

Concept de la vitesse de recombinaison surfacique appliqué à la détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile au silicium avec effet du taux de dopage

[Surface recombination velocity concept as applied to determinate silicon solar cell base optimum thickness with doping level effect]

Masse Samba DIOP¹, Hamet Yoro BA², Ibrahima DIATTA¹, Youssou TRAORE¹, Marcel Sitor DIOUF¹, El Hadji SOW¹, Oulymata MBALLO¹, and Gregoire SISSOKO¹

¹Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Énergie Solaire, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal

²Ecole Polytechnique de Thiès, Département Génie Électromécanique, Sénégal

Copyright © 2019 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: New expressions of back surface recombination of excess minority carriers in the base of silicon solar are expressed dependent of both, the thickness and the diffusion coefficient which is in relationship with the doping rate.

KEYWORDS: Silicon solar cell, Surface recombination velocity, Diffusion coefficient, Doping rate, base thickness.

RÉSUMÉ: De nouvelles expressions de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière de la base d'une photopile au silicium sont exprimées, en fonction de l'épaisseur et du coefficient de diffusion qui est relié au taux de dopage.

MOTS-CLEFS: Photopile au silicium, Vitesse surfacique de recombinaison, Coefficient de diffusion, Taux de dopage, Epaisseur de la base.

1 INTRODUCTION

Le contrôle de qualité de la photopile vise à optimiser les différentes étapes de sa fabrication à travers, le taux de dopage respectivement dans l'émetteur et la base (Nb(D)), la cristallinité du matériau et son orientation, ainsi que les épaisseurs [1-5]. Ces différents paramètres influencent les recombinaisons en volume et en surface des porteurs minoritaires de charge [6; 7] dans la photopile.

Ainsi les recombinaisons des porteurs minoritaires de charge se situent :

- i) Dans le volume, à travers la durée de vie (τ) et la longueur de diffusion(L) reliées par la relation d'Einstein. [8],
- ii) Sur la surface émetteur-base (jonction) [9,10], qui indique le point de fonctionnement (du circuit ouvert au court-circuit) [11 ; 12]
- iii) Face arrière de la base (p/p+) [13- 16]
- iv) Aux joints de grains dans le modèle 3D [17,18]. Le but recherché est de découpler la recombinaison des porteurs minoritaires de charge dans le volume, de celle apparaissant sur les surfaces [19].

Les recombinaisons des porteurs minoritaires de charge sont étudiées dans le but d'évaluer leur effet sur la réponse en courant ou tension de la photopile, sous différentes conditions :

- i) D'éclairement [20, 21] et de niveau d'éclairement n [22,23, 24] ou sous obscurité [25]
- ii) De régime de fonctionnement notamment, en statique [26] et dynamique fréquentiel [27] ou transitoire [28 ; 29, 30]).
- iii) Externes impliquant l'action d'un champ électromagnétique [31,32], ou d'une irradiation de particules nucléaires (électrons, protons), [12] et d'une variation de température [33]

Dans ce travail, les paramètres phénoménologiques, tels que les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charges en volume (τ) à la jonction émetteur-base (S_f) et en face arrière (S_b) de la base d'épaisseur (H), sont étudiées pour extraire, l'épaisseur optimum H , de la base de la photopile au silicium cristallin, conduisant au courant de court-circuit maximum, en fonction du taux de dopage $N_b(D)$ induisant le coefficient de diffusion (D), pour de faible niveau d'injection des porteurs de charge exprimé, à travers le niveau d'éclairement n .

2 ETUDE THEORIQUE

2.1 PRÉSENTATION DE LA PHOTOPILE

La figure 1 représente une photopile au silicium de type $n^+ - p - p^+$ sous éclairissement polychromatique [34, 35], par l'émetteur (n^+), à travers les grilles collectrices. La zone de charge d'espace, en $x = 0$, (ZCE), constitue la jonction ($n^+ - p$), permettant la séparation des paires électrons-trous photogénérées, soumis à une vitesse (S_f), appelée vitesse de recombinaison à la jonction [9, 10, 11]. La face arrière correspond à une zone de taux de dopage (p^+) plus élevé, en $x = H$, produit un champ électrique arrière (BSF), qui permet le renvoi des charges minoritaires vers la jonction, et caractérisée par une vitesse de recombinaison (S_b) en cette face arrière [10, 16, 20].

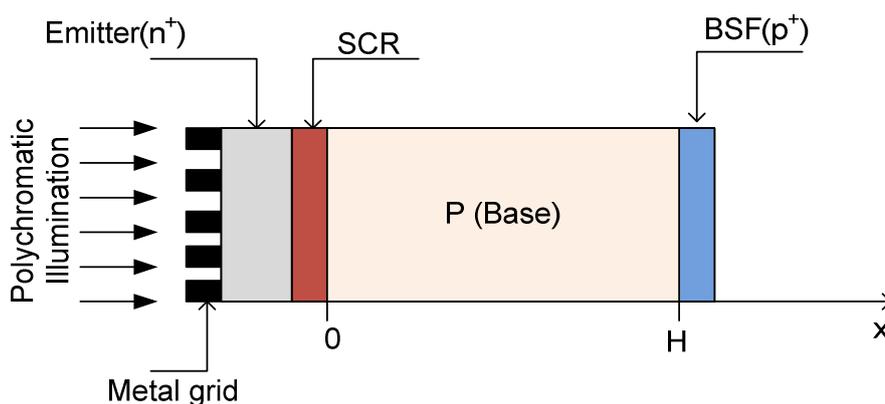


Fig. 1. Structure d'une photopile ($n^+ - p - p^+$) éclairée par l'émetteur

2.2 THÉORIE

Lorsque la photopile est sous éclairissement, la densité $\delta(x)$ des porteurs de charge photogénérés dans la base sous faible injection, est gouvernée par l'équation de continuité suivante.

$$D \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{\tau} = -G(x) \tag{1}$$

τ et D sont, respectivement, la durée de vie et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge de charge en excès dans la base, reliées par la relation d'Einstein

$L^2(N_b) = D(N_b) * \tau(N_b)$ avec L la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en excès. Le coefficient de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaire de charge en excès sont reliés au taux de dopage de la base (N_b en cm^{-3}) par les relations empiriques suivantes [36 ;37]:

$$D(Nb) = \frac{1350.V_T}{\sqrt{1 + \frac{81.Nb}{Nb+3.2.10^{-18}}}} \text{ (cm}^2\text{/s)} \quad (2)$$

$$V_T = \frac{k_b.T}{q} \quad (3)$$

T est la température de la photopile, $k_b = 1,43 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann et $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ la charge élémentaire

$$\tau(Nb) = \frac{12}{1 + \frac{Nb}{5.10^{16}}} \text{ (}\mu\text{s)} \quad (4)$$

$\delta(x)$ la densité des porteurs de charge photogenerés dans la base, est produit par le taux de génération [38], exprimé par l'équation suivante :

$$G(x) = n \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (5)$$

Où n est le nombre de soleil ou niveau d'éclairement, indiquant la concentration de lumière [39].

a_i et b_i sont des coefficients obtenus à partir de la modélisation du rayonnement sous A.M1,5

L'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base est donnée par la résolution de l'équation de continuité et s'écrit par :

$$\delta(x, Sf, n, H, D) = A(Sf, n, H, D) \cdot \cosh\left(\frac{x}{L(D)}\right) + B(Sf, n, H, D) \cdot \sinh\left(\frac{x}{L(D)}\right) + \sum_{i=1}^3 K(n, D) \cdot e^{-b_i x} \quad (6)$$

Où

$$K(n, D) = \frac{n a_i L^2(D)}{D[1 - (L(D) \cdot b_i)^2]} \quad (7)$$

2.3 CONDITIONS AUX LIMITES

$A(Sf, n, H, D)$ et $B(Sf, n, H, D)$ sont des coefficients déterminés à partir des conditions aux limites qui introduisent respectivement, les vitesses de recombinaison surfaciques à la jonction (Sf) et en face arrière (Sb) des porteurs minoritaires de charge.

➤ A la jonction $x=0$ (ZCE)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, Sf, n, H, D)}{\partial x} \right|_{x=0} = Sf * \delta(0, Sf, n, H, D) \quad (8)$$

Sf indique la vitesse de passage des porteurs de charge à travers la jonction, vers l'émetteur. Cette vitesse de passage des porteurs minoritaires est gouvernée par la résistance de la charge externe de la photopile qui impose le point de fonctionnement [9, 10, 13]. Ainsi les porteurs de charge ayant traversé et non collectés par les grilles, constituent les pertes qui induisent, la résistance shunt [12, 40] qui impose une vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge, définissant le circuit ouvert à la photopile.

➤ A la face arrière $x=H$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, Sf, n, D)}{\partial x} \right|_{x=H} = -Sb * \delta(H, Sf, n, D) \quad (9)$$

Sb est la vitesse de recombinaison à la face arrière des porteurs minoritaires de charge en excès [25 ; 26 ; 28], en $x = H$, où existe un champ électrique arrière ($p/p+$, low-high jonction), qui refoule les charges électriques, vers la jonction (ZCE), pour être collecté. Les premières photopiles n'avaient pas cette technologie, par conséquent le contact était de type ohmique, et la vitesse de recombinaison Sb alors, était très élevée. A cette surface où existe une barrière de potentiel, une partie des porteurs minoritaires peut franchir cette jonction $p/p+$ [34].

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 LA DENSITE DE PHOTOCOURANT

La loi de Fick nous permet d'obtenir l'expression de la densité de photocourant.

Cette expression est donnée par l'équation suivante :

$$J_{ph}(Sf, n, H, D) = qD * \left. \frac{\partial \delta(x, Sf, n, H, D)}{\partial x} \right|_{x=0} = qD \left[\frac{B(Sf, n, H, D)}{L(D)} - \sum_{i=1}^3 b_i K(n, D) \right] \quad (10)$$

La figure 2 donne le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction pour différentes valeurs du niveau d'éclairement.

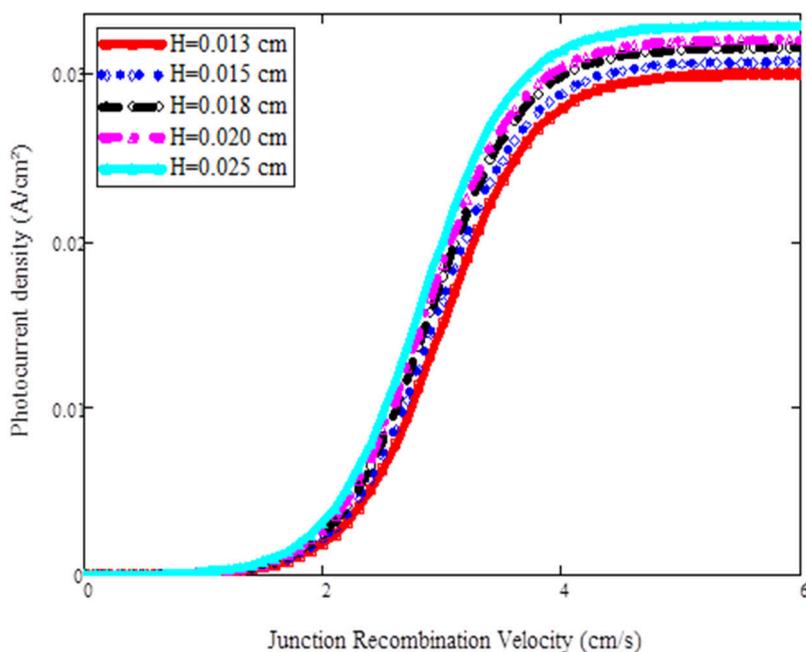


Fig. 2. Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents épaisseur, $n=1.1$, $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$

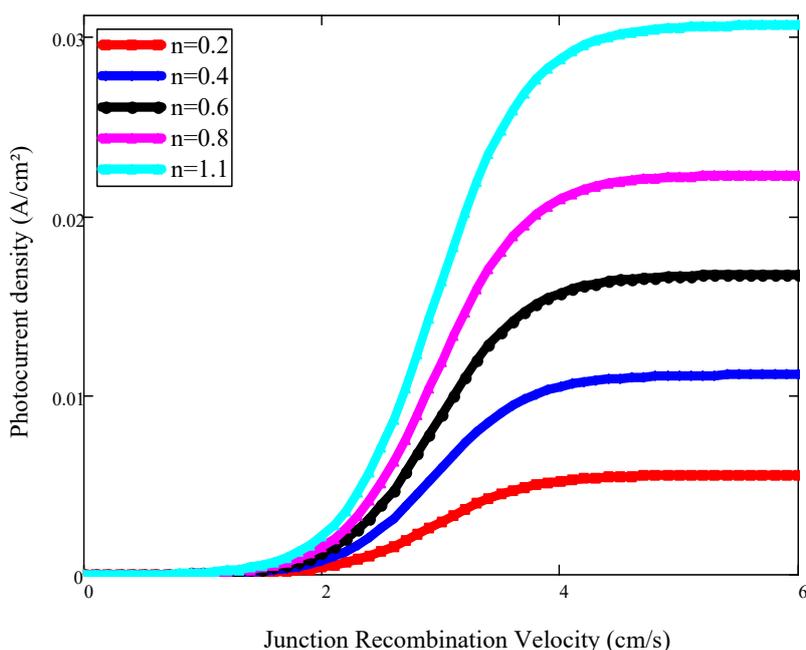


Fig. 3. Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents niveaux d'éclairement, $H=0.0144$ cm

Pour des valeurs de $Sf < 10^2$ cm/s, le photocourant est pratiquement nul (selon le niveau d'éclairement), ce qui correspond à un point de fonctionnement de circuit ouvert de la photopile. Pour l'intervalle de vitesse de recombinaison allant de 10^2 cm/s à environ 10^4 ou 10^5 cm/s, selon le niveau d'éclairement (n), le photocourant est croissant. Au-delà de 10^5 cm/s, le photocourant est pratiquement constant avec Sf et correspond au courant de court-circuit J_{phsc} , qui est un palier. Ce palier croit avec n , le niveau d'éclairement.

3.2 INFLUENCE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION D

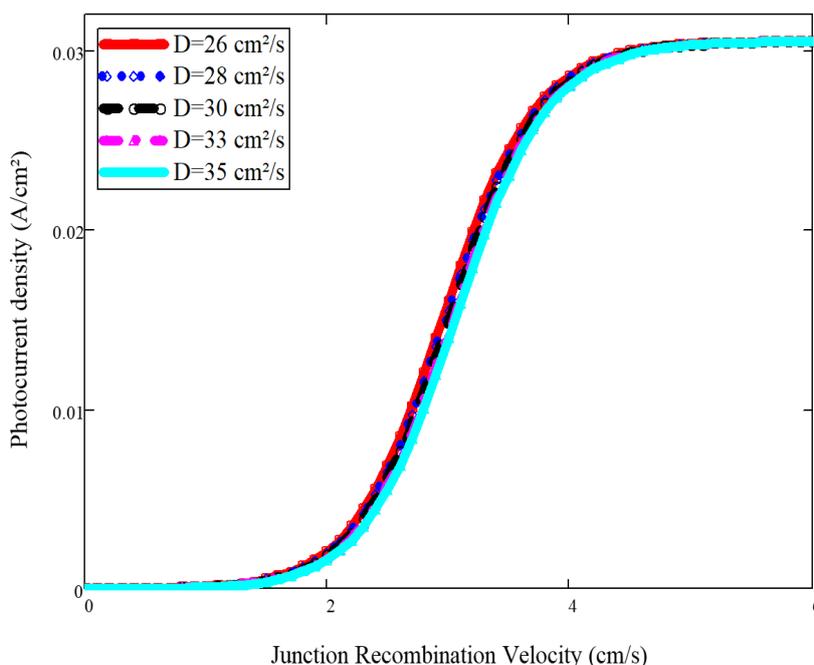


Fig. 4. Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différents coefficient de diffusion, $H = 0.0144$ cm, $n=1.1$

4 VITESSE DE RECOMBINAISON EN FACE ARRIERE

Les figures 2, 3 et 4 indiquent un palier quels que soient, D, H, et n, ainsi la dérivée de l'expression de la densité de photocourant relativement à la vitesse de recombinaison, s'annule [10;13; 17, 26] et s'écrit donc :

$$\frac{\partial J_{ph}(S_f, n, H, D)}{\partial S_f} = 0 \tag{11}$$

La résolution de cette équation conduit aux expressions suivantes $Sb1(b_i, H, D)$ et $Sb2(H, D)$ de la vitesse de recombinaison en face arrière.

$$Sb1(H, D) = \sum_{i=1}^3 \frac{D * [b_i (\cosh(\frac{H}{L(D)}) - e^{-b_i H}) - \frac{1}{L(D)} \sinh(\frac{H}{L(D)})]}{\cosh(\frac{H}{L(D)}) - e^{-b_i H} - L b_i \sinh(\frac{H}{L(D)})} \tag{12}$$

Où apparait l'effet de l'absorption de la lumière dans le matériau à travers les coefficients (b_i) et conduit à une vitesse de génération pour ($b_i H \gg 1$). $Sb1$ indique la vitesse des porteurs minoritaires de charge refoulés vers la jonction n^+/p , pour participer au photocourant.

$$Sb2(H, D) = -\frac{D}{L(D)} * \tanh\left(\frac{H}{L(D)}\right) \tag{13}$$

$Sb2 < 0$, indique la vitesse de traversée de la jonction p/p^+ , du flux des porteurs minoritaires vers la partie p^+ (loi de FICK), justifiant le potentiel induisant le champ électrique en face arrière [34]. Elle représente la vitesse intrinsèque de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction p/p^+ .

Les vitesses $Sb1$ et $Sb2$ observent une asymptote dans les conditions où $H/L \gg 1$, égale à D/L , représentant la vitesse de diffusion [10 ; 13 ; 26].

La figure 5 donne le profil des deux vitesses de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile, pour différentes valeurs du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires dans la base.

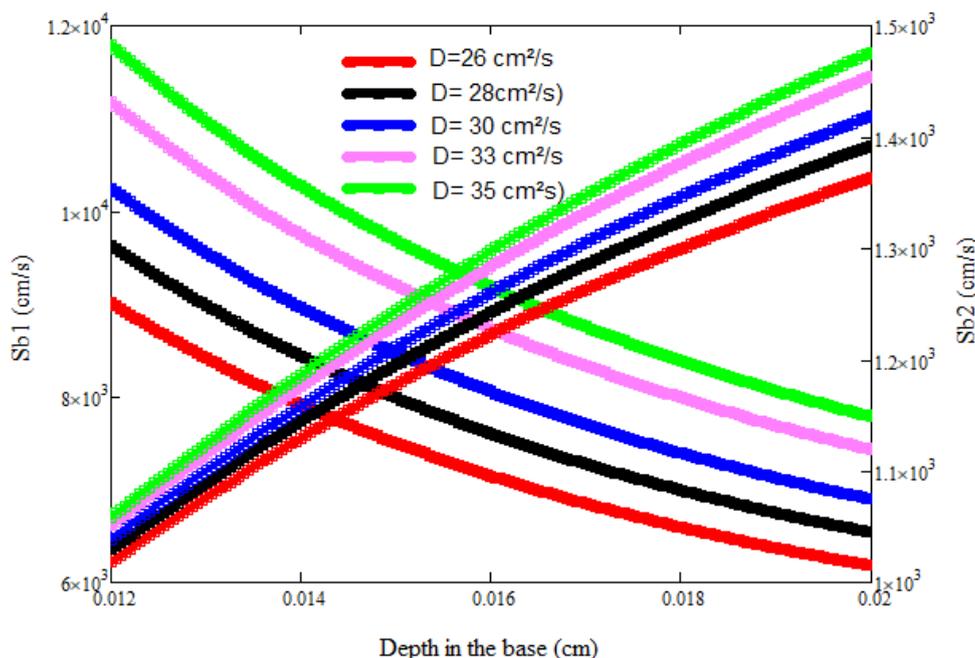


Fig. 5. Vitesses de recombinaison à la face arrière en fonction de l'épaisseur de la base de la photopile.

L'intersection des courbes $Sb1$ et $Sb2$, donne l'épaisseur optimum de la base de la photopile pour chaque coefficient de diffusion, recherchée par d'autres auteurs [41] supposant des vitesses fixes de recombinaison.

Le tableau 1, résume la variation de l'épaisseur de la base de la photopile pour chaque coefficient de diffusion et les courants respectifs de court-circuit J_{sc1} et J_{sc2} qui restent maximum et constant.

Tableau 1. Valeur de l'épaisseur de la base H pour différents coefficients de diffusion

Nb(cm ⁻³)	3.283.10 ¹⁶	2.274.10 ¹⁶	1.464.10 ¹⁶	5.196.10 ¹⁵	2.261.10 ¹⁴
D(cm ² /s)	26	28	30	33	36
H(cm)	0.0143	0.0146	0.0149	0.0154	0.0157
Jsc1(A/cm ²)	0.03	0.031	0.031	0.031	0.031
Jsc2(A/cm ²)	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
Sb1(cm)	7734.9	8139.4	8505	9003	9386.9
Sb2(cm)	1144.6	11783	1208.7	1250.2	1282.2

La figure 6 donne la représentation de l'épaisseur de la base de la photopile nécessaire pour chaque cas du coefficient de diffusion.

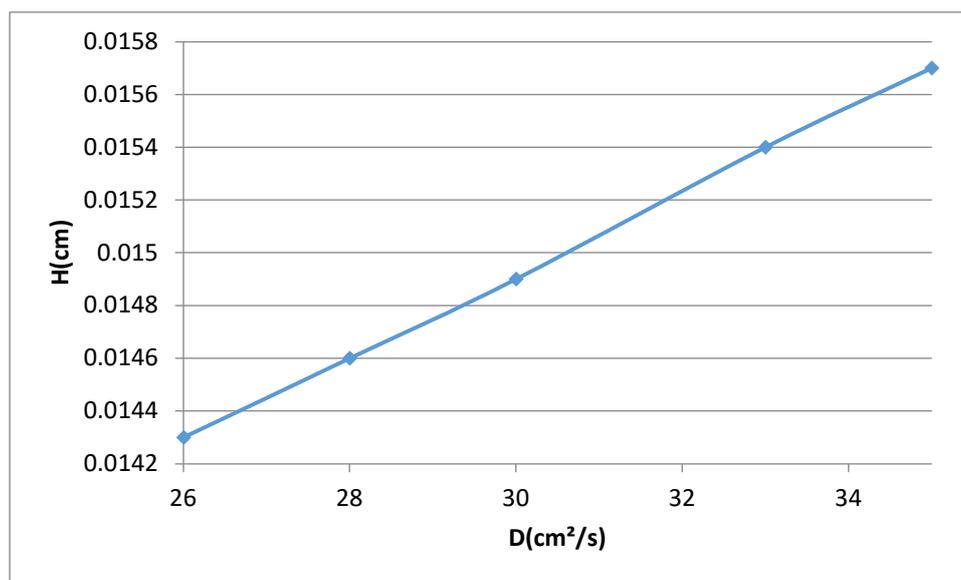


Fig. 6. Profondeur H en fonction du coefficient de diffusion D

La corrélation entre le coefficient de diffusion et l'épaisseur optimum de la base est établie pour $26 \text{ cm}^2/\text{s} < D < 35 \text{ cm}^2/\text{s}$:

$$H(\text{cm}) = [2 \cdot D(\text{Nb}) + 102] \cdot 10^{-4} \quad (14)$$

Elle permet de réaliser la photopile au silicium pour un dopage donné de la base [42, 43].

5 CONCLUSION

Dans ce travail, une méthode de détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile au silicium, par la technique de l'intersection des vitesses de recombinaison en face arrière est proposée.

Les courbes de calibration du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction, sont produites :

- i) Pour un niveau d'éclairement n,
- ii) Pour une épaisseur h,
- iii) Pour différents coefficients de diffusion, définis par le taux de dopage de la base Nb(D).

Ainsi sont déduites les vitesses de recombinaison en face arrière, dépendantes de l'épaisseur de la base et du coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge.

L'étude du profil de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière, à travers ces deux expressions obtenues, a permis d'établir l'épaisseur optimum de la base, associée un taux de dopage spécifique de la base conduisant à un courant de court-circuit élevé, à travers une corrélation mathématique.

REFERENCES

- [1] 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, N°12, pp. 2033-2036.
- [2] ANDRES CUEVAS, JERRY G. FOSSUM and ROSA T. YOUNG, (1985), Influence of the dopant density profile on minority-carrier current in shallow, heavily doped emitters of silicon bipolar devices: *Solid-St. Electron.* 28 (3), pp.247-254.
- [3] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakis, (1994) Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 64(15), pp. 2007-2009.
- [4] M.L.Lovejoy, M.R.Melloch, R.K.Ahrenkiel and M.S.Lundstrom , (1992), Measurement considerations for zero-field time-of-flight studies of minority carrier diffusion in III-V semiconductors. *Solid-State Electronics*, Vol. 35, N°3, pp. 251-259.
- [5] J. DUCAS; (1994), 3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 32, pp. 71-88.
- [6] N. F. Mott; Recombination; a survey; (1978). *Solid-State Electronics*, Vol. 21, pp 1275-1280.
- [7] Arnost Neugroschel, (1981), Determination of lifetimes and recombination currents in p-n junction solar cells, diodes, and transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 29(1) pp. 108-115.
- [8] P.De Vischere (1986) Comment on G.J. Rees. "Surface recombination velocity-a useful concept?" *Solid-State Electronics*. Vol. 29(1) pp. 1161-64.
- [9] G. Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot, P. Mialhe, (1992), Constant illumination-induced open circuit voltage decay (CIOCVD) method, as applied to high efficiency Si Solar cells for bulk and back surface characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, Switzerland, pp. 352-54.
- [10] 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.
- [11] Ching-Yuang Wu and Wen-Zen-Shen , (1980), The open-circuit voltage of back-surface-field (BSF) p-n junction solar cells in concentrated sunlight. *Solid-State Electronics*, Vol. 23, pp 209-216.
- [12] El Hadji Ndiaye, Gokhan Sahin, Amary Thiam, Moustapha Dieng, Hawa Ly Diallo, Mor Ndiaye, Grégoire Sissoko, (2015), Study Of The Intrinsic Recombination Velocity At The Junction Of Silicon Solar Under Frequency Modulation And Irradiation. *Journal of Applied Mathematics and Physics* 03(11):1522-1535.
- [13] G. Sissoko, E. Nanéma, A. L. Ndiaye, Y. L. B. Bocandé and M. Adj, (1996), Minority carrier diffusion length measurement in silicon solar cell under constant white bias light. *Renewable Energy*, Vol 3, pp. 1594-1597.
- [14] D.R. Dhariwal, R. Gadre, (1983), Modified drift field model for high-low transition in solar cells. *Solid-State Electronics*, Vol. 26, N°11, pp 1083-1088.
- [15] J. R. Hauser, P. M. Dunbar, (1975), Minority carriers reflecting properties of semiconductor high-low junctions, *Solid-State Electron.*, vol. 18, pp. 715-716.
- [16] Fossum, J.G., (1977), Physical operation of back-surface-field silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron Dev.* 2, 322-325.
- [17] H. Ly Diallo, A., S. Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (2008) New approach of both junction and back surface recombination velocity in a 3D modelling study of a polycrystalline silicon solar cell. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 42: 203-211.
- [18] H. El. Ghitani and S. Martinuzzi, (1989) Influence of dislocations on electrical properties of large grained, polycrystalline silicon cells. *J. App. Phys.* 66(4), pp. 1717-1726.
- [19] Albert Zondervan, Leendert A. Verhoef, And Fredrik A. Lindholm, (1988), Measurement Circuits for Silicon-Diode and Solar Cells Lifetime and Surface Recombination Velocity by Electrical Short-Circuit Current Delay, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 35, N°1, pp 85-88.
- [20] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corrêa, I. Gaye and A. L. Ndiaye, (1996), Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell, *Renewable Energy*. 3pp. 1487-1490.
- [21] 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.* 66 (7), pp. 3060-3065.
- [22] M. R. Murti and K. V. Reddy, (1991), Recombination properties of photogenerated minority carriers in polycrystalline silicon, *J. Appl. Phys.* Vol. 70, N°7, pp. 3683-3688.
- [23] S.R.Dhariwal, R.K.Mathur, D.R. Mehrotra, S.Mittal, (1983), The physics of p-n junction solar cells operated under concentrated sunlight, *Solar Cells* Volume 8, Issue 2, Pages 137-155.
- [24] J. Oualid, C. M. Singal, (1984), Influence of illumination on the grain boundaries recombination velocity in silicon, *J. Appl. Phys.* 55(4), 15, pp 1195-1205.
- [25] B. H. Rose and H. T. Weaver, (1983), Determination of effective surface recombination velocity and minority-carrier lifetime in high-efficiency Si solar cells. *J. Appl. Phys.* 54. Pp 238-247.

- [26] Ousmane Diasse, Amadou Diao, Ibrahima Ly, Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Youssou Traore And Gregoire Sissoko(2018), Back surface recombination velocity modeling in white biased silicon solar cell under steady state. *Journal of Modern Physics*, 9, 189-201
- [27] Matar Gueye, Hawa Ly Diallo, Attoumane Mamadou Moustapha, Youssou Traore, Ibrahima Diatta and Gregoire Sissoko, (2018), Ac Recombination velocity in a lamella silicon Solar Cell. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 8, 185-196,
- [28] Fredrik A. Lindholm, Juin J. Liou, Arnost Neugroschel, and Taewon W. Jung, (1987) Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.34, N°2 , pp277-283
- [29] M. Kunst, G. Muller, R. Schmidt and H. Wetzel, (1988), Surface and volume decay processes in semiconductors studied by contactless transient photoconductivity measurements. *Appl. Phys.*, Vol. 46, pp 77-85
- [30] F. I. Barro, A. Seidou Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (2010) Determination of recombination parameters in the base of a bifacial silicon solar cell under constant multispectral light. *Physical and Chemical News*, 56, pp. 76-84.
- [31] Amadou Diao , Mamadou Wade, Moustapha Thiame, Grégoire Sissoko, 2017 Bifacial Silicon Solar Cell Steady Photoconductivity under Constant Magnetic Field and Junction Recombination Velocity Effects. *Journal of Modern Physics*, 8, 2200-2208
- [32] Mamadou Lamine Ba, Hawa Ly Diallo, Hamet Yoro Ba, Youssou Traore, Ibrahima Diatta, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko, (2018) Irradiation Energy Effect on an illuminated silicon solar cell: maximum power point Determination. *Journal of Modern Physics*, 9, 2141-2155, <http://www.scirp.org/journal/jmp>
- [33] P. Singh, S.N. Singh, M. Lal, M. Husain (2008). Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, pp: 1611–1616
- [34] Fossum, burgess ; F.A. Lindholm (1978) Silicon solar cell designs based on physical behavior in concentrated sunlight, *Solid state Electronics*, Vol 21 pp.729-737
- [35] N. Le Quang, M. Rodot, J. Nijs, M. Ghannam and J. Coppye, (1992) Réponse spectrale de photopiles de haut rendement au silicium multicristallin. *J. Phys. III France* 2, pp 1305-1316.
- [36] J.G.Fossum (1976); Computer aided-numerical analysis of silicon solar cells. *Solid state Electronics*, Vol. 19 , 269-277
- [37] J.G.Fossum D.S. Lee(1952), A physical model for the dependence of carrier lifetime on doping density in nondegenerate silicon. *Solid state Electronics*, Vol. 15 n 8 , 741-47
- [38] J. Furlan, and S. Amon,(1985) Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electron*, 28, pp. 1241–43.
- [39] G.C. Jain, S.N. Singh and Kotnala(1983). Diffusion length determination in n+pp+ based silicon solar cells from the intensity dependence of the short circuit for illumination from the p+ side. *Solar cells* pp. 8239-48
- [40] G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corrêa, 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
- [41] E. Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs, R. Mertens (8-12 APRIL 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
- [42] D.L. Meier; J. M. Hwang and B. Campbell (1988). The effect of doping density and injection carrier lifetime as applied to bifacial dendrite webs silicon solar cell. *IEEE. Trans: on elect. Dev.* Vol.E.D-35, n. 1, pp.70-79.
- [43] J.E. Guren, J. Del Alamo, A. Luque (1980). Optimization of p+ doping level of n+pp+ bifacial BSF solar cells by implantation. *Electron Letters* Vol, n. 16. Pp. 633-34