x=0$ ), ceci entraîne un fort photocourant [34], [38], [44], [45].

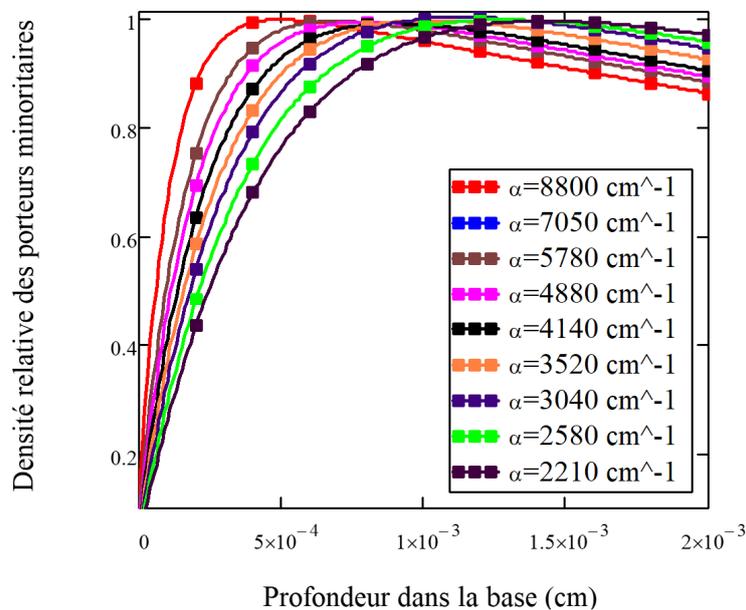
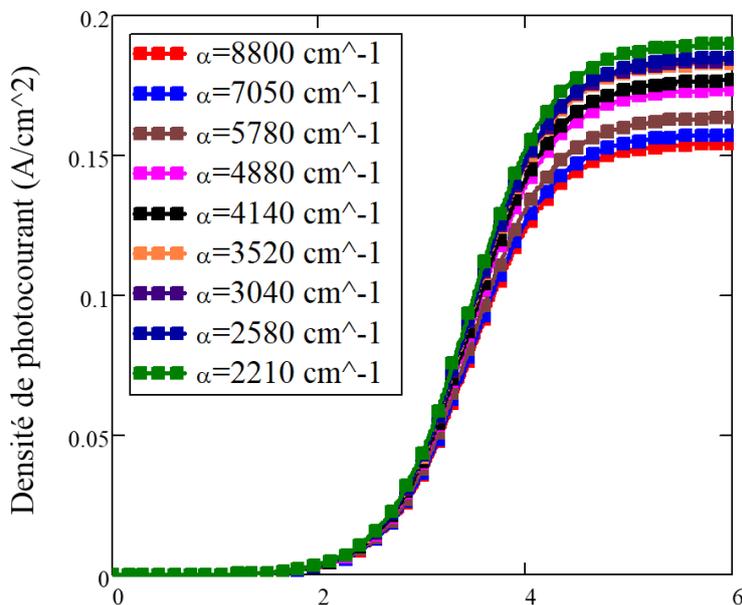


Fig. 3. Densité relative des porteurs de charges minoritaires en fonction de la profondeur de la base pour de grands et différents coefficients d'absorption avec  $S_f=6 \cdot 10^6$  cm/s;  $S_b2$

#### 4.2 DENSITÉ DE PHOTOCOURANT

La **figure 4**, illustre les profils de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents coefficients d'absorption.



**Fig. 4.** Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes grandes valeurs du coefficient d'absorption- Sb2

La **figure 4**, montre que la densité de photocourant ( $J_{ph}$ ) est quasiment nulle pour des vitesses de recombinaison à la jonction ( $S_f$ ) inférieures à  $2 \cdot 10^2$  cm/s (situation de circuit ouvert).

La densité de photocourant est ensuite croissante entre  $2 \cdot 10^2$  cm/s et  $4 \cdot 10^4$  cm/s. Au-delà des vitesses  $S_f$  supérieures à  $4 \cdot 10^4$  cm/s l'amplitude de la densité de photocourant est maximale et constante (situation de court-circuit). Cette amplitude augmente avec la diminution du coefficient d'absorption ( $\alpha_\lambda$ ) de la lumière.

Le déplacement vers la profondeur, du point  $x_0$  de densité maximum des porteurs de charge en fonction du coefficient d'absorption, définit une zone complémentaire de charge d'espace de gradient positif [45], dans lequel s'effectue la collecte des porteurs photogénérés. Donc le photocourant  $J_{ph}$  est d'autant plus important que cette zone de gradient positif est large.

L'expression de la densité de photocourant est définie par la relation suivante:

$$J_{ph}(S_f, \alpha_\lambda) = q \times D \times \left[ \frac{B(S_f, \alpha_\lambda)}{L} - K(\alpha_\lambda) \times \alpha_\lambda \right] \quad (8)$$

La densité de photocourant est constante pour les grandes valeurs  $S_f$  de la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la jonction correspondant au courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) [12, 25].

$$\left. \frac{\partial J_{ph}(S_f, \alpha_\lambda)}{\partial S_f} \right|_{S_f \geq 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}} = 0 \quad (9)$$

La résolution de cette équation permet d'obtenir deux expressions, solutions de la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la face arrière [25]:  $S_{b1}$  intrinsèque (ou électronique) et  $S_{b2}$  qui dépend du coefficient d'absorption de la lumière monochromatique pour une longueur d'onde  $\lambda$  [46].

$$Sb1(H) = -\frac{D}{L} \times th\left(\frac{H}{L}\right) \quad (10)$$

$$Sb2(H, \alpha_\lambda) = D \times \frac{\alpha_\lambda \times \left( ch\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-\alpha_\lambda \cdot H) \right) - \frac{1}{L} \times sh\left(\frac{H}{L}\right)}{ch\left(\frac{H}{L}\right) - \alpha_\lambda \times L \times sh\left(\frac{H}{L}\right) - \exp(-\alpha_\lambda \cdot H)} \quad (11)$$

#### 4.3 INFLUENCE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION (D) SUR LA VITESSE Sb2

La **figure 5**, ci-après représente les profils de la vitesse de recombinaison à la face arrière (Sb2) en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient de diffusion, correspondant à des matériaux de différents taux de dopage. Aux grandes valeurs du coefficient d'absorption, pour Sb2 donnée, les faibles diffusions (D) nécessitent de faibles épaisseurs (H).

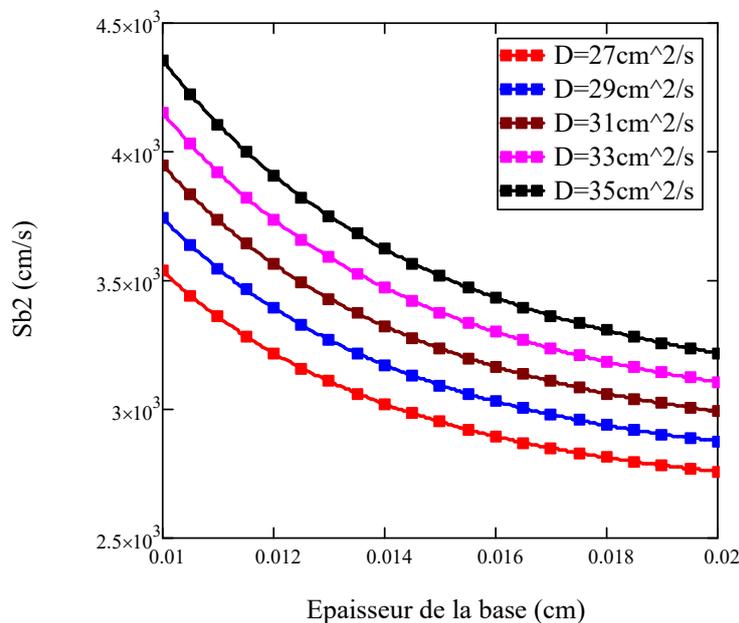


Fig. 5. Sb2 en fonction du coefficient de diffusion pour différentes valeurs de l'épaisseur (H) avec  $\alpha=8800 \text{ cm}^{-1}$

#### 4.4 DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIMUM DE LA BASE

L'épaisseur optimum de la base est obtenue par la technique d'intersection des courbes des vitesses relatives de recombinaison à la face arrière. Les vitesses absolues de recombinaison ont déjà été utilisées sur les photopiles en variant le taux de dopage [47] et soumises à des influences extérieures: sous irradiation de particules chargées [33], sous champ magnétique et température [48], [49], [50], sous champ magnétique [51]. La **figure 6**, illustre les profils des vitesses relatives de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient d'absorption.

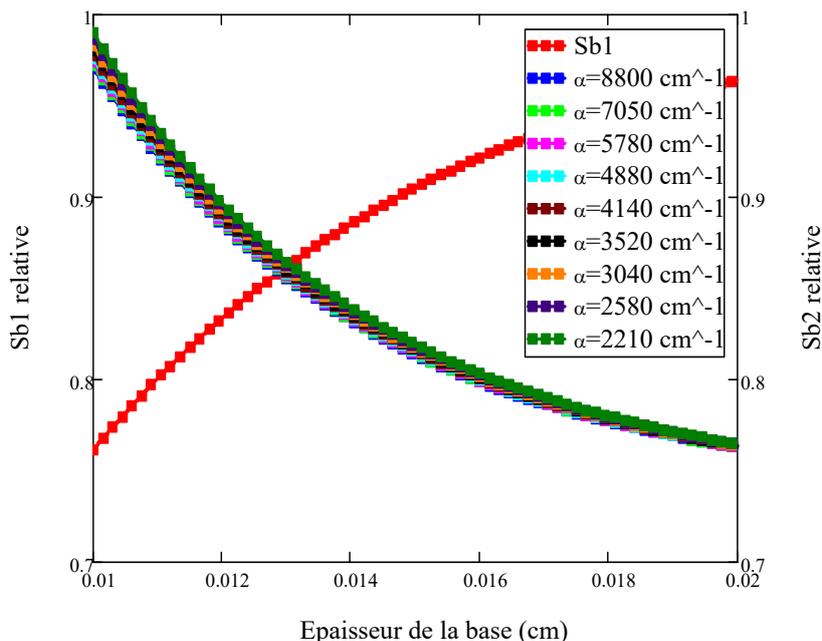


Fig. 6. Vitesse de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes grandes valeurs du coefficient d'absorption.  $L=0.01$  cm et  $D=35$  cm<sup>2</sup>/s

Le **tableau 1** ci-dessous présente les valeurs de l'épaisseur optimum de la base obtenues pour différentes valeurs du coefficient d'absorption, à partir de la figure 6.

Tableau 1. Valeurs de l'épaisseur optimum ( $H_{opt}$ ) en fonction du coefficient d'absorption

A (cm <sup>-1</sup> )	8800	7050	5780	4880	4140	3520	3040	2580	2210
$H_{opt}$ (μm)	128.82	128.96	129.14	129.29	129.47	129.73	129.87	130.2	130.56

La **figure 7**, ci-dessous matérialise le profil de l'épaisseur optimum en fonction du coefficient d'absorption.

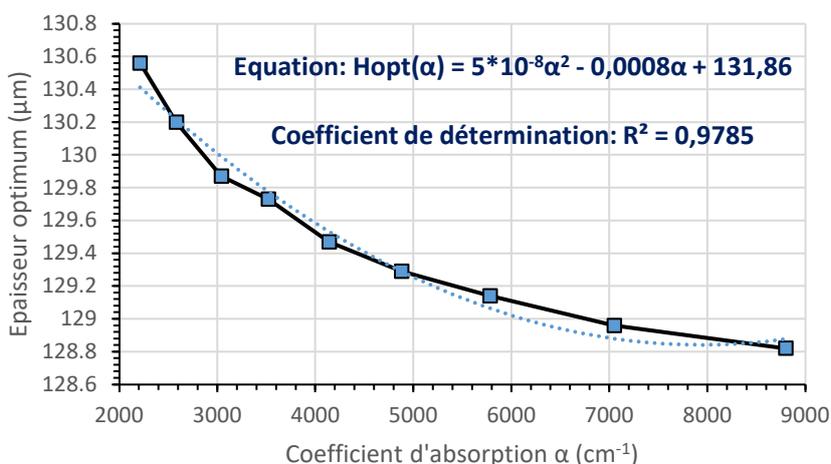


Fig. 7. Epaisseur optimum en fonction du coefficient d'absorption

La corrélation obtenue entre l'épaisseur optimum et le coefficient d'absorption est définie par la relation (12) suivante:

$$H_{opt}(cm) = \chi * \alpha_{\lambda}^2 - \beta * \alpha_{\lambda} + \gamma \quad (12)$$

$$\chi = 5 * 10^{-8} \text{ cm}^3$$

$$\beta = 0.0008 \text{ cm}^2$$

$$\gamma = 131.86 \text{ cm}$$

La **figure 7**, montre que l'épaisseur optimum diminue très légèrement avec l'augmentation du coefficient d'absorption. Ce qui corrobore que les épaisseurs minces sont utilisées pour les fortes absorptions. Ceci permettrait de choisir une épaisseur optimum adéquate pour une photopile à partir d'un coefficient d'absorption donné, d'économiser de la matière (Si) pour la fabrication de photopiles et minimiser le coût de fabrication et de revente.

## 5 CONCLUSION

Au cours de cette étude de la la base de la photopile au silicium, il a été montré l'influence de grandes valeurs du coefficient d'absorption correspondant aux faibles longueurs d'onde, sur:

- La densité des porteurs minoritaires de charge en fonction de la profondeur de la base.
- Du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction, qui a permis l'établissement des expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière.

L'étude des expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière dont l'une est dépendante du coefficient d'absorption a conduit à la détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile sous éclairage monochromatique de faibles longueurs d'onde.

Ainsi la technique d'optimisation de la base ici présentée prenant en compte la profondeur de pénétration (courtes longueurs d'onde), permettrait de réduire la quantité de matériau (Si) nécessaire à la fabrication des photopiles cristallines dédiées à une application spécifique d'éclairage et réduirait aussi le coût de fabrication et le prix de revente.

## REFERENCES

- [1] S. R. Dhariwal, (1988). Photocurrent and Photovoltage From Polycrystalline p-n Junction Solar Cells Solar Cells, Vol.25. Pp.223- 233.
- [2] P. K. BASU and S. N. SINGH, (1994) On The Determination of Minority Carrier Diffusion Length in the Base Region of n+-p-p+ Silicon Solar Cells Using Photoresponse Methods. Solar Energy Materials and Solar Cells 33, pp.317-329
- [3] Cuevas, A., Fossum, J.G. and Young, R.T. (1985) Influence of the Dopant Density Profile on Minority-Carrier Current in Shallow, Heavily Doped Emitters of Silicon Bipolar Devices. Solid State Electronics, 28, pp.247-254. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90005-X)
- [4] Moustapha Thiame, Alassane Diene, Boureima Seibou, Cheikh Tidiane Sarr, Mohamed Lemine Ould Cheikh, Ibrahima Diatta, Mayoro Dieye, Youssou Traore, Gregoire Sissoko (2017) 3D Study of a Bifacial Polycrystalline Silicon Solar Cell Back Surface Illuminated: Influence of Grain Size and Recombination Velocity. Journal of Scientific and Engineering Research, 4 (1), pp.135-145 [www.jsaer.com](http://www.jsaer.com)
- [5] K.Rajkanan, R. Singh and J. Schewchun (1979), Solid state electronics, Vol. 22, pp. 793-795.
- [6] M. A. Green, Solar cells operating principles technology and system applications (1982). By Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N J 07632.
- [7] J. G. Fossum and E. L. Burgess, (1978). High efficiency p+-n-n+ back-surface-field solar cells, Appl. Phys. Lett.33, pp.238-240
- [8] De Vischere, P. (1986) Comment on G. J. Rees. Surface Recombination Velocity-A Useful Concept. Solid State Electronics, 29, 1161-1164. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(86\)90059-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90059-6)
- [9] Donolato C. 1999. Effective Diffusion Length of Multicrystalline Solar Cells. Solid State Phenomena. 67-68, 75-80.
- [10] Arora J. D, Singh S. N. And Mathur P. C. (1981) Surface Recombination Effects on the Performance of n+-p Step and Diffused Junction Silicon Solar Cells. Solid State Electronics. 24, 739-747. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90055-1).

- [11] Sissoko, G., Sivoththanam, S., Rodot, M. And Mialhe, P. (1992) Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOCVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, pp.352-354.
- [12] Sissoko, G., Museruka, C., Corr ea, A., Gaye, I. And Ndiaye, A.L. (1996) Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. World Renewable Energy Congress, Pergamon, Part III, pp.1487-1490.
- [13] Y. L. B. Bocande, A. Correa, I. Gaye, M. L. Sow and G. Sissoko. (1994) Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells. Renewable Energy, vol 5, part III, pp. 1698-1700, Pergamon, 0960-1481
- [14] J. Dugas, (1994) 3D modelling of a reverse cell Made with improved multicrystalline silicon wafers. Solar Energy Materials and Solar Cells 32, pp71-88
- [15] Nzonzolo, D sir  Lilonga-Boyenga, Camille Nziengui Mabika, Gr goire Sissoko (2016) Two-Dimensional Finite Element Method Analysis Effect of the Recombination Velocity at the Grain Boundaries on the Characteristics of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. Circuits and Systems, 7, 4186-4200 <http://www.scirp.org/journal/cs>
- [16] J. F. Wise (1970). Vertical junction hardened solar cell. U. S Patent 3, p 690-953
- [17] B. Mazhari and H. Morko  (1993) Theoretical study of a parallel vertical multi-junction silicon, J. App. Phys. 73 (11), pp. 7509-7514
- [18] Terheiden, B., Hahn, G., Fath, P. And Bucher, E. (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, pp.1377-1380.
- [19] R. A. Sinton and P. M. Swanson n  (1987). An optimization study of Si point contact concentration. 15th. IEEE Photov. Spect. (USA), pp. 1207-1208.
- [20] NORIAKI HONMA and CHUSUKE MUNAKATA (1987) Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 26, No12, pp2033-2036
- [21] E. Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs, R. Mertens (1991). The influence of surface recombination on the limiting efficiency and optimum thickness of silicon solar cells. 10th European photovoltaic solar energy conference Lisbon, portugal-pp.66-67.
- [22] Gueye, M., Diallo, H.L., Moustapha, A.K.M., Traore, Y., Diatta, I. And Sissoko, G. (2018) Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. World Journal of Condensed Matter Physics, 8, 185-196. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2018.84013>
- [23] E. D. Stokes and T. L. Chu, (1977) Diffusion Lengths in Solar Cells From Short-Circuit Current Measurements » Applied Physics Letters, Vol. 30, No8, pp.425-426
- [24] Diasse, O., Diao, A., Ly, I., Diouf, M.S., Diatta, I., Mane, R., Traore, Y. And Sissoko, G. (2018) Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. Journal of Modern Physics, 9, 189-201. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
- [25] G. Sissoko, E. Nan ma, A. Corr ea, P. M. Biteye, M.Adj, A. L. Ndiaye, (1998). Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V Characteristic. Renewable Energy, vol-3, pp.1848-51-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#.
- [26] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakias, (1994) Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. Appl. Phys. Lett. 64 (15), pp.2007-2009
- [27] Amadou Diao, Mamadou Wade, Moustapha Thiame, Gr goire Sissoko, (2017). Bifacial Silicon Solar Cell Steady Photoconductivity under Constant Magnetic Field and Junction Recombination Velocity Effects. Journal of Modern Physics, 8, 2200-2208
- [28] Barro, F. I., A S Maiga, Wereme A, Sissoko G (2010). Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light; Phys. Chem. News 56 76-84
- [29] Carsten Schinke, David Hinken, Karsten Bothe, Christian Ulzh fer, Ashley Milsted, janschmidt, Rolf Brendel (2011) Determination of the Collection Diffusion Length by Electroluminescence Imaging Energy Procedia, 8, pp.147 – 152
- [30] Kalidou Mamadou SY, Alassane Diene, S ni Tamba, Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Diatta, Mayoro Dieye, Youssou Traore, Gr goire Sissoko (2016). Effect of temperature on transient decay induced by charge removal of a silicon solar cell under constant illumination. Journal of Scientific and Engineering Research, 3 (6), p.433-445 [www.jsaer.com](http://www.jsaer.com)
- [31] R. R. Vardanyan, U. Kerst, P. Wawer, M.E. Nell, H.G. Wagemann (1998) 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, 6-10, Vienna, Austria, pp. 191-193
- [32] Th. Flohr and R. Helbig, (1989) Determination of minority-carrier lifetime and surface recombination velocity by Optical-Beam-Induced- Current measurements at different light wavelengths. J. Appl. Phys. Vol.66 (7), pp 3060 – 3065.
- [33] Ba, M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. And Sissoko, G. (2019) Base Thickness Optimization of a (n+-p-p+) Silicon Solar Cell in Static Mode under Irradiation of Charged Particles. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 11, 173-185. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- [34] M. Kunst, G. Muller, R. Schmidt and H. Wetzal (1988) Surface and volume decay processes in semiconductors studied by contactless transient photoconductivity measurements. Appl. Phys., Vol. 46, (1988), pp 77-85

- [35] I. Diatta, I. Ly, M. Wade, M. S. Diouf, S. Mbodji, G. Sissoko, (2017) Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 6, pp.261-268
- [36] E. Gaubas and J. Vanhellemont (1996). A simple technique for the separation of bulk and surface recombination parameters in silicon. *J. Appl. Phys.* 80 (11), pp. 6293-6297.
- [37] S. C. Jain, (1981) Theory of photo induced open circuit voltage decay in a solar cell. *Solid-State Electronics*, Vol. 24, pp. 179-183
- [38] U. C. Ray and S. K. Agarwal, (1988). Wavelength Dependence of Short-Circuit Current Decay in Solar Cells. *J. Appl. Phys.* 63 (2), pp.547-549
- [39] Nam, L., Rodot, M., Nijs, J., Ghannam, M. And Coppys, J. (1992) Réponse spectrale de photopiles de haut rendement au silicium multicristalline. *Journal de Physique III*, EDP Sciences, 2, pp.1305-1316. <https://doi.org/10.1051/jp3:1992108>
- [40] Ohshima, T., Sumita, T., Imaizumi, M., Kawakita, S., Shimazaki, K., Kuwajima, S., Ohi, A. And Itoh, H. (2005) Evaluation of the Electrical Characteristics of III-V Compounds Solar Cells Irradiated with Protons at Low Temperatures. *Proceedings of the 31 st IEEE Photovoltaic Specialists Conference Lake Buena Vista*, pp.806-809. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488255>
- [41] Diallo, H.L., Seidou, A., Maiga, Wereme, A. And Sissoko, G. (2008) New Approach of Both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. *The European Physical Journal Applied Physics*, 42, pp.203-211. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [42] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and Minority-Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, pp.238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>
- [43] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroda, D.K. (1989) Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid State Electronics*, 32, pp.479-483. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [44] Fatoumata Baldé, Hawa Ly Diallo, Hamet Yoro Ba, Youssou Traore, Ibrahima Diatta, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko (2018) External electric field as applied to determine silicon solar cell space charge region width. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5 (10), pp.252-259. [www.jsaer.com](http://www.jsaer.com)
- [45] G. Sissoko, B. Dieng, A. Correa, M. Adj, D. Azilinson, (1998) Silicon Solar Cell Space Charge Region Width Determination By A Study In Modelling. *World Renewable Energy Congress*, vol-3, pp.1852-1855-Elsevier Science Ltd, 0960-1481.
- [46] Antilla O. J., Hahn S. K. (1993) Study on surface photovoltage measurement of long diffusion length silicon: simulation results. *J. Appl. Phys.* 74 (1), pp.558-569.
- [47] Masse Samba Diop, Hamet Yoro Ba, Ndeye Thiam, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Mamadou Lamine Ba, El Hadji Sow, Oulymata Mballo, Grégoire Sissoko, (2019) Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 9, pp.102-111.
- [48] Nouh Mohamed Moctar Ould Mohamed, Ousmane Sow, Sega Gueye, Youssou Traore, Ibrahima Diatta, Amary Thiam, Mamour Amadou Ba, Richard Mane, Ibrahima Ly, Gregoire Sissoko, (2019) Influence of Both Magnetic Field and Temperature on Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination. *Journal of Modern Physics*, 10, pp.1596-1605 <https://www.scirp.org/journal/jmp>
- [49] Maimouna Mint ELY, Ndeye Thiam, Mor Ndiaye, Youssou Traore, Richard Mane, El hadji Sow, Oulimata Mballo, Masse Samba Dieng, Cheikh Tidiane Sarr, Ibrahima Ly, Gregoire Sissoko, (2020) Surface recombination velocity concept as applied to determinate back surface illuminated silicon solar cell base optimum thickness, under temperature and external magnetic field effects. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 7 (2), pp.69-77, [www.jsaer.com](http://www.jsaer.com)
- [50] Dibor Faye, Sega Gueye, Mor Ndiaye, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Masse Samba Diop, Gora Diop, Amadou Diao, Gregoire Sissoko (2020) Lamella Silicon Solar Cell under Both Temperature and Magnetic Field: Width Optimum Determination. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 12, 43-55 <https://www.scirp.org/journal/jemaa>
- [51] Gora Diop, Hamet Yoro Ba, Ndeye Thiam, Youssou Traore, Babou Dione, Mamour Amadou Ba, Pape Diop, Masse Samba Diop, Oulimata Mballo and Gregoire Sissoko, (2019) Base thickness optimization of a vertical series junction silicon solar cell under magnetic field by the concept of back surface recombination velocity of minority carrier. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* Vol. 14, No. 23, pp.4078-4085.