



Journal Homepage: [-www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/13884
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13884>



RESEARCH ARTICLE

ETUDE DE LA CAPACITE D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTIONS VERTICALES SERIES SOUS ECLAIREMENT MONOCHROMATIQUE

Mamadou Yacine BA¹, Mame Faty MBAYE FALL¹, Mbi KABORE^{2,3}, Gora DIOP¹, Ibrahima DIATTA³,
Mor SARR³, Mamadou SALL¹, Mamadou WADE¹ and Gregoire SISSOKO³

1. Polytechnic School of Thiès, BP A10, Thiès, Senegal.
2. Universite Nazi Boni (Unb), Bobo Dioulasso, Burkina Faso.
3. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable(GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 05 October 2021
Final Accepted: 10 November 2021
Published: December 2021

Key words:-

Photopile Au Silicium, Jonction Vertical Série, Vitesse De Recombinaison A La Surface Arrière, Capacité De Diffusion

Abstract

Ce travail consiste à faire une étude de la capacité de la photopile a jonction verticale série sous éclairage monochromatique en tenant compte de la longueur d'onde et de la profondeur. L'équation de continuité, traduisant, les phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs de charge photogénérés dans la base de la photopile est résolue en tenant compte des vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière. Une étude de la capacité de diffusion en fonction des vitesses de recombinaison à la jonction base-émetteur mais aussi en fonction de la phototension a permis de déterminer une capacité initiale C_0 , pour différentes longueurs d'onde de l'éclairage incident et pour différentes valeurs de la profondeur.

Copy Right, IJAR, 2021., All rights reserved.

Introduction:-

La croissance de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque est ralentie entre autre par un coût de fabrication élevé [1, 2, 3] et un faible rendement [4, 5, 6]. Ainsi la connaissance des phénomènes de recombinaisons des porteurs de charge à la surface et au volume de la photopile passe nécessairement par la maîtrise des paramètres phénoménologiques [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] tels que la longueur de diffusion (L), le coefficient de diffusion (D), la durée de vie (τ), la vitesse de recombinaison (S_f) à la jonction (n^+/p), la vitesse de recombinaison (S_b) à la jonction (p/p^+) [18, 19, 20, 21, 22], et la vitesse de recombinaison (S_g) aux joints de grains. A ces paramètres, on associe les paramètres électriques comme les résistances série et shunt, l'inductance, la capacité de la zone de charge d'espace. Dans cette situation, la photopile au silicium peut être mono faciale, bifaciale [23, 24], à champ arrière ou à champ arrière (Back Surface Field) [23, 25], à jonctions verticales (série ou parallèle) [26, 27, 28, 29] évoluant soit en régime statique [30, 31], régime dynamique fréquentiel [32, 33, 34, 35] ou transitoire [36, 37, 38, 39]. Ainsi la réponse en courant et/ou en tension de la photopile permet d'évaluer la performance et la qualité de la photopile [28, 29, 40]. Par ailleurs, la zone de charge d'espace (ZCE) d'une photopile peut être assimilée à un condensateur plan appelé capacité de transition (C_0), en raison de l'ionisation de charges fixes [41, 42, 43, 44, 45]. Ainsi ce dernier est un paramètre très important dont la connaissance permet d'optimiser une meilleure collecte des porteurs de charge photogénérés. Notre contribution dans cet article consiste à mener une étude sur la détermination de la capacité d'une photopile à jonctions verticales séries en régime statique sous éclairage monochromatique en utilisant les expressions des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaire de charge à la face arrière (S_{b1} et S_{b2}) [20, 21, 22].

Corresponding Author:- Gregoire SISSOKO

Address:- Laboratory of Semiconductors and Solar Energy, Physics Department, Faculty of Science and Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal.

Théorie

Au niveau de la figure 1 nous avons représenté la structure des photopiles à jonctions verticales multiples qui sont connectées en série [20, 25, 26] où les bases sont liées aux émetteurs par des contacts métalliques. A la figure 2 nous avons représenté la structure de l'unité de la photopile au silicium à jonction verticale avec ces différentes régions. Entre l'émetteur (n⁺) et la base (P) nous avons la zone de charge d'espace (ZCE) appelée jonction base-émetteur (n⁺/P) où règne un champ électrique intense qui permet la séparation des paires électron-trou. A la face arrière de la base existe une couche de dopage élevée (P⁺) qui constitue la deuxième jonction (P/P⁺) où règne un champ de surface arrière qui renvoie les porteurs minoritaires vers la première jonction en réduisant ainsi les pertes par recombinaison en surface arrière.

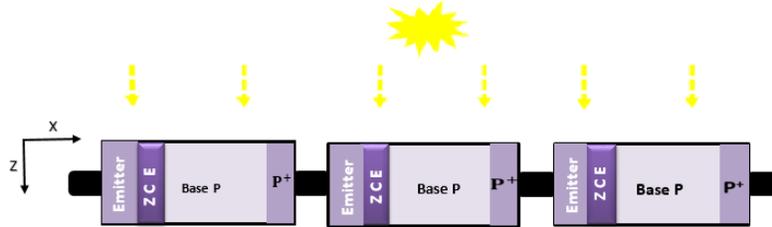


Figure 1:- Photopile au silicium à jonctions verticales séries de type n⁺/p/p⁺ sous éclairnement monochromatique.

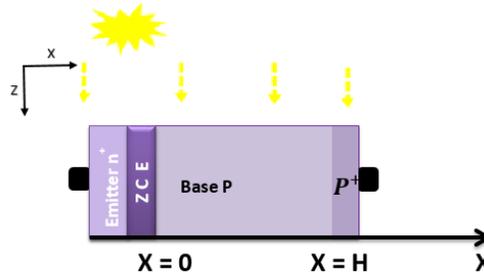


Figure 2:- Structure d'une unité de photopile au silicium à jonction verticale série sous éclairnement monochromatique de type n⁺/p/p⁺.

Prenant en compte les phénomènes de génération de recombinaison et de diffusion dans la photopile en régime statique, l'équation de continuité des porteurs minoritaires de charge dans la base à l'abscisse x, et à la profondeur z, pour une illumination de longueur d'onde λ, s'écrit sous la forme [46, 47, 11]:

$$\frac{\partial^2 \delta(x, z, \lambda)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, z, \lambda)}{L^2} = -\frac{G(z)}{D} \tag{1}$$

δ(x, z) est la densité des porteurs minoritaires créés à la coordonnée (x, z) dans la base.

L est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la base. Elle représente aussi la distance moyenne parcourue par les électrons avant leur recombinaison dans la base [48].

Elle dépend du coefficient de diffusion D [49] et de la durée de vie τ [50] des porteurs minoritaires de charge. Son expression est donnée par la relation d'Einstein exprimée par:

$$L^2 = D\tau \tag{2}$$

G(z) est le taux de génération de porteurs pour un éclairage monochromatique en fonction de la profondeur z dans la base. Son expression, pour une photopile à jonction verticale est donnée par [51, 23]:

$$G(z) = \alpha_\lambda (1 - R_\lambda) F \exp(-\alpha_\lambda z) \tag{3}$$

F est le flux incident monochromatique de la lumière à la longueur d'onde λ;
 α_λ est le coefficient d'absorption monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ;
 R_λ est le coefficient de réflexion monochromatique du matériau à la longueur d'onde λ;
 z est la profondeur.

La solution de l'équation de continuité peut s'écrire par:

$$\delta(x, z, \lambda) = A(S_f, S_b, z, \lambda) \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + B(S_f, S_b, z, \lambda) \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \frac{L^2}{D} G(z) \tag{4}$$

Les coefficients A et B sont déterminés par les conditions aux limites qui sont :

$$\text{À la jonction base-émetteur}(n+/p) \quad \left. \frac{\partial \delta(x, z, \lambda)}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{Sf \delta(x, z, \lambda)}{D} \Big|_{x=0} \quad (5)$$

Dans cette expression, Sf [52, 53] représente la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction. Elle définit le point de fonctionnement choisi et varie de la valeur nulle (circuit – ouvert) à l’infini (court – circuit) [54] pour la photopile.

Sf est exprimée comme la combinaison de deux vitesses de recombinaison. Son expression est donnée par :

$$Sf = Sf_0 + Sf_i \quad (6)$$

- Sf_0 est la vitesse de recombinaison intrinsèque des porteurs de charges, elle induit la résistance shunt [53].
- Sf_i est la vitesse de recombinaison imposée par la charge extérieure et qui définit le point de fonctionnement de la photopile [19, 16].

$$\text{À la face arrière}(p/p^+) \quad \left. \frac{\partial \delta(x, z, \lambda)}{\partial x} \right]_{x=H} = - \frac{Sb \delta(x, z, \lambda)}{D} \Big|_{x=H} \quad (7)$$

Dans l’expression (7), H désigne l’épaisseur de la base, Sb la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la surface arrière. Elle est la conséquence du champ électrique produit à la jonction (p/p+) et caractérise le comportement de la densité des porteurs de charges au niveau de cette interface. Si la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction tend vers l’infini (pour des grandes valeurs Sf) alors la densité de photocourant J_{ph} tend vers un courant de court-circuit J_{phcc} constant. Ainsi nous pouvons déterminer l’expression des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la face arrière (Sb_1 et Sb_2) à partir l’équation suivante [19, 30]:

$$\left. \frac{\partial J_{ph}(Sf, z, Sb_1, \lambda)}{\partial Sf} \right]_{Sf \geq 10^6 \text{ cm/s}} = 0 \quad (8)$$

Elles sont données par :

$$Sb_1(H, D) = - \frac{D}{L} \tanh\left(\frac{H}{L}\right) \quad (9)$$

$$Sb_2(H, D) = - \frac{D \sinh\left(\frac{H}{L}\right)}{L(\cosh\left(\frac{H}{L}\right) - 1)} \quad (10)$$

Dans la suite du travail nous avons utilisé l’expression de la vitesse de recombinaison Sb_1 à la face arrière pour déterminer le comportement de la capacité.

Phototension

Lorsque la photopile est soumise à un éclairage monochromatique l’expression de la phototension est donnée par la relation de Boltzmann.

$$V_{ph}(Sf, z, Sb_1, \lambda) = V_T \ln \left[1 + \frac{N_b}{n_i^2} \delta(0, Sf, \lambda, z) \right] \quad (11)$$

N_b est le taux de dopage en atomes accepteurs (Bore) dans la base

V_T est la tension thermique, cette tension est définie par :

$$V_T = \frac{K_b T}{q} \quad (12)$$

K_b est la constante de Boltzmann, T est la température absolue et q définie charge élémentaire de l’électron.

n_i est la concentration intrinsèque de porteurs de charge dans le silicium et s’exprime par :

$$n_i^2(T) = A \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{K_b T}\right) \quad (13)$$

E_g : est l’énergie de gap, elle correspond à la différence entre l’énergie de la bande de conduction E_c et celle de la bande de valence E_v . $E_g = 1,12 \times 1,6 \cdot 10^{-19}$ J, A : est une constante. $A = 3,87 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3}$

Capacité

La capacité sous illumination de la photopile est donnée par :

$$C(Sf, z, Sb, \lambda) = \frac{dQ}{dV(Sf, z, \lambda)} \quad (14)$$

Cette dernière formule peut s’écrire encore sous la forme :

$$C(Sf, z, Sb, \lambda) = q \frac{\delta(x=0, z)}{V_T} + \frac{q n_i^2}{N_b V_T} \quad (15)$$

$$C_0 = \frac{q n_i^2}{N_b V_T} \quad (16)$$

$$C_d(S_f, z, S_b, \lambda) = q \frac{\delta(x=0, z)}{V_T} \quad (17)$$

Resultats Et Discussions:-

L'effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison S_f à la jonction est présenté à la figure 3.

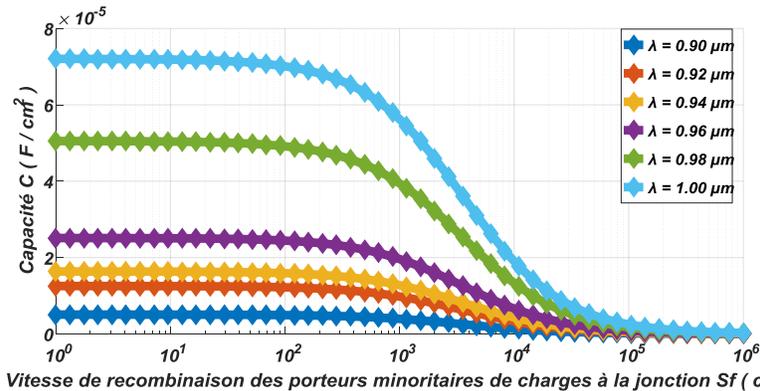


Figure 3:- La capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ avec $z = 0.017$ cm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; S_b (D , H) cm / s ; $L = 0.01$ cm.

L'effet de la profondeur sur la capacité de diffusion en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f est montré à la figure 4.

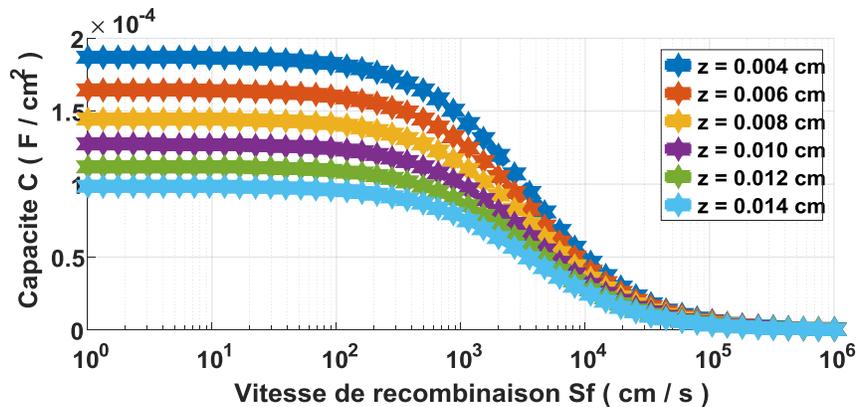


Figure 4:- La capacité de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur z avec $\lambda = 1.00$ μm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; S_b (D , H) cm / s ; $L = 0.01$ cm.

Toutes ces figures (3 et 4) sont des courbes décroissantes de la capacité en fonction de S_f et présentent principalement trois zones :

1. Au voisinage du circuit ouvert correspondant aux vitesses de recombinaison à la jonction inférieure $S_f < 10^2$ cm / s, l'amplitude de la capacité est maximale et constante. Les porteurs de charge minoritaires sont ainsi bloqués et stockés à la jonction. Cette amplitude augmente légèrement avec l'augmentation de la longueur d'onde (Fig. 3) mais diminue aussi légèrement avec l'augmentation de z , la profondeur (Fig. 4). Ainsi dans cette situation, la zone de charge d'espace assimilable à un condensateur plan d'épaisseur petite (X_{CO}) donc correspondant aux grandes valeurs de C .
2. Lorsque S_f comprise est entre 10^2 cm/s et 10^5 cm/s, la capacité décroît rapidement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction et ceci traduit un passage des porteurs minoritaires de charge à travers la jonction.

3. Au voisinage du court-circuit correspondant aux vitesses de recombinaison à la jonction supérieures à 10^5 cm/s, la capacité tend vers sa valeur minimale, ce qui signifie que les porteurs minoritaires de charges ont traversé la jonction. A cette faible valeur de la capacité (C_{cc}) correspond à une grande valeur de l'épaisseur (X_{cc}) du condensateur plan de la zone de charge d'espace de la photopile en court-circuit.
4. L'étude de la capacité en fonction de S_f , montre donc une extension de la zone de charge d'espace, en passant du circuit ouvert au court-circuit de la photopile [55].

Les figures (5 ,6 ,7 et 8) illustrent le profil de la capacité de la photopile en fonction de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ et de la profondeur z de la base selon les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaire de charge à la face arrière (Sb1 et Sb2).

Technique de détermination de la capacité de transition(C_o)

La technique de la representation de la capacité de diffusion à l'échelle semi logarithmique en fonction de la phototension, donne (C_o) comme ordonnée à l'origine [55]. Les résultats sont les suivants :

L'effet de la longueur d'onde sur la capacité de diffusion en fonction de la phototension

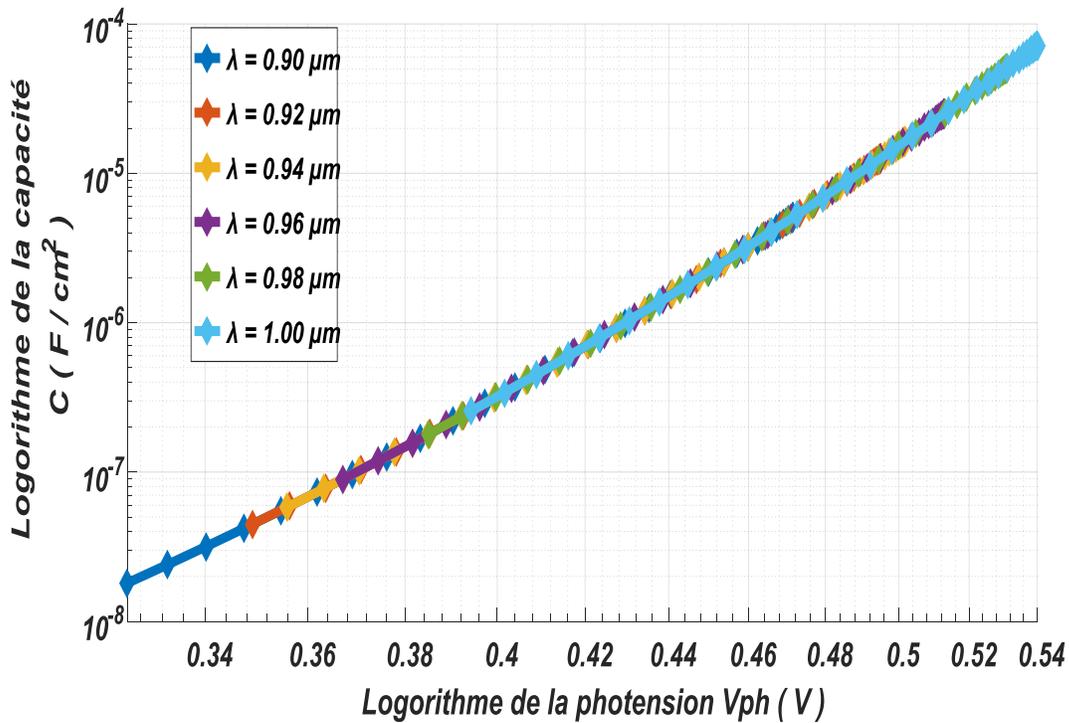


Figure 5:- Logarithme de la capacité de la photopile en fonction du logarithme de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ avec $S_{b1} = f(H, D)$ cm/s ; $z = 0.017$ cm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

Tableau 1:- Les valeurs numériques de la capacité C_o pour différentes valeurs de la longueur d'onde avec $S_{b1} = f(H, D)$ cm/s ; $z = 0.017$ cm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

| Longueur d'onde λ (μm) | 0.90 | 0.92 | 0.94 | 0.96 | 0.98 | 1.00 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Capacité Initiale C_o 10^{-8} (F/cm ²) | 2.055 | 5.084 | 6.626 | 10.18 | 20.46 | 29.18 |

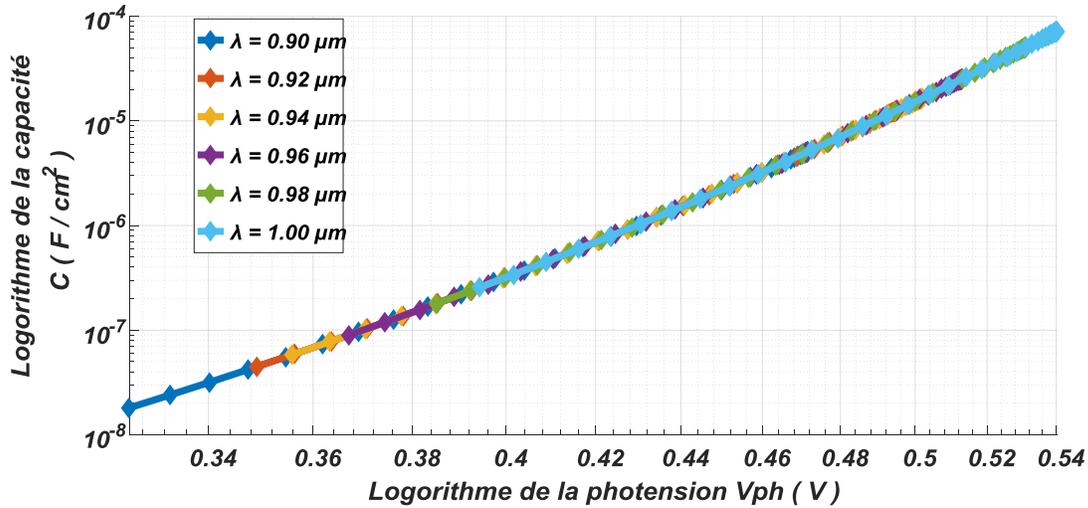


Figure 6:- Logarithme de la capacité de la photopile en fonction du logarithme de la phototension pour différentes valeurs de la longueur d’onde λ avec $Sb2 = f(H, D)$ cm/s ; $z = 0.017$ cm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

Tableau 2:- Les valeurs numériques de la capacité C_0 pour différentes valeurs de la longueur d’onde avec $Sb2 = f(H, D)$ cm/s ; $z = 0.017$ cm ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

| Longueur d’onde λ (μm) | 0.90 | 0.92 | 0.94 | 0.96 | 0.98 | 1.00 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Capacité Initiale C_0 10^{-8} (F/cm ²) | 1.851 | 4.579 | 5.968 | 9.166 | 18.43 | 26.28 |

L’effet de la profondeur sur la capacité de diffusion en fonction de la phototension

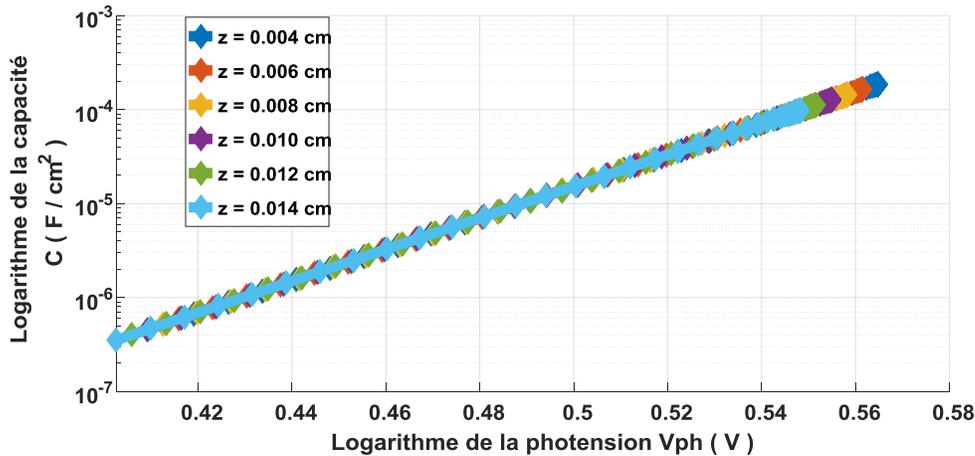


Figure 7:- Logarithme de la capacité de la photopile en fonction du logarithme de la phototension pour différentes valeurs de la profondeur z avec $\lambda = 1.00$ μm , $Sb1 = f(H, D)$ cm/s ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

Tableau 3:- Les valeurs numériques de la capacité C_0 pour différentes valeurs de la profondeur avec $\lambda = 1.00$ μm , $Sb1 = f(H, D)$ cm/s ; $D = 36$ cm²/s ; $H = 0.02$ cm ; $L = 0.01$ cm.

| Profondeur (cm) z | 0.004 | 0.006 | 0.008 | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Capacité Initiale C_0 10^{-7} (F/cm ²) | 6.705 | 5.9 | 5.191 | 4.579 | 4.018 | 3.536 |

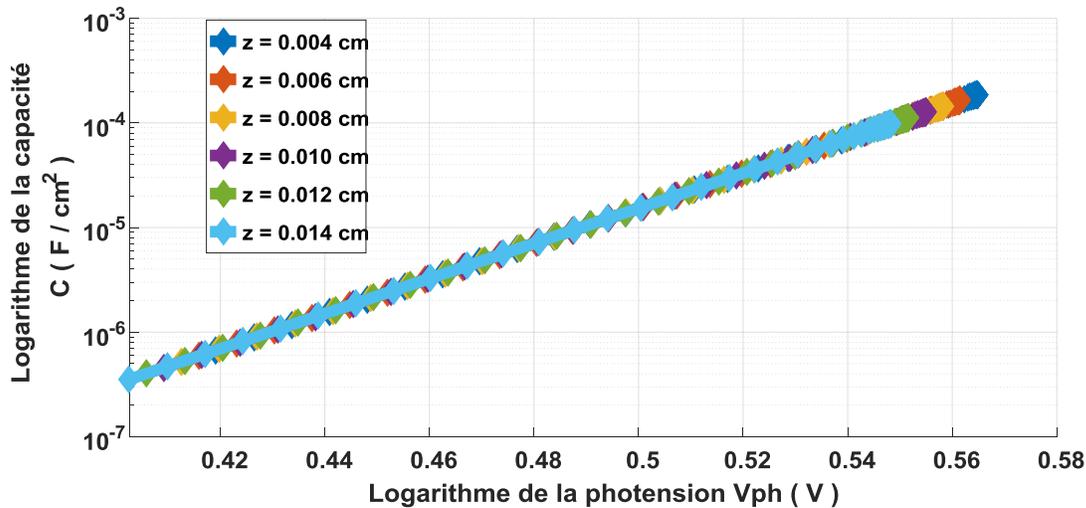


Figure 8:- Logarithme de la capacité de la photopile en fonction du logarithme de la phototension pour différentes valeurs de la profondeur z avec $\lambda = 1.00 \mu\text{m}$, $Sb2 = f(H, D) \text{ cm/s}$; $D = 36 \text{ cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02 \text{ cm}$; $L = 0.01 \text{ cm}$.

Tableau 4:- Les valeurs numériques de la capacité C_0 pour différentes valeurs de la profondeur avec $\lambda = 1.00 \mu\text{m}$; $Sb2 = f(H, D) \text{ cm/s}$; $D = 36 \text{ cm}^2/\text{s}$; $H = 0.02 \text{ cm}$; $L = 0.01 \text{ cm}$.

| Profondeur (cm) | z | 0.004 | 0.006 | 0.008 | 0.010 | 0.012 | 0.014 |
|---|-----|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Capacité Initiale C_0 ($10^{-7} \text{ (F/cm}^2\text{)}$) | | 6.04 | 5.314 | 4.676 | 4.114 | 3.62 | 3.185 |

Conclusion:-

Dans cet article, nous avons étudié le comportement de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs à la jonction base-émetteur pour différentes valeurs de la longueur et la profondeur ce qui nous a permis de montrer l'existence d'une capacité maximale au circuit-ouvert et faible au court-circuit. Ainsi à partir de ce constat, nous avons utilisé la méthode graphique en se basant sur le profil de la capacité en fonction de la phototension pour déterminer la capacité initiale C_0 en situation de circuit-ouvert. Cette capacité initiale évolue lorsque la longueur d'onde et la profondeur varient. Cette étude met en évidence l'importance de la capacité de diffusion en fonction de la longueur et de la profondeur de la base sur la fabrication des photopiles

References Bibliographiques:-

- [1] Kalowekamo, J., & Baker, E. (2009). Estimation du coût de fabrication de cellules solaires purement organiques. *Énergie solaire*, 83(8), 1224-1231. doi:10.1016/j.solener.2009.02.00
- [2] Hengevoss, D., Baumgartner, C., Nisato, G., & Hugi, C. (2016). Life Cycle Assessment and eco-efficiency of prospective, flexible, tandem organic photovoltaic module. *Solar Energy*, 137, 317–327. doi:10.1016/j.solener.2016.08.02
- [3] Rißland, S., & Breitenstein, O. (2013). Évaluation d'images de luminescence de cellules solaires pour des durées de vie dépendantes du niveau d'injection. *Matériaux d'énergie solaire et cellules solaires*, 111, 112-114. doi:10.1016/j.solmat.2012.12.024
- [4] Praveen, J., & VijayaRamaraju, V. (2017). Materials for Optimizing Efficiencies of Solar Photovoltaic Panels. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5233–5238. doi:10.1016/j.matpr.2017.05.032
- [5] Vahanian, E., Yavrian, A., Gilbert, R., & Galstian, T. (2016). Amélioration de la réponse électrique dans les systèmes photovoltaïques à haute concentration par des revêtements antireflet à base de nanoparticules de silice. *Énergie solaire*, 137, 273-280. doi:10.1016/j.solener.2016.08.020
- [6] Sander, M., Dietrich, S., Pander, M., Ebert, M., & Bagdahn, J. (2013). Recherche systématique de fissures dans des cellules solaires encapsulées après chargement mécanique. *Matériaux d'énergie solaire et cellules solaires*, 111, 82-89. doi:10.1016/j.solmat.2012.12.031

- [7] J. H. Reynolds and A. Meulenbergh Jr. 1974. Measurement of Diffusion length in Solar Cells. *Journal of Applied Physics*. 45(6): 2582-2592.
- [8] De S. S., Ghosh A. K., Bera M., Hajra A. and Haldar J.C 1996. Influence of Built-In Potential on the Effective Surface Recombination Velocity for a Heavily Doped High-Low Junction. *Physica B*. 228, 363-368. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(96\)00474-7](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(96)00474-7)
- [9] E. D. Stokes and T. L. Chu (1977). Diffusion Lengths in Solar Cells from Short-Circuit Current Measurements. *Applied Physics Letters*. 30(8): 425-426.
- [10] Mats Rosling, Henry Bleichner, Mans Mundqvist and Edvard Nordlander (1992). A Novel Technical for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon.
- [11] K. Misiakos, C. H. Wang, A. Neugroschel and F. A. Lindholm (1990). Simultaneous extraction of minority carrier parameters in crystalline semiconductors by lateral photocurrent. *J. Appl. Phys.* 67(1): 321-333.
- [12] 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, pp.173-185. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- [13] 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>
- [14] 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
- [15] Fossum. J.G (1977). Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2, 322-325. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18735>
- [16] 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)
- [17] G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corréa, 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/#.
- [18] 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)
- [19] Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, 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.
- [20] M. Gueye, H. L. Diallo, A. Kosso, M. Moustapha, Y. Traore, I. Diatta et G. Sissoko (2018). AC Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. *World Journal of Condensed Matter Physics*, vol. 8, pp. 185-196, <http://www.scirp.org/journal/wjcmp>.
- [21] Y. Traore, N. Thiam, m. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, vol. 10, pp. 1235-1246.
- [22] G. Diop, H. Y. Ba, N. Thiame, Y. Traore, B. Dione, A. M. Ba, P. Diop, M. S. Diop, O. Mballo et G. 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. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, pp. 4078-4085, www.arpnjournals.com.
- [23] Sissoko, G., Sivoththanam, S., Rodot, M. and Mialhe, P. (1992). Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIODVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montoux, 12-16 October 1992, 352-354.
- [24] B. Zouma, A.S Maiga, M. Dieng, F. Zougmore, G. Sissoko (2009). 3 D Approach of Spectral Response for a Bifacial Silicon Solar Cell Under a Constant Magnetic Field. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, Vol. 15, N°1, pp. 117 – 124.
- [25] Le Quang Nam, M. Rodot, J. Nijs, M. Ghannam et J. Coppel (1992). Réponse Spectrale de Photopiles de Haut Rendement au Silicium Multicristallin. *Journal de Physique III*, Vol. 2, N°7, pp. 1305 – 1316.
- [26] J. F. Wise (1970). Vertical junction hardened solar cell. U. S Patent 3, p 690-953
- [27] B. Mazhari and H. Morkoç (1993). Theoretical study of a parallel vertical multi-junction silicon, *J. App. Phys.* 73(11), pp.7509-7514.

- [28] A Gover, and P. Stella (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis" IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-21:6pp.351-356.
- [29] 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.
- [30] Sissoko, G., Nanema, E., Ndiaye, A.L., Bocande, Y.L.B. and Adj, M. (1996). Minority Carrier Diffusion Length Measurement in Silicon Solar Cell under Constant White Bias Light. Renewable Energy, 3, 1594-1597.
- [31] Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997). Double Side Solar Cells to Improve Static Concentrator. Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, 269-277. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25
- [32] S. Mbodji, A. S. Maiga, M. Dieng, A. Wereme and G. Sissoko. Renoval charge technic applied to a bifacial solar cell under constant magnetic field. Global Journal Of Pure And Applied Sciences Vol 16, NO. 4 2010: 469-477 <http://www.globaljournalseries.com>
- [33] Belmonte, G.G., Boix, P.P., Bisquert, J., Sessolo, M. and Bolink, H.J (2010). Simultaneous Determination of Carrier Lifetime and Electron Density-of-States in P3HT: PCBM Organic Solar Cells under Illumination by Impedance Spectroscopy. Solar Energy Materials & Solar Cells, 94, 366-375. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.10.015>
- [34] Wang, C.H. and Neugroschel, A. (1987). Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity Measurement by Frequency-Domain Photoluminescence. IEEE Transaction on Electron Devices, 38, 2169-2180. <https://doi.org/10.1109/16.83745>
- [35] Honma, N., Munakata, C. and Shimizu, H. (1988). Calibration of Minority Carrier Lifetimes Measured with an Ac Photovoltaic Method. Japanese Journal of Applied Physics, 27, 1322-1326. <https://doi.org/10.1143/JJAP.27.1322>
- [36] Kunst, M., Muller, G., Schmidt, R. and Wetzell, H. (1988). Surface and Volume Decay Processes in Semiconductors Studied by Contactless Transient Photoconductivity Measurements. Applied Physics, 46, 77-85. <https://doi.org/10.1007/BF00615912>
- [37] Lindholm, F.A., Liou, J.J., Neugroschel, A., and Jung, T.W. (1987). Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients. IEEE Transactions on Electron Devices, 34, 277-283. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22919>
- [38] Barro, F.I., Maiga, A.S., Wereme, A. and Sissoko, G (2010). Determination of Recombination Parameters in the Base of a Bifacial Silicon Solar Cell under Constant Multispectral Light. Physical and Chemical News, 56, 76-84.
- [39] Jung, T.-W., Lindholm, F.A. and Neugroschel, A (1984). Unifying View of Transient Responses for Determining Lifetime and Surface Recombination Velocity in Silicon Diodes and Back-Surface-Field Solar Cells, with Application to Experimental Short-Circuit-Current Decay. IEEE Transactions on Electron Devices, 31, 588-595. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1984.21573>
- [40] Corrado, C., Leow, SW, Osborn, M., Chan, E., Balaban, B., & Carter, SA (2013). Optimisation du gain et de l'efficacité de conversion d'énergie à l'aide d'un concentrateur solaire luminescent à cellules photovoltaïques en façade. Matériaux d'énergie solaire et cellules solaires, 111, 74-81. doi:10.1016/j.solmat.2012.12.030
- [41] G. Blet (1957). Résistances et capacité internes d'une photopile au sélénium aux basses températures. Phys. Radium, 18 (10), pp.572-578.
- [42] Green. M. A and M.Keevers (1995).Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. Progress Photovoltaics, 3(3): 189-192G. Blet. Interprétation électronique des phénomènes d'inertie dans les photopiles (en particulier capacité interne). J. Phys. Radium, 1954, 15 (12), pp.823-828.
- [43] S.Mbodji, B.Mbow, F.I.Barro, G.Sissoko (2010). A 3D model for thickness and diffusion capacitance of emitter-base junction in a bifacial polycrystalline solar cell. Global Journal of pure and Applied Science vol 16, No.4 2010:pp. 469-477
- [44] S.Mbodji, M. Dieng, B.Mbow, F.I.Barro, G.Sissoko (2009). Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the diffusion capacitance of a polycrystalline bifacial silicon solar cell. Journal des sciences pour l'ingenieur. N° 11 pp.64-69
- [45] S.Mbodji, M. Dieng, B.Mbow, I.Zerbo, G.Sissoko (2012). Analysis of the diffusion capacitance's efficiency of the bifacial silicon solar cell in steady state operating condition. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology 4(4): 282-288.
- [46] Donolato, C. (1994). Reciprocity Theorem for Charge Collection by a Surface with Finite Collection Velocity: Application to Grain Boundaries. Journal of Applied Physics, 76, 959-966. <https://doi.org/10.1063/1.357774>
- [47] 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>
- [48] Sinton, R.A. and Cuevas, A. (1996). Contactless Determination of Current-Voltage Characteristics and Minority-Carrier Lifetimes in Semiconductors from Quasi- Steady-State Photoconductance Data. *Applied Physics Letters*, 69, 2510-2512. <https://doi.org/10.1063/1.117723>
- [49] Basu, P.K. and Singh, S.N. (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, 317-329. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90234-8](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90234-8)
- [50] Konstantinos Misiakos and Dimitris Tsamakis (1994). Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. *Appl. Phys. Lett.* 64(15), pp.2007-2009.
- [51] Furlan, J. and Amon, S (1985). Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. *Solid State Electronics*, 28, pp.1241-43. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90048-6)
- [52] 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>
- [53] A. Corréa, I. Gaye, B. Ba, A. L. Ndiaye, and G. Sissoko (1994). Solar cells parameters determination by constant illumination induced transient voltage decay method., *Renewable Energy*, Vol 5, part I, pp.166168, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- [54] M. Kunst And A. Sanders (1992). Transport of excess carriers in silicon wafers », *Semicond. Sci. Technol.* 7, In the UK, pp: 51 – 59.
- [55] G Sissoko, B Dieng, A Correa, M Adj, D Azilinson (1998). Silicon solar cell space charge region width determination by a study in modelling. *Proceeding of the World Renewable Energy Conference and Exhibition 3*, 1852-1855.