



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

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/18713
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18713>



RESEARCH ARTICLE

VITESSE DE RECOMBINAISON DYNAMIQUE A LA JONCTION ET EN FACE ARRIERE : APPLICATION A LA DETERMINATION DE L'EPAISSEUR OPTIMUM DE LA BASE (P) D'UNE PHOTOPILE (N+/P/P+) AU SILICIUM CRISTALLIN SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE

Matar Niane¹, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba^{1,2}, Khady Loum^{1,3}, Rasmane Simpore^{1,4}, Ibrahima Diatta¹, Youssou Traore^{1,3}, Moustapha Thiame^{1,5}, Sega Gueye^{1,6} and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Faculte des Sciences et Techniques, Université de Nouakchott, -Mauritanie.
3. Université Iba Der THIAM de Thiès, Sénégal.
4. Université Nobert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso.
5. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.
6. Faculte des Sciences et Technologies de l'éducation et de la Formation-Departement de Physique et Chimie, Université Cheikh Anta DIOP, Dakar-Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 March 2024
Final Accepted: 14 April 2024
Published: May 2024

Key words:-

Photopile Au Silicium-Vitesse De
Recombinaison Dynamique-Epaisseur
Optimum

Abstract

Par résolution de l'équation de diffusion en régime dynamique relative à la densité de porteurs minoritaires de charge dans la base(p), de la photopile sous éclairage polychromatique, munie des conditions aux limites associées aux vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière, l'expression de la densité du photocourant dynamique est établie. Elle permet de déduire les expressions de la vitesse de recombinaison dynamique des porteurs minoritaires de charge à la jonction et en face arrière de la base, qui par comparaison graphique, conduisent à la détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile, pour chaque valeur de la fréquence de modulation de la lumière incidente.

Copy Right, IJAR, 2024,. All rights reserved.

Introduction:

Les dimensions géométriques[1 – 9] des différentes régions[7 – 10] qui constituent la photopile[10 – 17] en général et l'épaisseur celle de la base en particulier, ont une grande influence sur la réponse en courant et en tension selon les conditions de fonctionnement. La modélisation, l'optimisation et la détermination de ce paramètre géométrique devient ainsi fondamental dans l'évaluation de la performance et le coût de la photopile[18 – 27]. De récents travaux s'appuyant sur la technique de comparaison des expressions des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires sur la face arrière[28 – 41] ont permis de modéliser[11] et de déterminer l'épaisseur optimum de la base[42 – 65] de la photopile, donnant ainsi un courant de court-circuit maximal. Ces résultats sont obtenus en prenant en compte des expressions du coefficient de diffusion dépendant du taux de dopage[44,62], du coefficient de mobilité par la température[45] et du champ magnétique[52,53] du flux d'énergie d'irradiation[54] ou de la fréquence de modulation[46,48,50,51]. Le coefficient d'absorption mono ou polychromatique [66,67] du matériau (Si), de la photopile. Il est aussi important, car présent dans les expressions des vitesses de recombinaison. La superposition des conditions externes appliquées à la photopile donne de nouveaux résultats de l'épaisseur

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

Address:- Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable, Bp. 12003 Dakar
Sénégal.

optimum, à travers des mécanismes physiques de résonance [51,55, 57 – 59,64,65] en fréquence, en température et avec les combinaisons de systèmes.

Dans ce travail, nous allons utiliser cette même technique de comparaison graphique des expressions de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière, associée à celle de la vitesse de recombinaison à la jonction, pour déterminer et modéliser l'épaisseur optimum de la photopile ($n^+ - p - p^+$) en fonction de la fréquence de modulation de la lumière polychromatique incidente sur la face (n^+).

Théorie

Présentation de la photopile

Dans notre étude, on considère une photopile monofaciale de type ($n^+ - p - p^+$) [6 – 10, 10 – 19] éclairée par une lumière polychromatique fonctionnant en régime dynamique de modulation de fréquence. La structure de la photopile considérée est représentée sur la **figure .1**, constituée par la partie frontale (émetteur comportant des grilles métalliques, fortement dopé en atomes de phosphore et de faible épaisseur), suivie de la zone de charge d'espace (jonction assimilée à un condensateur plan, où existe un fort champ électrique, due aux charges électriques fixes, pour la séparation des charges photocréées), la base (dopée faiblement en atomes de bore, et de grande épaisseur) et enfin la région (p^+) qui est fortement dopée en atomes de bore (créant un champ électrique pour le renvoi des charges électriques vers la jonction) et parachevée par un contact électrique

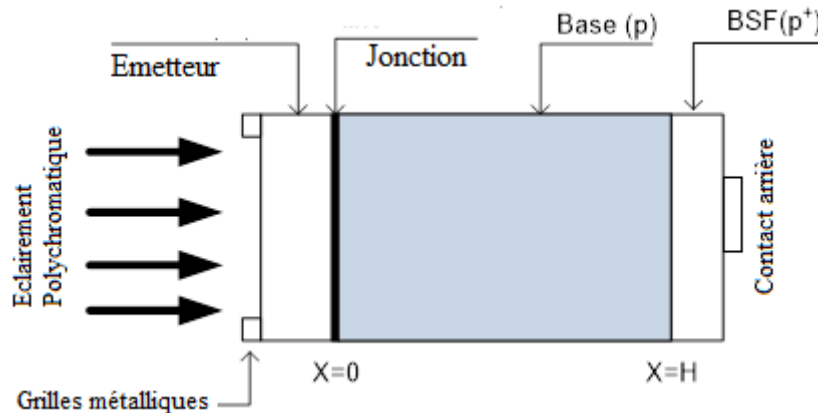


Figure 1:- Structure d'une photopile ($n^+ - p - p^+$) *ausilicium cristalin*

b) Equation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge

L'équation de continuité relative à la densité de porteurs minoritaires de charge en excès $\delta(x, \omega, t)$ dans la base, sous illumination polychromatique en modulation de fréquence (ω), est donnée par la relation [68 – 74] suivante:

$$D \frac{\partial^2 \delta(x, \omega, t)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \omega, t)}{\tau} = \frac{\partial \delta(x, \omega, t)}{\partial t} - G(x, \omega, t) \quad (1)$$

$$\delta(x, \omega, t) = \text{la densité dynamique des porteurs de charge à l'abscisse } x \text{ et au temps } t$$

$$\delta(x, \omega, t) = \delta(x) e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$G(x, t) = \text{le taux de génération dynamique des porteurs de charge à l'abscisse } x \text{ et au temps } t$$

$$G(x, \omega, t) = g(x) e^{i\omega t} \quad (3)$$

Où $\delta(x)$ et $g(x)$ sont respectivement les composantes spatiales de la densité des porteurs de charge et du taux de génération [67], et $e^{i\omega t}$ est la composante temporelle.

$$g(x) = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i x} \quad (4)$$

En remplaçant chaque grandeur (Eq. 2 et 3) par leurs expressions dans (Eq.1) nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 \delta(x, \omega)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x, \omega)}{L^2(\omega)} = - \frac{g(x)}{D(\omega)} \quad (5)$$

$D(\omega)$ = coefficient de diffusion en régime dynamique,

$$D(\omega) = D_0 \times \left(\frac{1 - j \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + (\omega \cdot \tau)^2} \right) \quad (6)$$

$$L(\omega) = \sqrt{\frac{D(\omega) \cdot \tau}{1 + j\omega\tau}} \quad (7)$$

D_0 et τ respectivement coefficient de diffusion et la durée de vie des porteurs de charge en régime permanent. En régime dynamique fréquentiel, le coefficient et la longueur de diffusion des porteurs de charge (équations 6 et 7) sont des grandeurs complexes ($j^2 = -1$) qui varient en fonction de la fréquence de modulation [68 – 74].

La solution de l'équation de continuité (Eq. 5) est sous la forme :

$$\delta(x, \omega) = A \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) + B \operatorname{sh}\left(\frac{x}{L(\omega)}\right) + \sum_{i=1}^3 c_i e^{-b_i x} \quad (8)$$

Les coefficients **A** et **B** sont déterminées à partir des conditions aux limites qui sont.

A la jonction ($n^+ - p$):

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \omega, S_f)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(\omega)} \delta(0, \omega, S_f) \quad (9)$$

En face arrière de la base ($p - p^+$):

$$\left. \frac{\partial \delta(x, H, \omega, S_b)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D(\omega)} \delta(H, \omega, S_b) \quad (10)$$

S_f et S_b sont respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction [27, 29, 31, 34 – 36] et à la surface arrière [27, 29, 30, 32, 34 – 37] de la photopile

Expression de la vitesse de recombinaison dynamique des porteurs minoritaires de charge à la jonction (n^+/p) et en face arrière (p/p^+) de la photopile monofaciale éclairée par la face (n^+)

Le profil de la densité de photocourant de court-circuit $J_{ph}(S_f, \omega, H, S_b)$ en fonction de (S_b) [27, 29, 31, 34 – 36] montre deux zones plates et constantes, pour $S_b < 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ et $S_b > 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Dans ces intervalles de fréquence, il vient donc que:

$$\frac{\partial J_{ph}(S_f, \omega, H, S_b)}{\partial S_b} = 0 \quad (11)$$

La résolution de l'équation (11) donne deux solutions $S_{f,0}$ et $S_{f,1}$

$$S_{f,0}(\omega, H) = -\frac{D(\omega)}{L(\omega)} \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)} \quad (12)$$

$$S_{f,1}(\omega, H, b_i) = \sum_{i=1}^3 D(\omega) \frac{\left\{ b_i - e^{-b_i H} \left(\frac{1}{L(\omega)} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + b_i \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) \right\}}{\left(e^{-b_i H} \left(\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) + b_i L(\omega) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right) - 1 \right)} \quad (13)$$

La vitesse de recombinaison dynamique des porteurs minoritaires de charge $S_{f,1}(\omega, H, b_i)$ dépend des paramètres intrinsèques (D , L) de la photopile, de la fréquence de modulation et aussi du coefficient d'absorption composite (b_i) du matériau [67].

$S_{f,0}(\omega, H)$ dépend uniquement des paramètres intrinsèque de la photopile. Elle est une valeur asymptotique [34] de $S_{f,1}(\omega, H, b_i)$ lorsque (H) est très grand devant (L).

d) Expressions de la vitesse de recombinaison dynamique des porteurs minoritaires de charge en face arrière (p/p^+) de la photopile

La représentation du profil de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction, présente aux grandes valeurs de S_f un palier correspondant à la densité de photocourant de court-circuit, alors dans cet intervalle le gradient de la densité de photocourant est nul et s'écrit [28 – 41]:

$$\frac{\partial J_{ph}(S_f, \omega, H, S_b)}{\partial S_f} = 0 \tag{14}$$

La résolution de l'équation (14) donne deux solutions distinctes représentées par les équations (15) et (16) suivantes :

$$S_{b1,H}(\omega, H) = -\frac{D(\omega) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{L(\omega) \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)} \tag{15}$$

$$S_{b2,H}(\omega, H) = \sum_{i=1}^3 \left\{ D(\omega) \frac{b_i \left(\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - e^{-b_i H} \right) - \frac{1}{L(\omega)} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right)}{\left(\operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) - e^{-b_i H} - b_i L(\omega) \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(\omega)}\right) \right)} \right\} \tag{16}$$

Sur la face arrière de la photopile, $S_{b1,H}$ caractérise la vitesse de recombinaison des porteurs de charge repoussés vers la jonction. Elle est aussi une valeur asymptotique [34] de $S_{b2,H}(\omega, H, b_i)$ et devient $\left(\frac{D}{L}\right)$, lorsque (H) est très grand devant (L) ou devient $(D \cdot b_i)$, pour $\left(\frac{1}{b_i}\right)$, grand devant (H) pour les fortes pénétration de la lumière.

Résultats:-

La technique de détermination de l'épaisseur optimum [44 – 67] de la base, s'appuie pour cette fois-ci sur la représentation à la **figure. 2** des profils, en fonction de l'épaisseur (H) de la base, des expressions des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction $S_{f,1}$ et en face arrière $S_{b2,H}$, toutes deux dépendantes du coefficient composite d'absorption (b_i) ainsi que de la fréquence (ω) de modulation de la lumière incidente [35].

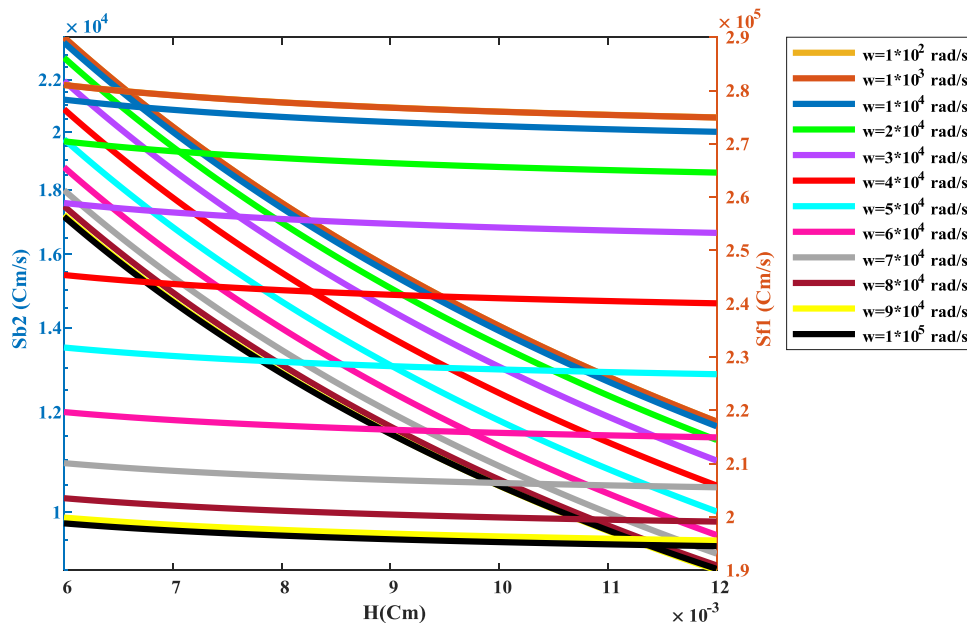


Figure 2:- $S_{f,1}$ et $S_{b2,H}$ en fonction de la profondeur de la base pour différentes valeurs de la fréquence.

Pour une valeur donnée de la fréquence de modulation, la projection sur l'axe des abscisses de l'intersection des courbes des expressions de $S_{f,1}$ et $S_{b2,H}$ correspond à la valeur de l'épaisseur optimum. L'ensemble des valeurs de H_{opt} correspondant à différentes valeurs de la fréquence (ω) de modulation sont données dans le **tableau. 1**.

Tableau 1:- H_{opt} en fonction de la fréquence de modulation.

ω (rad · s ⁻¹)	$D(\omega)$ (cm ² · s ⁻¹)	H_{opt} (cm)
10 ²	35	0.0066
10 ³	34.9965	0.0066

10^4	34.6552	0.0067
$2 \cdot 10^4$	33.6808	0.0071
$3 \cdot 10^4$	32.2399	0.0076
$4 \cdot 10^4$	30.5562	0.0083
$5 \cdot 10^4$	28.8617	0.0090
$6 \cdot 10^4$	27.3522	0.0097
$7 \cdot 10^4$	26.1583	0.0103
$8 \cdot 10^4$	25.3380	0.0108
$9 \cdot 10^4$	24.8847	0.0112
10^5	24.7487	0.0113

La **figure. 3** représente le profil de l'épaisseur optimum en fonction de la fréquence ω de modulation.

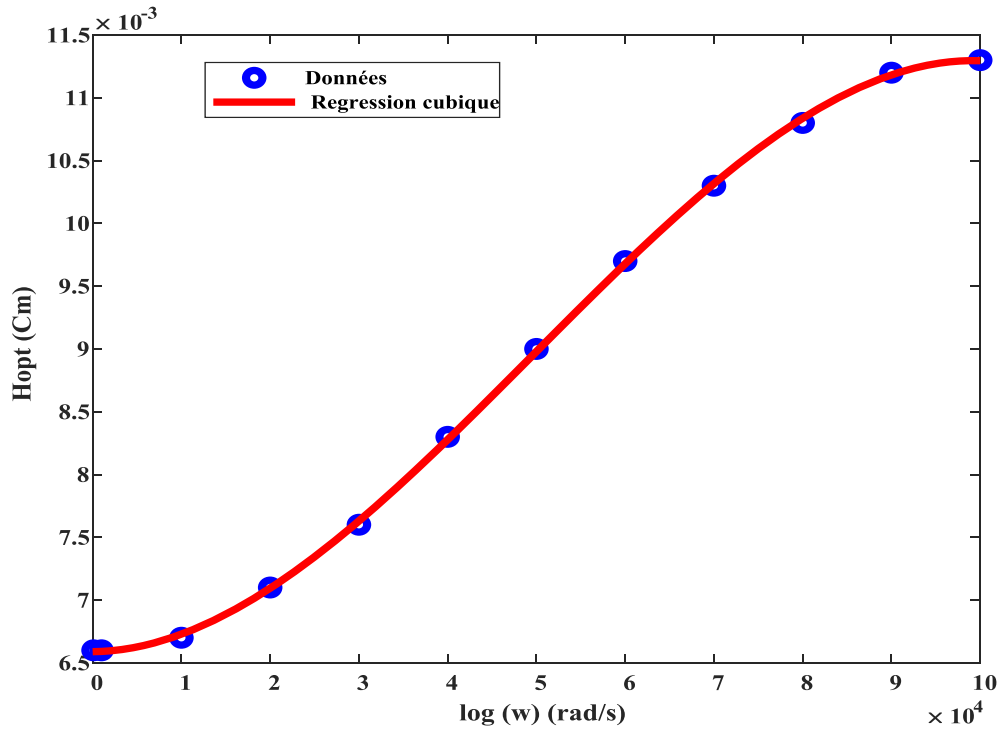


Figure 4:- Epaisseur optimum en fonction de la fréquence de modulation.

Nous observons que l'épaisseur optimale de la photopile augmente avec la fréquence de modulation suivant la régression quadratique donnée par l'équation 17 :

$$H_{opt}(\omega) = -9.58 \cdot 10^{-18} \omega^3 + 1.422 \cdot 10^{-12} \omega^2 + 6.493 \cdot 10^{-10} \omega + 0.006589 \quad (17)$$

A partir des résultats du **Tableau. 1**, nous représentons sur la **figure. 5** l'épaisseur optimale de la base en fonction du coefficient de diffusion dynamique (Eq. 6).

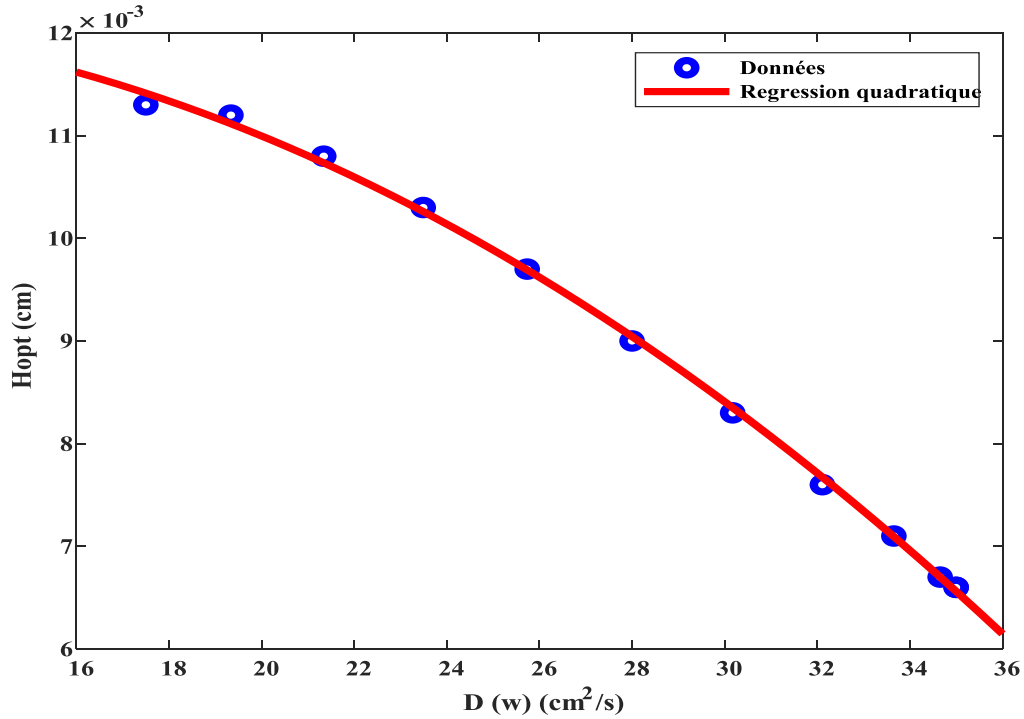


Figure 5:- Epaisseur optimum en fonction du coefficient de diffusion dynamique.

L'épaisseur optimale de la base de la photopile diminue lorsque le coefficient de diffusion augmente suivant la régression mathématique représenté par l'équation. 18.

$$Hopt(D(\omega)) = -7.366 \cdot 10^{-6} D(\omega)^2 + 0.0001094 D(\omega) + 0.01175 \quad (18)$$

Toujours à partir des résultats du Tableau. 1 et de la relation (Eq. 7) nous représentons sur la figure. 6 l'épaisseur optimale de la base en fonction de la longueur de diffusion dynamique.

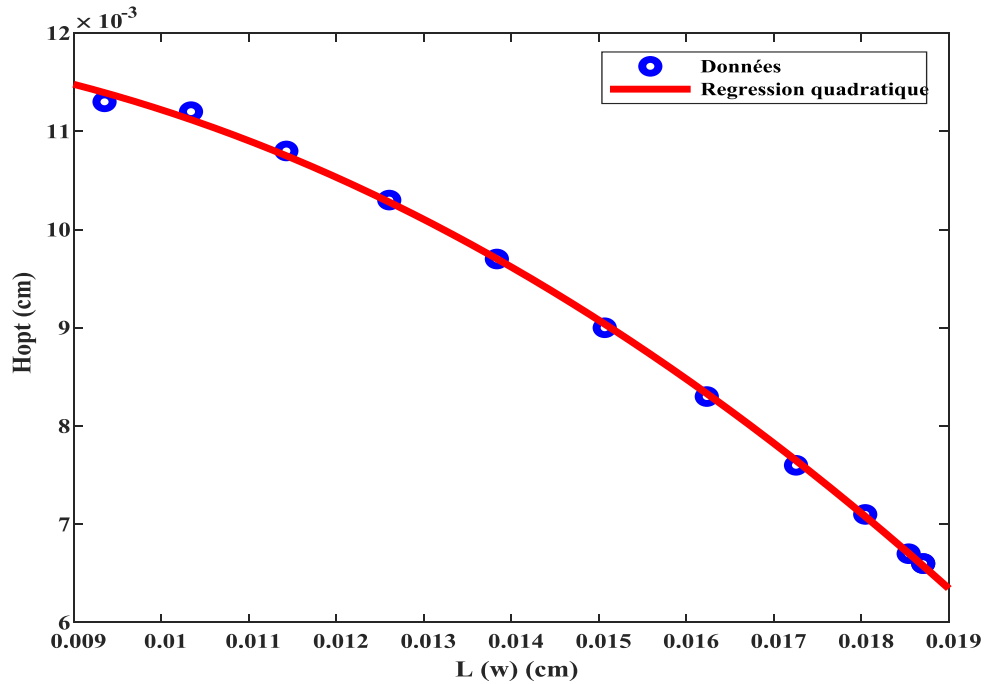


Figure 6:- Epaisseur optimum en fonction de la longueur de diffusion dynamique.

L'épaisseur optimale de la base de la photopile diminue lorsque la longueur de diffusion dynamique augmente suivant la régression mathématique représentée par l'équation. 19.

$$\text{Hopt}(L(\omega)) = -28.27 \cdot L(\omega)^2 + 0.2783 \cdot L(\omega) + 0.01126 \quad (19)$$

Les expressions asymptotiques de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires (Eq. 12 et Eq. 15) ont largement été utilisées [46,48,49,50,51,63] dans la détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile au silicium en régime dynamique fréquentiel, donnant une décroissance en fonction de la fréquence. Il en a été de même dans les conditions de température [45], de champ magnétique [52 – 54], de variation de taux de dopage [44,62], de résonance [55,57 – 59,64,65]. Ces nouveaux résultats viennent d'apporter l'effet de la prise en compte du coefficient d'absorption composite sur la détermination de l'épaisseur optimum de la base, par une relation croissante avec la fréquence de modulation.

Conclusion:-

Dans ce travail, nous avons modélisé et déterminé l'épaisseur optimum de la photopile monofaciale, par la technique de la représentation graphique des deux expressions des vitesses de recombinaison dynamique à la jonction et en face arrière, dépendantes de l'absorption composite. Cette étude nous a permis de voir les effets de l'absorption de la lumière incidente sur la détermination de l'épaisseur optimum de la base de la photopile au silicium éclairée par la face (n+), à travers une corrélation croissante avec la fréquence de modulation.

Références Bibliographiques:-

1. 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.
2. R. Van Steenwinkel, M.C. Carotta, G. Martinelli, M. Merli, L. Passari and D. Palmeri (1990). Lifetime Measurement in Solar Cell of Various Thickness and Related Silicon Wafer. *Solar Cells*, 28, 287-292. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(90\)90063-BG](https://doi.org/10.1016/0379-6787(90)90063-BG).
3. Lago-Aurrekoetxea, R.M., et al. (2001) Fabrication Process for Thin Silicon Solar Cells. *Proceedings 17th European PVSEC*, Munich, 22-26, October 2001, 1519-1522.
4. 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)
5. Huljić, E.H., R. Ludemann and G. Willeke (2001). Large area crystalline Silicon solar cells with pad printed front side metallization. *Proceeding of 17th European PVSEC*. Munich, pp: 1582-1585.
6. 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)
7. G. Sissoko, B. Dieng, A. Corréa, M. Adj, D. Azilinson (1998). Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modelling. *Renewable Energy*, vol-3, pp.1852-55-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#
8. F. I. Barro, S. Mbodji, M. Ndiaye, E. Ba, G. Sissoko (2008). Influence of grains size and grains boundaries recombination on the space-charge layer thickness z of emitter-base junction's n⁺-p-p⁺ solar cell. *Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 604-607
9. Dieng, M., Seibou, B., Ibrahima, L.Y., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G. (2017). Silicon Solar Cell Emitter Extended Space Charge Region Determination under Modulated Monochromatic Illumination by Using Gauss's Law. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*
10. P. K. Basu and S. N. Singh (1994). On The Determination of Minority Carrier Diffusion Length in the Base Region of n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cells Using Photoresponse Methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 33, 317-329. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90234-8](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90234-8)
11. Gover, A. and Stella, P. (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-21: 6. pp.351-356, <https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927>
12. Hüber, A., Aberle, A.G. and Hezel, R. (2001) 20% Efficient Bifacial Silicon Solar Cells. *Munich 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 1796-1798.
13. Martin A. Green (2013). High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts. Chapter published 2013 in *Solar Cells*, Pp. 87-113 <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-386964-7.00005-6>
14. Le Quang Nam M. Rodot, Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering back surface field and emitter passivation. *Int. J. Solar Energy*, 1992, 11, 273-279.
15. Fossum, J.G. and Burgess, E.L. (1978) High Efficiency p⁺-n-n⁺ Back-Surface-Field Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 33, 238-240. <https://doi.org/10.1063/1.90311>

16. 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.
17. 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)
18. 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>
19. 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
20. 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>.
21. 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.
22. S.Yasar, S.Kahraman, S. Apaydin, S. Bilican I., Uluer, Numerical thickness optimization study of CIGS based solar cells with wxAMPS, Optik, 127 (20), 8827-8835.
23. Navruz, T.S. and Saritas, M. (2012) Determination of the Optimum Material Parameters for Intermediate Band Solar Cells Diffusion Model. Progress in Photovoltaics Research and Applications 1672-1676, 22, 593-602. <https://doi.org/10.1002/pip.2283>
24. 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.
25. 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>.
26. H.L.Diallo, A. Seïdou. 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>
27. 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)
28. 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>
29. 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)
30. O.Diasse. A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf. I. Diatta. R.Mane. Y. Traore and G.Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. Journal of Modern Physics, 2018, 9, 189-201.
31. Grégoire Sissoko and Senghane Mbodji (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
32. Sissoko, G., Nanema, E., Correa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and Ndiaye, A. L (1998). Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. Renewable Energy, Elsevier Science Ltd, 0960-1481/#. Vol-3, pp.1848-1851.
33. Barro, F.I., Nanema, E., Wereme, A., Zougmore, F. and Sissoko, G. (2001) Bulk and Surface Recombination Measurement in Silicon Double Sided Surface Field Solar Cell under Constant White Bias Illumination. Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, 22-26 October 2001, 368-371.
34. 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.
35. Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., NDiaye, M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Maïga, A.S. and Sissoko, G. (2012). 1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation, Monochromatic Illumination:

- Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface Recombination Velocity. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 1672-1676.
36. H. Ly Diallo, B. Dieng, I. Ly, M.M. Dione, M. Ndiaye, O.H. Lemrabott, Z.N. Bako, A. Wereme And G. Sissoko (2012). Determinations of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4(16): 2626-2631. ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization, 2012 <http://www.maxwell.org>
 37. Denise, K., Mamadou, L.B., Mamour, A.B., Gora, D., El Hadj, S., Oulimata, M. and Gregoire, S. (2020) AC Back Surface Recombination in $n^+ - p - p^+$ Silicon Solar Cell: Effect of Temperature. International Journal of advanced Research (IJAR), 8, 140-151. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11273>
 38. 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.
 39. Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko, AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. Journal of Modern Physics, 2019, 10, 1235-1246. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1010082>
 40. M. Gueye, H. L. Diallo, A. Kosso, M. Moustapha, Y. Traore, I. Diatta et G. Sissoko, Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. World Journal of Condensed Matter Physics, 2018, 8, 185-196.
 41. 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
 42. 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.
 43. Gilbert Ndiassé Dione, Hamet Yoro Ba, Gora Diop, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Bifacial ($n^+ / p / p^+$) silicon solar cell base thickness optimization, while illuminated by the rear face with monochromatic light of short wavelengths. International Journal of Advanced Research, www.journalijar.com, Volume 10, Issue 9, pp: 409 – 418, 2022.
 44. 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 Determine Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. World Journal of Condensed Matter Physics, 2019, 9, 102-111.
 45. F.M. Ndiaye, M.L. Ba, M.A. Ba, G. Diop, I. Diatta, E.H. Sow, O. Mballo and G. Sissoko (2020). Lamella Silicon Optimum Width Determination under Temperature. International Journal of Advanced Research, 2020, 8, 1409-1419.
 46. Iliasse Fagnane Diouf, Ousmane Sow, Gora Diop, Malick Ndiaye, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. 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](http://www.jsaer.com), Volume 9, Issue 10 pp: 10-20, 2022.
 47. Khady Loum, Nafy Diop, Ibrahima Diatta, Gilbert N Dione, Malick Ndiaye , Youssou Traore, Ousmane Sow, Sega Gueye, Moustapha Thiame, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko. Localization of the (p / p^+) junction in the (p) base of an ($n^+ - p - p^+$) silicon solar cell under front face (n^+) monochromatic illumination. Journal of Scientific and Engineering Research, 2023, 10
 48. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Youssou Traore, Sega 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](http://www.jsaer.com), Volume 10, Issue 3 pp: 1-10, 2023.
 49. Matar Niane, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Moussa Ibra Ngom, Mamadou Yacine Ba, Khady Loum, Sega Gueye, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. AC back surface recombination, as applied to determine (p) base thickness of both conventional and vertical series junction ($n^+ / p / p^+$) silicon solar cells under white illumination. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 152 – 163, 2023.

50. Amadou Mar Ndiaye, Sega Gueye, Ousmane Sow, Gora Diop, Amadou Mamour Ba, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Lemrabott Habiboullah, Gregoire Sissoko. A.C. Recombination Velocity as Applied to Determine $n^+/p/p^+$ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness. Energy and Power Engineering (EPE), <http://www.scirp.org/journal/epe>, Volume 12, pp: 543-554, 2020.
51. Sall, M, Diarisso .D ,FatyMbaye Fall, M, Diop, G, Ndiaye, M, Loum/ K and Sissoko, G. (2021). Back Illuminated $N/P/P^+$ Bifacial Silicon Solar Cell under Modulated Short-Wavelength: Determination of Base Optimum Thickness. Energy and Power Engineering, **13**, 207-220. doi: 10.4236/epe.2021.135014
52. Diop, G., Ba, H.Y., Thiam, N., Traore, Y., Dione, B., Ba, M.A., Diop, P., Diop, M.S., Mballo, O. and Sissoko, G. (2019). Base Thickness Optimization of a Vertical Series Junction Silicon Solar Cell under Magnetic Field by the Concept of Back Surface Recombination Velocity of Minority Carrier. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, **14**, 4078-4085.
53. Thiaw, C. , Ba, M. , Amadou Ba, M. , Diop, G. , Diatta, I. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2020) n^+-p-p^+ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, **12**, 103-113. doi: 10.4236/jemaa.2020.127009.
54. Ba, M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. and Sissoko, G. (2019). Base Thickness Optimization of a (n^+-p-p^+) Silicon Solar Cell in Static Mode under Irradiation of Charged Particles. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, **11**, 173-185. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
55. Ndiaye, A. , Gueye, S. , Mbaye Fall, M. , Diop, G. , Ba, A. , Ba, M. , Diatta, I. , Habiboullah, L. and Sissoko, G. (2020) Diffusion Coefficient at Resonance Frequency as Applied to $n^+/p/p^+$ Silicon Solar Cell Optimum Base Thickness Determination. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, **12**, 145-158. doi: 10.4236/jemaa.2020.1210012.
56. 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.
57. 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.
58. Ousmane Sow, Sega Gueye, Richard Mane, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. $(n^+/p/p^+)$ 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.
59. Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Khady Loum, Sega 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.
60. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Malick Ndiaye, Youssou Traore, Sega 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.
61. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Moussa Ibra Ngom, Youssou Traore , Sega Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko. 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.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 164 – 175, 2023.
62. Malick Ndiaye, Ousmane Sow, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Dibor Faye, Khady Loum, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. 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.jcbcs.org, Volume 12, Issue 4, pp: 266 – 280, 2022.

63. Gora Diop , Sega Gueye, Ousmane Sow, Amadou Mamour Ba, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Gregoire Sissoko. Ac Composite Back Surface Recombination Velocity As Applied to n+/p/p+ Silicon Solar Cell Optimum Thickness Base Determination. International Journal of Advanced Research, www.journalijar.com, Volume 8, Issue 9, pp: 580 - 587, 2020.
64. Noh Mohamed Moctar Ould Mohamed, Ousmane Sow, Sega Gueye, YoussouTraore, IbrahimaDiatta, AmaryThiam, MamourAmadou Ba, Richard Mane, Ibrahima Ly, GregoireSissoko (2019). Influence of Both Magnetic Field and Temperature on Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination. Journal of Modern Physics, 10, 1596-1605 <https://www.scirp.org/journal/jmp>
65. Faye, D., Gueye, S., Ndiaye, M., et al. (2020) Lamella Silicon Solar Cell under both Temperature and Magnetic Field: Width Optimum Determination. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 12, 43-55. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2020.124005>
66. M. A. Green and M. Keevers, Optical Properties of Intrinsic Silicon at 300K. Progress in Photovoltaics, 1995, 3, 189-192. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.4670030303>
67. 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)
68. Ndiaye, E.H., Sahin, G, Dieng, M., Thiam, A, Diallo, H.L., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2015) Study of the Intrinsic Recombination Velocity at the Junction of Silicon Solar under Frequency Modulation and Irradiation. Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, 1522-1535. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311177>
69. Thiam. N, Diao. A, Ndiaye. M, Dieng. A, Thiam.A, Sarr. M, Maiga. A.S and Sissoko G. (2012). Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 4646-4655.
70. Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity S_{fcc} at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 5, 203-208. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
71. Mandelis, A.A. Ward and K.T. Lee.(1989). Combined AC photocurrent and photothermal reflectance response theory of semiconducting p-n junctions. J. Appl. Phys. Vol.66. No.11. pp 5572 – 5583. <http://dx.doi.org/10.1063/1.343662>
72. Luc, B., Shahriar, M., Dean, H., Marco, S., Manuela, A. and Claudio, N. (1994). Investigation of Carrier Transport through Silicon Wafers by Photocurrent Measurement. Journal of Applied Physics, 75, 4000-4008. <https://doi.org/10.1063/1.356022>
73. Chih Hsin Wang and Arnost Neugroschel (1991). Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. IEEE transactions on electron devices, vol.38, no. 9, pp2169-2180.
74. 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)
75. 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>.