



RESEARCH ARTICLE

ETUDE A 3D DE LA PHOTOPILE AU SILICIUM POLYCRISTALLIN : OPTIMISATION DU TAUX DE DOPAGE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE LA BASE

Moustapha Thiame^{1,2}, Moussa Camara^{1,2}, Habiboula Lemrabott^{1,3}, Mohamed Lemine Cheikh¹, Segha Gueye^{1,4} and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.
3. Ecole Supérieure Mutinational de Télécommunication-Dakar, Sénégal.
4. Faculte des Sciences et Technologies de l'education et de la Formation-Departement de Physique et Chimie, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 October 2023

Final Accepted: 14 November 2023

Published: December 2023

Key words:-

Photopile, Taux de Dopage, Epaisseur de la Base, Taille de Grain, Vitesse de Recombinaison

Abstract

Dans ce travail, nous avons proposé une méthode pour déterminer le taux de dopage optimal d'une photopile monofaciale au silicium de type n⁺-p-p⁺, sous éclairage polychromatique de la face avant en utilisant le model de Fossum du coefficient de diffusion dépendant du taux de dopage D_n (N_b). L'expression de la densité de porteurs minoritaires de charge en fonction du taux de dopage et de l'épaisseur de la base est établie. A partir de l'analyse du profil de la densité de porteurs minoritaires de charge à la jonction, en fonction du taux de dopage pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base, le taux de dopage optimal pour chaque valeur de l'épaisseur est déduit. Une corrélation entre l'épaisseur de la base et le taux de dopage optimal est proposée. Elle permet l'élaboration des photopiles de taux de dopage optimal pour chaque épaisseur de la base sans réduire son rendement.

Copy Right, IJAR, 2023,. All rights reserved.

Introduction:-

Le contrôle de qualité [1-8] de la photopile au silicium vise à travers les études théoriques et expérimentales, à optimiser les paramètres suivants:

-phénoménologiques[9-18] intrinsèques au matériau silicium et à la structure de la photopile élaborée, à travers les mécanismes physiques d'absorption-génération, diffusion et de recombinaison des porteurs de charge minoritaires [19-36], que sont : le coefficient de diffusion et de mobilité, la durée de vie, la longueur de diffusion des porteurs minoritaires, le taux de dopage, la taille de grains (g) et les vitesses de recombinaison aux interfaces, (S_g) aux joints de grains, (S_f) à la jonction, et (S_b) à la face arrière. Des expressions reliant ces paramètres ont été établies [37-45].

- géométriques (modèle 1D, 2D et 3D)[19-36] et dimensions des cristaux matériau silicium et des différentes régions qui constituent la photopile. Ce sont les épaisseurs [46-53] de l'émetteur, de la zone de charge d'espace et de la base.

- du modèle électrique [54, 55] équivalent à la photopile, sous obscurité ou sous éclairage (mono ou polychromatique), en régime de fonctionnement statique ou dynamique (fréquentiel ou transitoire). Les expressions

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.

réliant le courant et la tension aux paramètres électriques de la photopile sont décrites selon le nombre de diode. D'autres expressions s'établissent à l'aide de la densité des porteurs minoritaires, reliée aux paramètres phénoménologiques et géométriques, en tenant compte de l'environnement extérieur [23-26, 56] marqué par : - la température, la présence de champ électromagnétique, de particules électriques irradiantes - la modulation de fréquence du signal excitateur optique ou électrique.

L'effet de la diffusion (fonction du taux de dopage) et de l'épaisseur de la base ont été analysés et utilisés à travers le concept des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la surface arrière de la photopile, pour déterminer l'épaisseur optimale de la base de la photopile, pour la production d'un courant optimum et réaliser une économie de matériau [57-66].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet du taux de dopage induisant l'épaisseur optimum de la base, nécessaire pour la fabrication de la photopile. La variation du taux de dopage est assurée par l'expression modélisée par Fossum [22] du coefficient de diffusion dépendant du taux de dopage $D_n(N_b)$. Elle est appliquée à la base d'une photopile monofaciale de type n+-p-p+, sous éclairage polychromatique de la face avant. Ainsi nous allons chercher à établir une corrélation entre l'épaisseur de la base et le taux de dopage optimal.

Etude théorique

Description de la photopile.

Notre étude porte sur une photopile à base de silicium Polycristallin de type (n+/p/p+) sous éclairage polychromatique de la face avant. Nous utilisons le modèle colonnaire à 3D [19-36], comme montre la **figure. 1**. Pour une étude en modélisation à trois dimensions, nous considérerons le modèle colonnaire (**figure.1**) où chaque grain est supposé avoir une forme parallélépipédique régulière.

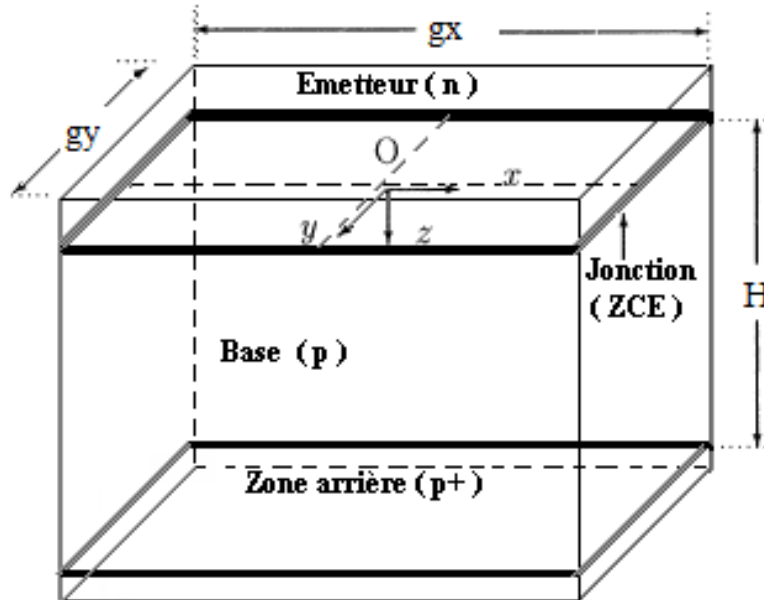


Figure 1:- Schéma d'un grain de la photopile au silicium.

Equation de continuité

L'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge photogénérés $\delta n(x, y, z)$ dans la base est donnée par :

$$\frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \delta n(x, y, z)}{\partial z^2} - \frac{\delta n(x, y, z)}{L_n(N_b)^2} = -\frac{G(z)}{D(N_b)} \quad 1$$

G est le taux de génération des porteurs minoritaires de charge à la profondeur (z) de la base de la photopile éclairée par la face avant [67]:

$$G(z) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad 2$$

Les coefficients a_i et b_i sont obtenues à partir des valeurs tabulées de l'éclairement solaire et de la dépendance du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur d'onde; ces coefficients sont donnés pour AM 1,5.

$D(Nb)$ est le coefficient de diffusion des électrons dans la base en fonction du taux de dopage de la base. Son expression est donnée par [22]:

$$D(Nb) = \frac{1350 \cdot V_T}{\sqrt{1 + 81 \cdot \frac{Nb}{Nb + 3.2 \cdot 10^{18}}}} \quad 3$$

Nb est le taux de dopage de la base, et V_T est la tension thermique.

$Ln(Nb)$ est la longueur de diffusion des électrons dans la base qui dépend du taux de dopage de la base :

$$Ln(Nb) = \sqrt{Dn(Nb) \cdot \tau(Nb)} \quad 4$$

$\tau(Nb)$ la durée de vie des porteurs minoritaires dans la base [22] qui dépend du taux de dopage de la base :

$$\tau(Nb) = \frac{12}{1 + \frac{Nb}{5 \cdot 10^{16}}} \quad 5$$

La solution générale [29-36, 39, 45] de l'équation de continuité est donnée par l'expression suivante:

$$\delta n(x, y, z) = \sum_k \sum_j Z(z) \cdot \cos(c_k \cdot x) \cdot \cos(c_j \cdot y) \quad 6$$

Où c_k et c_j sont les valeurs propre d'espace obtenues en suivant les conditions aux limites [29-36, 39, 45] aux joints des grains;

$$\left[\frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial x} \right]_{x=\pm \frac{g_x}{2}} = \mp \frac{Sg}{D(Nb)} \cdot \delta n\left(\pm \frac{g_x}{2}, y, z\right) \quad 7$$

$$\left[\frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial y} \right]_{y=\pm \frac{g_y}{2}} = \mp \frac{Sg}{D(Nb)} \cdot \delta n\left(x, \pm \frac{g_y}{2}, z\right) \quad 8$$

Sg est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge aux joints de grain en cm.s^{-1} ; g_x et g_y sont respectivement la longueur et la largeur du grain que nous prendrons, pour la suite égales à g , pour un grain cubique.

Quant aux signes $\pm$, ils découlent simplement du repère choisi au centre du grain.

En remplaçant l'équation 6 respectivement dans les équations 7 et 8 nous obtenons les équations transcendantes suivantes:

$$\tanh\left(c_x \cdot \frac{g_x}{2}\right) = \frac{Sg}{c_x \cdot D(Nb)} \quad 9$$

$$\tanh\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right) = \frac{Sg}{c_j \cdot D(Nb)} \quad 10$$

En remplaçant l'équation 6 dans l'équation de continuité et en utilisant le fait que les fonctions cosinus sont orthogonales, nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 Z_{kj}(z)}{\partial z^2} - \frac{1}{L_{kj}^2} \cdot Z_{kj} = -\frac{1}{Dkj(Nb)} \cdot G(z) \quad 11$$

Avec la longueur effective de diffusion donnée par: $\frac{1}{Lkj(Nb)} = [c_k^2 + c_j^2 + L^{-2}]^{\frac{1}{2}}$ 12

Le coefficient de diffusion effectif s'exprime par :

$$Dk_j(S_g, g, Nb) = \frac{D(Nb) \cdot [\sin(c_k \cdot g_x) + c_k \cdot g_x] \cdot [\sin(c_j \cdot g_y) + c_j \cdot g_y]}{16 \cdot \sin\left(c_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \cdot \sin\left(c_j \cdot \frac{g_y}{2}\right)} \quad 13$$

La solution de l'équation (11) est donnée par l'expression suivante :

$$Z_{kj}(z) = A_{kj} \cdot \cosh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) + B_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{z}{L_{kj}}\right) - \sum_{i=1}^n K_i \cdot \exp(-b_i \cdot z) \quad 14$$

$$K_i = \frac{a_i L_{kj}^2}{D_{kj} (b_i^2 \cdot L_{kj}^2 - 1)} \quad 15$$

A_{kj} et B_{kj} seront déterminés à partir des conditions aux limites de la jonction émetteur-base et à la face arrière qui seront donnés ci-dessous

✓ A la jonction émetteur-base

$$D(Nb) \cdot \left(\frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right)_{z=0} = S_f \cdot \delta n(x, y, 0) \quad 16$$

✓ En face arrière.

$$D(Nb) \cdot \left(\frac{\partial \delta n(x, y, z)}{\partial z} \right)_{z=H} = -S_b \cdot \delta n(x, y) \quad 17$$

S_f est la vitesse de recombinaison à la jonction (en cm.s⁻¹) des porteurs minoritaires de charge [17, 36, 55]. Elle représente la vitesse avec laquelle les porteurs minoritaires traversent la jonction.

S_b est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière [36-45]. Elle quantifie le taux de porteurs minoritaires en excès perdus par recombinaison sur la surface arrière de la photopile.

Etude des valeurs propres d'espace C_k et C_j

Les coefficients C_k et C_j sont les valeurs propres d'espace obtenue graphiquement grâce aux équations transcendantes 18 et 19.

La représentation graphique des fonctions f(C_k) et h(C_j) ci-dessous, donne la valeur des C_k aux points d'intersection des deux courbes. Les C_j sont obtenus de la même manière. En supposant g_x = g_yC_k et les C_j sont les mêmes valeurs.

$$f(C_k) = \tanh\left(C_k \cdot \frac{g_x}{2}\right) \quad 18$$

$$h(C_k) = \frac{S_g}{C_k \cdot Dn(Nb)} \quad 19$$

A la figure (2) nous présentons l'effet du taux de dopage sur les solutions C_k :

-pour S_g ≤ 10³ cm.s⁻¹ les valeurs des C_k (ou C_j) sont pratiquement insensibles aux variations du taux de dopage de la base et de la vitesse de recombinaison aux joints de grains (S_g). Dans le **tableau. 1** nous avons relevé les valeurs obtenues à partir de la figure 2 (a et b).

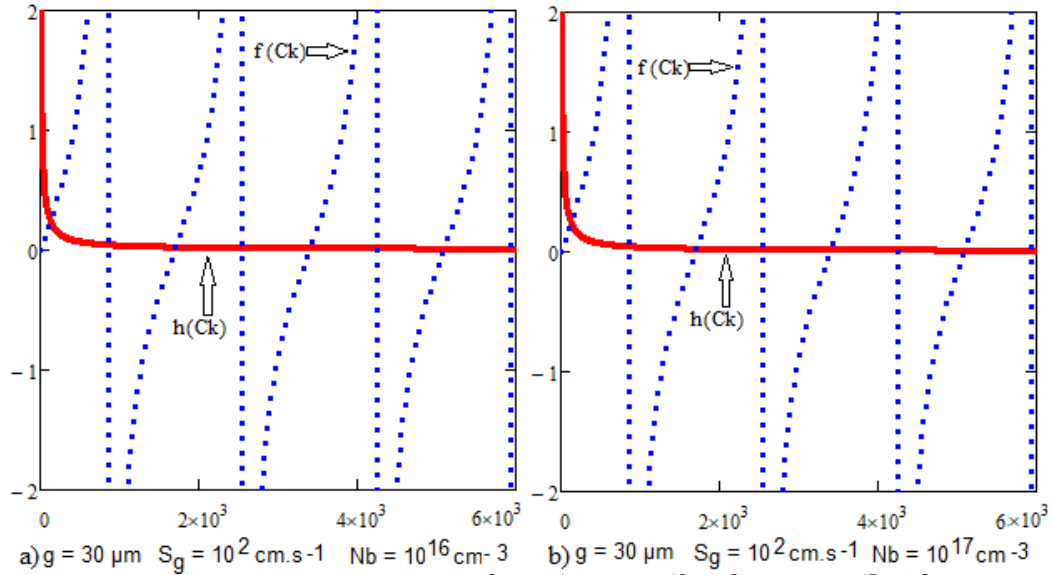


Figure 2:- Valeurs propres $S_g \leq 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Tableau 1:- Valeurs propres C_k pour $S_g = 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$

Taux de dopage de la base (cm^{-3})	Valeurs propres $C_k = C_i(\text{cm}^{-1})$; $k = 0, 1, 2, 3, 4$				
10^{16}	1699	3397	5095	6793	8491
10^{17}	1699	3397	5095	6793	8491

Pour plusieurs vitesses de recombinaison des porteurs de charge aux joints de grain $sg \leq 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$ et pour différentes valeurs du taux de dopage de la base, les valeurs des C_k (ou C_j) sont sensiblement égales aux valeurs données au tableau 1.

Pour $10^3 \text{ cm.s}^{-1} < S_g < 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ les valeurs des C_k (ou C_j) varient et croissent lorsque le taux de dopage de la base augmente (figures 3 (a) et b)) comme indiquent les valeurs relevées dans le **tableau. 2**.

Tableau 2:- Valeurs propres C_k pour $S_g = 6.10^3 \text{ cm.s}^{-1}$

Taux de dopage de la base (cm^{-3})	Valeurs propres $C_k = C_i(\text{cm}^{-1})$; $k = 0, 1, 2, 3, 4$				
10^{16}	1842	3474	5147	6832	8523
10^{17}	1919	3522	5180	6858	8543

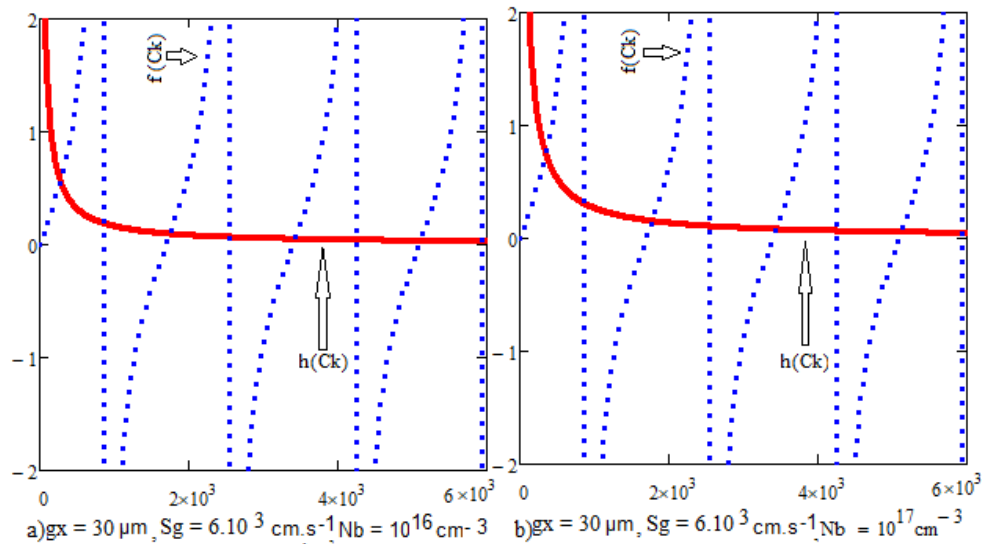


Figure 3:- Valeurs propres $10^3 < S_g < 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$, $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

A la **figure. 4**, pour $S_g > 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$ les valeurs des C_k (ou C_j) deviennent très sensibles aux variations du taux de dopage de la base (pour des valeurs de $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ avec une valeur de $S_g = 6 \cdot 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$).

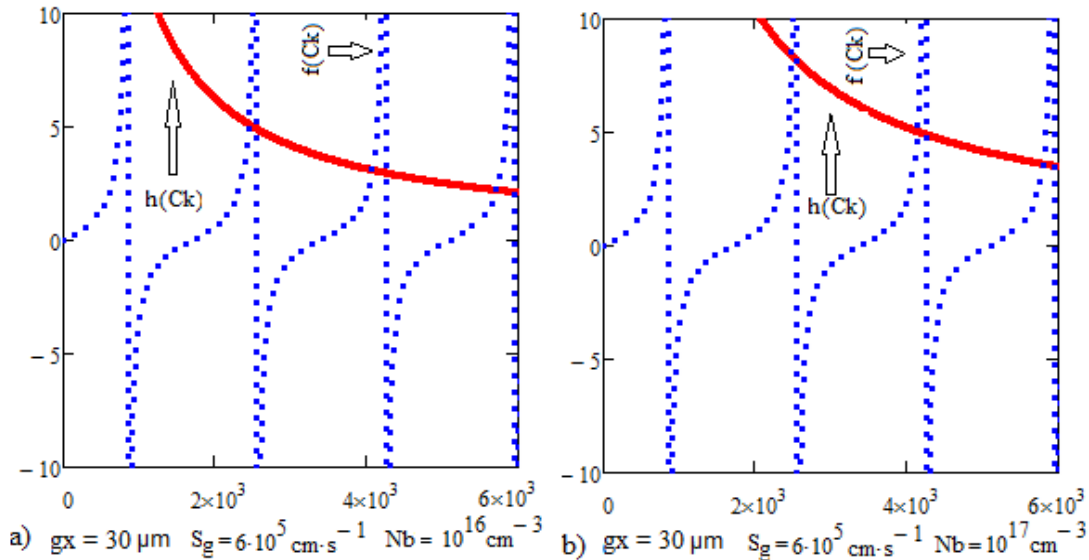


Figure 4:- Valeurs propres $S_g > 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$, $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Tableau 3:- Valeurs propres C_k pour $S_g = 6 \cdot 10^5 \text{ cm.s}^{-1}$

Taux de dopage de la base (cm^{-3})	Valeurs propres $C_k = C_i(\text{cm}^{-1})$; $k = 0, 1, 2, 3, 4$		
10^{16}	2443	4075	5712
10^{17}	2483	4139	5797

Cette même méthode nous a permis de déterminer graphiquement les valeurs propres correspondantes à la taille de grain fixée.

Tableau 4:- Valeurs propres $S_g = 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$, $N_b = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Taille de grain (μm)	$C_k = C_i(\text{cm}^{-1})$; $k = 0, 1, 2, 3, 4$				
64	986	1966	2947	3928	4910

Densité de porteurs minoritaires en excès

Effet du taux de dopage de la base et de l'épaisseur de la base sur la densité de porteurs minoritaires en excès

La **figure. 5** représente la densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction du taux de dopage de la base pour différentes épaisseurs de la base. Pour cela, nous avons fixé $z = 0$ pour se situer à la jonction et la vitesse de recombinaison à la jonction S_f est fixé à $3 \cdot 10^3 \text{ cm.s}^{-1}$. Et S_b est la vitesse de recombinaison effective à la surface arrière. Son expression [45] est reliée à la taille de grain g , à la valeur des vitesses de recombinaison aux joints de grain et maintenant aux taux de dopage de la base [22]. Tenant compte du modèle de Fossum, son expression devient:

$$S_b(H, g, N_b) = D(N_b) \cdot \frac{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left(R_{kj} \left(\frac{D(N_b)}{L_{kj}} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[b_i \exp(-b_i H) - b_i \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + \frac{1}{L_{kj}} \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] \right)}{\sum_{k=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left(R_{kj} \left(\frac{D(N_b)}{L_{kj}} \right)^2 \sum_{i=1}^3 K_i \left[\exp(-b_i H) - \cosh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) + b_i \cdot L_{kj} \cdot \sinh\left(\frac{H}{L_{kj}}\right) \right] \right)} \quad 20$$

La variation de la densité de porteurs minoritaires en excès dans la base montre l'existence d'une concentration optimale du taux de dopage comme nous pouvons le voir sur la **figure. 5**. Ce taux de dopage optimal a tendance à diminuer lorsque l'épaisseur de la base croît. Lorsque l'épaisseur de la base augmente, nous remarquons une augmentation de la densité de porteurs en excès avec un décalage des maxima de la densité de porteurs améliorés en circuit-ouvert lors du dopage de la base modéré entre 10^{15} cm^{-3} et 10^{17} cm^{-3} .

Cette augmentation s'explique par une croissance de porteurs minoritaires lorsque le volume de la base s'élève. Par conséquent, l'influence des porteurs minoritaires de charge semble être accentuée dans des cellules de plus en plus

épaisses du fait du volume plus important de la base conduisant donc à un plus grand nombre de porteurs minoritaires de charge dans cette partie de la photopile.

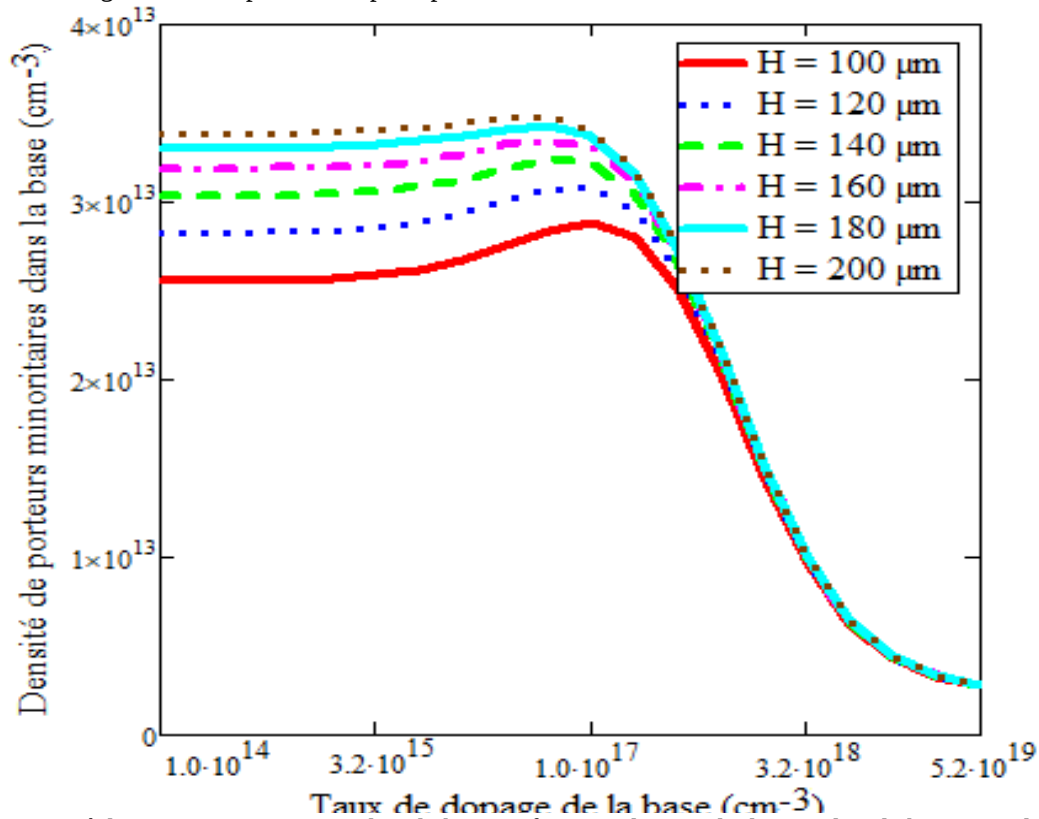


Figure 5:- Densité de porteurs minoritaires dans la base en fonction du taux de dopage dans la base pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base : $S_f = 3.10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_b = f(N_b, H) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $S_g = 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $g = 64 \text{ μm}$, $z = 0 \text{ μm}$

Le **tableau. 5**, résume la variation du taux de dopage optimal et de la densité des porteurs minoritaires maximale améliorée pour différentes épaisseurs de la base de la photopile.

Tableau 5:- Maximum de la densité de porteurs minoritaires améliorée et taux de dopage optimal pour différentes épaisseurs de la base obtenu par la méthode graphique.

H (μm)	100	120	140	160	180	200
Nbop (cm ⁻³)	10 ¹⁷	8.92.10 ¹⁶	7.68.10 ¹⁶	5.12.10 ¹⁶	4.56.10 ¹⁶	2.28.10 ¹⁶
δnmax (cm ⁻³)	2.883.10 ¹³	3.085.10 ¹³	3.238.10 ¹³	3.351.10 ¹³	3.429.10 ¹³	3.481.10 ¹³

Le profil du taux de dopage optimal en fonction de l'épaisseur de la base est ainsi donné à la figure 6.

Cette dernière nous a permis d'établir une corrélation entre l'épaisseur et le taux de dopage optimal de la base qui

est donné par : $N_{bopt}(H) = -3 \cdot 10^{12} \cdot H^2 - 2 \cdot 10^{12} \cdot H + 1 \cdot 10^{17}$ 21

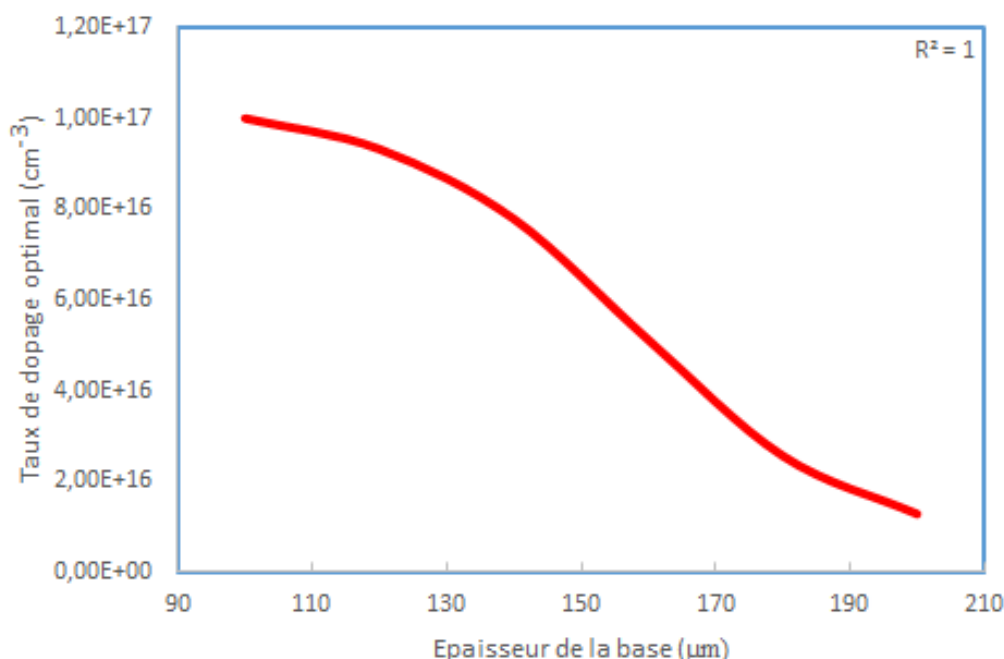


Figure 6:- Profil du taux de dopage optimal en fonction de l'épaisseur de la base :

Conclusion:-

Dans ce travail, nous avons donné l'expression de la densité de porteurs minoritaires en fonction du taux de dopage et de l'épaisseur de la base. A partir de ces profils en fonction du taux de dopage pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base, le taux de dopage optimal pour chaque valeur de l'épaisseur de la base est déduit.

Nous avons établi ensuite une corrélation entre l'épaisseur de la base et le taux de dopage optimal. Cela permet de connaître, lors de la conception des photopiles, le taux de dopage optimal pour chaque épaisseur de la base sans réduire son efficacité.

References Bibliographiques:-

- [1] Liou J JWong, W.W. (1992) Comparison and Optimization of the Performance of Si and GaAs Solar Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 28, 9-28. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90104-W](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90104-W)
- [2] Yadav, P., Pandey, K., Tripathi, B., Kumar, C.M., Srivastava, S.K., Singh, P.K. and Kumar, M. (2015) An Effective Way to Analyze the Performance Limiting Parameters of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell Fabricated in the Production Line. Solar Energy, 122, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.005>
- [3] M.A. Green, (March 1995). Silicon Solar cells advanced principles & practice Printed by Bridge printer Pty. Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Center for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35.
- [4] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, Y. Hishikawa, and W. Warta, (2006). 'Solar Cell Efficiency Tables (version 28)', Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14; pp. 455–461.
- [5] H.S. Rauschenbach, (1980) Solar Cell Array Design Handbook. The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion (Van Nostrand Reinhold Ltd., New York,1980)
- [6] T. Baghdali, A. Zerga et B. Benyoucef, (1999)Optimisation du Rendement de Conversion Photovoltaïque des Cellules Solaires à base de GaAs et de Si, Rev. Energ. Ren. : Valorisation, pp. 27-31
- [7] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline and M. A. Alam (2018). Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. Appl. Energy, vol. 212, pp. 1601-1610, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>.
- [8] Chung F; Chung-Feng Jeffery Kuo, Hung-Min Tu, Shin-Wei Liang, Wei-Lun Tsai (2010). Optimization of microcrystalline silicon thin film solar cell isolation processing parameters using ultraviolet laser. Optics & Laser Technology, Vol. 42 issue 6, Pp. 945-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.01.013>
- [9] E.Gaubas and J. Vanhellemont (1996). A simple Technique for the Separation of Bulk and Surface Recombination Parameters in Silicon. Journal of Applied Physics, 80, 6293-6297. <https://doi.org/10.1063/1.363705M>

- [10] Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>
- [11] Bordin, N., Kreinin, L. and Eisenberg, N. (2001) Determination of Recombination Parameters of Bifacial Silicon Cells with a Two Layer Step-Liked Effect Distribution in the Base Region. *Proc. 17th European PVSEC*, Munich, 1495-1498.
- [12] Demesmaeker, E., Symons, J., Nijs, J. and Mertens, R. (1991). The influence of surface recombination on the limiting efficiency and optimum thickness of silicon solar cells. *10th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisbon, 8-12 April 1991, 66-67. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17
- [13] J.G.Fossum, Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, 2, 322-325.
- [14] S. Gupta, P. Ahmed and S. Garg, (1988). A Method for the Determination of the Material parameters D, L, S and α from Measured Short-Circuit Photocurrent. *Solar Cells*, 25, 61-72. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90058-0P](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0P).
- [15] Flohr, Th. and Helbig, R. (1989). Determination of Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity by Optical-Beam-Induced-Current Measurements at Different Light Wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66, 3060-3065. <https://doi.org/10.1063/1.344161>
- [16] R. R. Vardanyan, U. Kerst, B. Tierock, H. G. Wagemann (1997). Measurement of recombination parameters of solar cell in a magnetic field. *Proceeding of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, Spain)*. Pp 2367-2369.
- [17] G.Sissoko, S. Sivoththanam. M.Rodot and P. Mialhe, Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. *11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Montreux)*, 1992, Pp. 352-354.
- [18] Dhariwal, S.R. and Vasu, N.K. (1981). A Generalized Approach to Lifetime Measurement in pn Junction Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 24, 915-927. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90112-X)
- [19] KonstantinosMisiakos and DimitrisTsamakis, Electron and HoleMobilities in Lightly Doped Silicon. *Appl. Phys. Lett.*1994, 64(15),2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>
- [20] N.D. Arora, J. R. Hauser, D. J. Roulston, Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. *IEEE. Trans. Electron devices*,1982, ED-29, 292-295.
- [21] J. M. Dorkel P. Leturcq, Carrier mobilities in silicon solar semi-empirically related temperature, doping and injection level. *Solid State Electron*,1981, 24,821-825.
- [22] J.G.Fossum and D.S.Lee, A Physical Model for the Dependence of Carrier Lifetime on Doping Density in Non-Degenerate Silicon. *Solid-State Electronics*,1952, 15, 741-747
- [23] Richard Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, IbrahimaDatta, Marcel S. Diouf, YoussouTraore, MorNdiaye, SeniTamba, GrégoireSissoko (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient $D^*(B, T)$: Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 9, pp.1-10 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- [24] Seydina, D., Mor, N., Ndeye, T., Youssou, T., Mamadou, L.B., Ibrahima, D., Marcel, S.D., Oulimata, M., Amary, T. and Grégoire, S. (2019). Influence of Temperature and Frequency on Minority Carrier Diffusion Coefficient in a Silicon Solar Cell Under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 11, 355-361. &<https://doi.org/10.4236/epe.2019.1110023>
- [25] Kosso, A.M.M., Thiame, M., Traore, Y., et al. (2018) 3D Study of a Silicon Solar Cell under Constant Monochromatic Illumination: Influence of Both, Temperature and Magnetic Field. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5, 259-269.
- [26] Ibrahima Tall, BoureimaSeibou, Mohamed AbderrahimOuld El Moujtaba, AmadouDiao, Mamadou Wade, GregoireSissoko (2015). Diffusion Coefficient Modeling of a Silicon Solar Cell under Irradiation Effect in Frequency: Electric Equivalent Circuit. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 19 Number 2 – p.56-61, Jan 2015* (<http://www.ijettjournal.org>).
- [27] Rosling, M., Bleichner, H., Mundqvist, M. and Nordlander, E. (1992). A Novel Technique for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. *Solid State Electronics*, 35, 1223-1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90153-4)

- [28] Y.Bester, D. Ritter, G. Bahia, S. Cohen and J. Sparkling, Method Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistor Using a Magneto transport Method. *Applied Physics Letters*, 1995, 67, 1883- 1884. <https://doi.org/10.1063/1.114364>
- [29] M.C. Halder and T.R. Williams (1983). Grain boundary effects in polycrystalline silicon solar cells I: Solution of the three dimensional diffusion equation by the green's function method. *Solar Cells*, Vol. 8, pp. 201-223.
- [30] C. Donolato, M. Kittler. Depth profiling of the minority-carrier diffusion length in intrinsically getterd silicon by electron-beam-induced current. *J. Appl. Phys.* 79(9), 1996, pp. 6954-6960.
- [31] Sproul, A.B. (1994) Dimensionless Solution of the Equation Describing the Effect of Surface Recombination on Carrier Decay in Semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 76, 2851-2854.
- [32] Jain, S.C. (1983) The Effective Lifetime in Semi crystalline Silicon. *Solar Cells*, 9, 345-352. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(83\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0379-6787(83)90028-5)
- [33] Manish K Mukherjee, A. R. Saha and S. N. Das (1978). Two dimensional analysis for Cu_xS -CdS solar cells with nonuniform skin region. *IEEE Transaction on devices*, Vol. ED 25, No3, Pp. 285-293.
- [34] F. Caldararu, M. Caldararu, S. Nan, D. Nicolaescu and S. Vasile (1991). Analytical two dimensional model of solar cell current- voltage characteristics. *Solid States Electronics*. Vol. 34, No. 6, pp. 553-558.
- [35] S. Banerjee and H. Saha (1990). Grain boundary effects in polycrystalline silicon solar cells. *Solar Cells*, Vol. 28, pp. 77-94.
- [36] J. Ducas (1994). 3D Modelling of a Reverse Cell Made with Improved Multicrystalline Silicon Wafer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 32, 71-88. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90257-7](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90257-7)
- [37] G. Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A.L. Ndiaye, Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*, Pergamon, Part III, pp. 1487-1490.
- [38] O. Diasse, R. S. Sam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, N. Thiam, S. Mbodji and G. Sissoko, Solar cell's classification by the determination of the specific values of the back surface recombination velocities in open circuit and short-circuit operating conditions. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*, 2012, 2278/6856:18-23)
- [39] Dieng, A., Zerbo, I., Wade, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011) Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters. *Semiconductor Science and Technology*, 26, Article ID: 095023. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095023>.
- [40] Joardar, K., Dondero, R.C. and Schroder, D.K. (1989). A Critical Analysis of the Small-Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 32, 479-483. . [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [41] Zondervan, A., Verhoef, L.A. and Lindholm, F.A. (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*, 35, 85-88. <https://doi.org/10.1109/16.2419>
- [42] Fall, M. , Gaye, I. , Diarisso, D. , Diop, G. , Loum, K. , Diop, N. , Sy, K. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2021). AC Back Surface Recombination Velocity in n^+-p-p^+ Silicon Solar Cell under Monochromatic Light and Temperature. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13, 67-81. doi: 10.4236/jemaa.2021.135005.
- [43] 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, pp 277-283.
- [44] Antilla, O.J. and Hahn, S.K. (1993) Study on Surface Photovoltage Measurement of Long Diffusion Length Silicon: Simulation Results. *Journal of Applied Physics*, 74, 558-569. <https://doi.org/10.1063/1.355343>
- [45] H.L. Diallo, A. Seidou, Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, 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*, 2008, 42, 203-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [46] Caleb Dhanasekaran, P. and Gopalam, B.S.V (1981). Effect of Junction Depth on the Performance of a Diffused n^+p Silicon Solar Cell. *Solids-State Electronics*, 24, 1077-1080. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90172-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90172-6)
- [47] Malick Ndiaye, Ousmane Sow, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Dibor Faye, Oulimata Mballo, Issa Diagne, Gregoire Sissoko. Capacité de Diffusion d'une Photopile au Silicium à Multi-Jonctions Verticales Connectées en Série sous éclairage Monochromatique en Modulation de Fréquence: Effet du Taux Dopage de la Base. *International Journal of Advanced Research*, www.journalijar.com, Volume 10, Issue 4, pp: 556–572, 2022.
- [48] Fatoumata Balde, 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 width region. Journal of Scientific and Engineering Research, 5(10):252-259
<https://jsaer.com/archive/volume-5-issue-10-2018/>

[49] M.M.S.Dede, M.L. Ba, M.A. Ba, M. Ndiaye, S. Gueye, E.H. Sow, I. Diatta, M.S. Diop, M. Wade and G. Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to Determine Base Optimum Thickness of an n⁺/p/p⁺ Silicon Solar Cell. Energy and Power Engineering, 2020, 12, 445-458.

[50] M.Diop, H. Ba, N. Thiam, I. Diatta, Y. Traore, M. Ba, E. Sow, O. Mballo and G.Sissoko, Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. World Journal of Condensed Matter Physics, 2019, 9, 102-111.

[51] Teya, M. , Sow, O. , Loum, K. , Diatta, I. , Diop, G. , Traore, Y. , Wade, M. and Sissoko, G. (2023) Determination of the Base Optimum Thickness of Back Illuminated (n⁺/p/p⁺) Bifacial Silicon Solar Cell, by Help of Diffusion Coefficient at Resonance Frequency. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 15, 13-24. doi: 10.4236/jemaa.2023.152002.

[52] A. A. Sayem, Y. Arafat and M. M. Rahman, Thickness optimization and composition grading effect in heterojunction CIGS Solar Cell. 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (20-20 Dec, Dhaka, Bangladesh), 2014, 524-527, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026952.

[53] N.Honma and C. Munakata (1987). Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. Japanese Journal of Applied Physics, 26, 2033-2036. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.2033>

[54] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga. Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin. Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 301-306.

[55] GrégoireSissoko and SenghaneMbodji (2015).A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (sf). Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 6(2) (2011), pp.103-114-ISSN 2229 – 6107, www.ijopaasat.in

[56] Walters, R.J., Summers, G.P. & Messenger, S.R. Space Radiation Effects in Advanced Solar Cell Materials and Devices. MRS Online Proceedings Library 692, 1021 (2001). <https://doi.org/10.1557/PROC-692-H10.2.1>

[57] MalickNdiaye, Ousmane Sow, IbrahimaDiatta, Gora Diop, Dibor Faye, KhadyLoum, YoussouTraore, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Optimisation de l'épaisseur de la base de taux de dopage (Nb) de la photopile (n⁺/p/p⁺) au silicium à multi jonctions verticales connectées en série et placée sous éclairage monochromatique en modulation de fréquence. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbssc.org, Volume 12, Issue 4, pp: 266 – 280, 2022.

[58] IliasFagnaneDiouf, Ousmane Sow, Gora Diop, MalickNdiaye, IbrahimaDiatta, KhadyLoum, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Optimization of the base thickness of a silicon solar cell with multi-vertical junctions connected in series, through dynamic expressions of the recombination velocity on the back side. Journal of Scientific and Engineering Research (JSERBR). <http://www.jsaer.com>, Volume 9, Issue 10pp: 10-20, 2022.

[59] KhadyLoum, Gora Diop, IbrahimaDiatta, Richard Mane, MoussaIbraNgom, YoussouTraore , Segue Gueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, GrégoireSissoko. Optimization of the base thickness of the (N⁺ /P/P⁺) silicon solar cell in steady state under polychromatic illumination: Influence of temperature and doping rate. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 164 – 175, 2023.

[60] A. A. Sayem, Y. Arafat and M. M. Rahman, Thickness optimization and composition grading effect in heterojunction CIGS Solar Cell. 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (20-20 Dec, Dhaka, Bangladesh), 2014, 524-527, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026952.

[61] Diop, G. , Sow, O. , Thiame, M. , Mane, R. , Diatta, I. , Loum, K. , Gueye, S. , Wade, M. and Sissoko, G. (2022). Diffusion Coefficient at Double Resonances in Frequency and Temperature, Applied to (n⁺/p/p⁺) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization under Long Wavelength Illumination. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 14, 89-103. doi: 10.4236/jemaa.2022.148008.

[62] KhadyLoum, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, IbrahimaDiatta, MalickNdiaye,SegueGueye, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. AC Back Surface Recombination Velocity as Applied to Optimize the Base Thickness under Temperature of an (n⁺-p-p⁺) Bifacial Silicon Solar Cell, Back Illuminated by a Light with Long Wavelength. World Journal of Condensed Matter Physics, <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>, Volume 13, pp: 40 - 56, 2023.

[63] Ousmane Sow, Segue Gueye, Richard Mane, Gora Diop, IbrahimaDiatta, KhadyLoum, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. (n⁺/p/p⁺) Silicon solar cell base thickness optimization under modulated short wavelength illumination, at resonances in both frequency and temperature of minority carriers' diffusion coefficient

.International Journal of Engineering Research Updates, <https://orionjournals.com/ijeru>, Volume 3, Issue 2 pp : 040-052, 2022.

[64] Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Segha Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Optimization of the base thickness of an (n+/p/p+) bifacial silicon solar cell illuminated from the back side, using short-wavelength light: Resonance Effect on the diffusion coefficient in temperature under applied magnetic field. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 1, pp: 038 – 052, 2022.

[65] Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Youssou Traore, Segha Gueye, Ousmane Sow, Gregoire Sissoko. Derivative of AC recombination velocity of minority carriers as applied to the determination of the optimum base thickness of an (n+/p/p+) silicon solar cell. Journal of Scientific and Engineering Research (JSERBR). <http://www.jsaer.com>, Volume 10, Issue 3pp: 1-10, 2023.

[66] Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Malick Ndiaye, Youssou Traore, Segha Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Derivative of AC back surface recombination velocity as applied to n + /p/p + silicon solar cell optimum base thickness determination: Effect of both temperature and frequency. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 139 – 151, 2023.

Furlan, J. and Amon, S. (1985) Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. Solid-State Electronics, 28, 1241-1243.
[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90048-6).