



RESEARCH ARTICLE

DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIMUM DE LA COUCHE (p) CZTS, SOUS ÉCLAIREMENT MONOCHROMATIQUE ET SOUS TEMPERATURE

Rasmane Simpore^{1,2}, Khady Loum^{1,3}, Lemerabott Habiboulha^{1,4}, Moustapha Thiame^{1,5}, Segue Gueye^{1,6} and Gregoire Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Université Norbert ZONGO, Koudougou, Burkina Faso.
3. Université Iba Der THIAM de Thiès, Sénégal.
4. Ecole Multinationale de Télécommunication-Dakar, Sénégal.
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: 31 March 2024

Final Accepted: 30 April 2024

Published: May 2024

Key words:-

Couches Minces CZTS, Température, Vitesse de Recombinaison, Epaisseur Optimum

Abstract

La photopile mono-faciale à couche mince de CZTS sous éclairage monochromatique par la face avant et en régime stationnaire, est étudiée sous température (T). De l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge à la profondeur (x) dans la base, ainsi que celle du photocourant, les expressions de la vitesse de recombinaison sont déduites. Ainsi la représentation graphique par des courbes bis axes des expressions de $Sb_1(H,T)$ et $Sb_2(\alpha, T, H)$ puis celle de $Sf_2(\alpha, T, H)$ et $Sb_2(\alpha, T, H)$ permet d'extraire l'épaisseur optimum de la base, puis les analyser en fonction de la température et du coefficient d'absorption du matériau. La représentation graphique de l'épaisseur optimum donne une fonction décroissante de la température, pour une absorption donnée.

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

Introduction:-

Les cellules solaires à couche mince Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) possède des caractéristiques optiques [1-19] intéressantes telles que l'énergie de la bande interdite de 1,4-1,5 eV et le coefficient d'absorption ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$) requis pour la fabrication de cellules solaires à film mince. En outre, le CZTS présente des éléments abondants, non-toxiques et bon marché, ce qui permet d'obtenir une cellule solaire moins dommageable pour l'environnement et à faible coût d'investissement.

L'étude orientée vers la recherche sur l'application des films minces CZTS est encore insuffisante et nécessite des recherches plus poussées pour augmenter le rendement de conversion. Diverses variétés de techniques [2,3,15-18] physiques et chimiques ont été utilisées pour fabriquer les cellules solaires à base de CZTS à savoir la co-évaporation, l'évaporation thermique, le dépôt par laser pulsé le sol-gel le spray pyrolyse, etc.

Le rendement de conversion photovoltaïque [9, 16-18] de cette cellule a été amélioré de 0.66% en 1996 et à 12.92% en 2018. Ce rendement reste faible malgré les propriétés potentiellement très intéressantes du matériau CZTS ainsi que les techniques de fabrication.

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

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

Pour cerner les questions qui limitent le rendement des cellules conçues à base de ce matériau, une meilleure compréhension des paramètres phénoménologiques de la cellule à couche mince CZTS est nécessaire.

D'autres études réalisées sur la caractérisation de la cellule solaire sous éclairage et sous différents régimes (statique ou dynamique), ont conduit à la détermination des paramètres phénoménologiques [20-42] et macroscopiques [43-53].

Dans ce présent travail, notre étude porte sur l'optimisation [54-65] de l'épaisseur de la base de la cellule solaire CZTS sous éclairage monochromatique en régime statique. La résolution de l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge, munie des conditions aux limites de la base, permet la détermination de l'expression de la densité de photocourant $J_{ph}(S_f, S_b, \alpha, T, H)$. Partant de la densité de photocourant, les expressions des vitesses de recombinaison des porteurs minoritaires de charge respectivement à la jonction S_f [22, 23, 26-28] et en face arrière S_b [22-26] de la base sont déduites, en fonction de la température (T) de la cellule solaire CZTS.

Ce travail s'appuie sur la technique de détermination de l'épaisseur de la base [54-65], en exploitant l'intersection des représentations graphiques bi axes, des couples d'expressions de la vitesse de recombinaison des porteurs de charge minoritaires $S_{b1}(H, T)$ et $S_{b2}(H, T, \alpha)$ et celles de $S_{f2}(H, T, \alpha)$ et $S_{b2}(H, T, \alpha)$ en fonction de H , pour différentes valeurs de la température (T), afin d'extraire l'épaisseur optimum (H_{opt}) de la base de la cellule solaire CZTS éclairée par sa face avant (n^+).

Modele Et Presentation De La Couche Mince CZTS

Le Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) [1-3,9-19] est un semi-conducteur à gap direct dont l'énergie de la bande interdite qui est de 1,45 à 1,5 eV est proche de la valeur optimale pour les applications photovoltaïques. Son coefficient d'absorption optique élevé ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) et sa conductivité de type (p) en font un matériau prometteur pour les cellules solaires en couches minces. Les cellules photovoltaïques à base de CZTS sont constituées de plusieurs couches Mo/CZTSe/CZTS/CdS/ZnO/FTO (Figure. 1). Les éléments clés du dispositif utilisé comprennent, la couche de contact arrière Mo, la couche de champ électrique en surface arrière CZTSe, la couche absorbante CZTS, la couche tampon CdS, la couche fenêtre ZnO et le contact avant FTO.

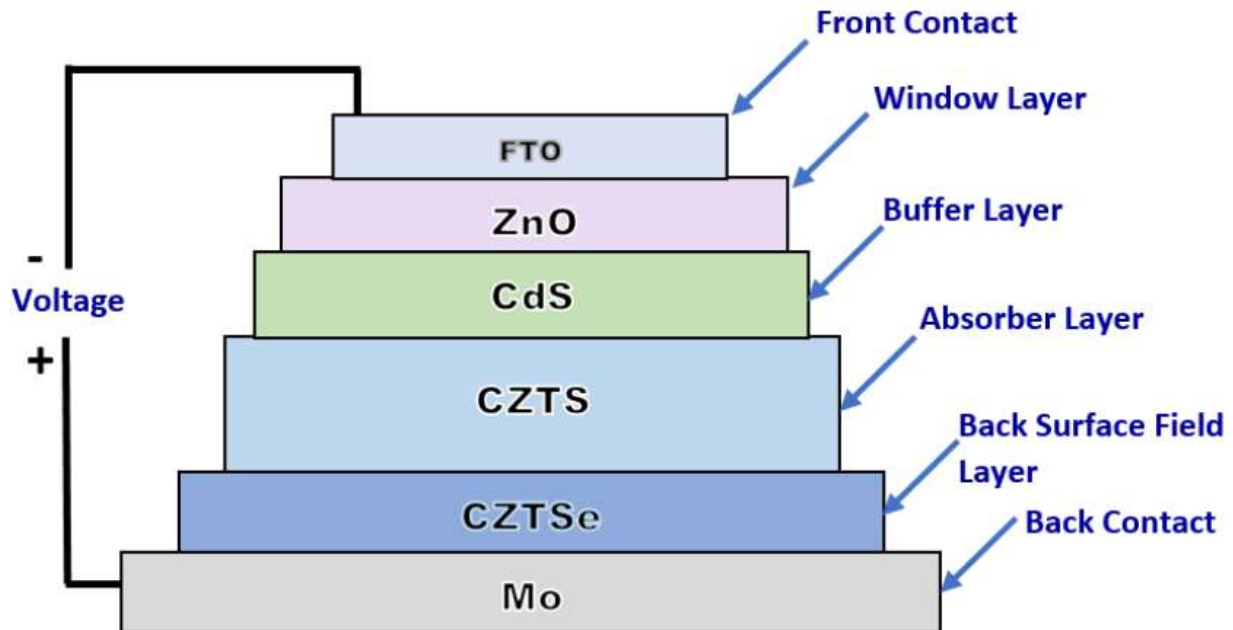


Figure 1:- Schéma fonctionnel de la cellule solaire CZTS [6].

Pour simplifier notre étude, nous nous intéresserons aux parties actives de la cellule solaire à couche mince CZTS. Pour cela nous assimilerons l'émetteur (n^+) aux couches fenêtre (ZnO) et tampon (CdS). Ensuite la base (p) sera assimilée à la couche absorbante (CZTS) et le champ électrique (BSF) en surface arrière (p/p^+) sera assuré par le contact avec la couche CZTSe.

La **figure. 2** donne la représentation simplifiée [6, 40, 41] dans le modèle à une dimension d'espace, de la structure de la cellule solaire à couche mince CZTS.

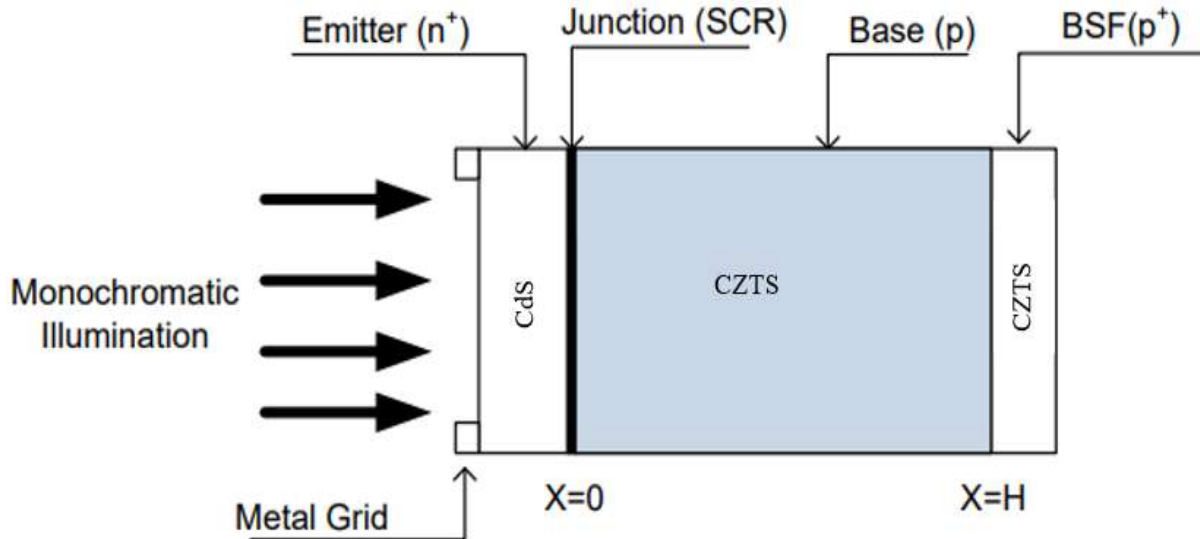


Figure 2:- Structure simplifiée d'une photopile monofaciale à couche mince.

La photopile comprend quatre parties essentielles :

- Emetteur : zone frontale de type n+, dopée en atomes donneurs est modélisée par les couches d'oxyde d'étéint dopé au fluor (FTO) et d'oxyde de zinc (ZnO) et de la couche de sulfure de cadmium (CdS), où le taux de dopage varie de 10^{17} à 10^{19} atome. cm^{-3} [1,9,19] de faible épaisseur ($\approx 0.5\mu\text{m}$), qu'on appelle également face avant (n+).
- Base : zone de type (p), est peu dopée en atomes accepteurs où le taux de dopage varie 10^{15} à 10^{17} atome. cm^{-3} [1,9,19]. Elle est représentée par la couche de disulfure de cuivre d'étéint et de zinc (CZTS) dont l'épaisseur est de l'ordre de $2\mu\text{m}$ [1,19] où les porteurs de charges minoritaires sont les électrons.
- Zone de charge d'espace (ZCE) qui se trouve entre l'émetteur et la base où règne un champ électrique intense qui permet de séparer les paires électron-trou créées.
- Zone arrière : zone surdopée (p+) en atomes accepteurs, représentée par la couche de diséléniure de cuivre d'étéint et de zinc CZTSe, dont l'épaisseur est de l'ordre de $2\mu\text{m}$ [9]. Elle est située sur la face arrière de la base où un champ électrique de surface (Back Surface Field) renvoie les porteurs photocréés près de la face arrière vers la jonction pour optimiser le rendement de conversion.

Theorie

Equation de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans le CZTS

La densité de porteurs minoritaires générés dans la base de la cellule solaire, sous illumination monochromatique en régime statique est donnée par l'équation de continuité suivante :

$$D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x,T)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x,T)}{\tau} + g(x) = 0 \quad (1)$$

$\delta(x,T)$ est la densité de porteurs de charges minoritaires en excès générés dans la base à la température (T), en fonction de la profondeur (x) de la base. Le coefficient de diffusion et la durée de vie des porteurs de charge minoritaires sont respectivement D et τ . Avec $L^2(T) = D(T) \cdot \tau$.

Le taux de génération $g(x)$ [22] pour une radiation monochromatique donnée par :

$$g(x) = \alpha \phi_0 (1 - R) e^{-\alpha x} \quad (2)$$

Les paramètres optiques R , ϕ_0 et α représentent respectivement le coefficient de réflexion, le flux de photon incident et le coefficient d'absorption du matériau CZTS.

Le coefficient de diffusion $D(T)$ est donné par la relation d'Einstein :

$$D(T) = \frac{\mu \times K_b \times T}{q} \quad (3)$$

Où q , T , $\mu = 100 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ [1], $K_b = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, représentent respectivement la charge élémentaire en Coulomb, la température en kelvin, le coefficient de mobilité supposé constante et la constante de Boltzmann.

Résolution de l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base à la température(T)

La résolution de l'équation (1) permet de déterminer l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge photogénérés dans la base de la cellule solaire à la température(T). Elle est donnée par la relation (4) :

$$\delta(x, T, \alpha) = A \cosh\left(\frac{x}{L(T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L(T)}\right) - \frac{\alpha \phi_0 (1-R) L^2(T)}{D(\alpha^2 L^2(T) - 1)} \times e^{-\alpha x} \quad (4)$$

Où A et B sont des coefficients à déterminer à partir des conditions aux limites, données par les équations suivantes :

- A la jonction (x=0)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T, \alpha)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D} \delta(0, T, \alpha) \quad (5)$$

- A la face arrière de la base (x=H)

$$\left. \frac{\partial \delta(x, T, \alpha)}{\partial x} \right|_{x=H} = -\frac{S_b}{D} \delta(H, T, \alpha) \quad (6)$$

Les vitesses de recombinaison des porteurs de charge minoritaires sont représentées respectivement S_f et S_b à la jonction [22, 23, 26-28] et en face arrière [22-26] de la base CZTS. Et $\delta(0, T, \alpha)$ et $\delta(H, T, \alpha)$ représentent respectivement les densités de porteurs minoritaires de charge à la jonction et en face arrière de la couche CZTS à la température(T).

Expression de la densité de photocourant extrait du CZTS

La densité de photocourant est obtenue à partir de l'expression de la densité $\delta(x, S_f, S_b, T, H, \alpha)$ des porteurs minoritaires de charge dans la base.

$$J_{ph}(S_f, S_b, T, H, \alpha) = qD \left. \frac{\partial \delta(x, S_f, S_b, T, H, \alpha)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (7)$$

Expression de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en face arrière

La **figure. 3** représente le profil de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f des porteurs minoritaires de charge à la jonction, pour plusieurs valeurs de la température (T).

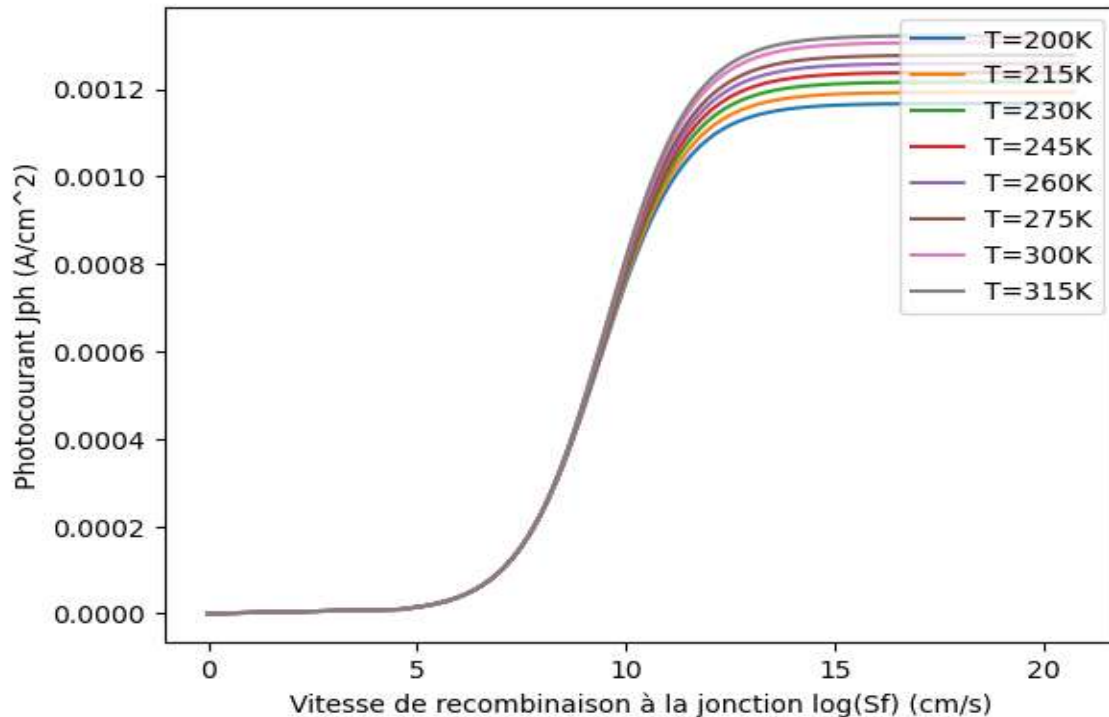


Figure 3:- Profil du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f pour différentes valeurs de la température(T), ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

Les courbes de densité de photocourant des porteurs minoritaires de charge en fonction de la vitesse de recombinaison (S_f), à la jonction montrent que pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison, le photocourant est nul, ce qui correspond à la situation de circuit ouvert de la photopile. et pour les grandes valeurs de S_f , la densité de photocourant présente une asymptote correspondant à la densité de photocourant de court-

circuit, quelle que soit la température (T) de la photopile. La densité de photocourant de court-circuit, est croissante avec la température (T). Pour cet intervalle des grandes valeurs de S_f , on peut donc déduire l'écriture suivante conduisant aux expressions de la vitesse de recombinaison en face arrière[22-26] des porteurs minoritaires de charge:

$$\left. \frac{\partial J_{ph}(S_f, S_b, H, T, \alpha)}{\partial S_f} \right|_{S_f \geq 2,7 \cdot 10^5 \text{ cm.s}^{-1}} = 0 \quad (8)$$

La résolution de l'équation (8) nous conduit aux équations (9) et (10) :

$$S_{b1}(H, T) = -\frac{D(T)}{L(T)} \text{th}\left(\frac{H}{L(T)}\right) \quad (9)$$

$$S_{b2}(H, T, \alpha) = \frac{D(T)}{L(T)} \times \frac{\alpha L \text{ch}\left(\frac{H}{L(T)}\right) - \alpha L(T) \cdot e^{-\alpha H} - \text{sh}\left(\frac{H}{L(T)}\right)}{\text{ch}\left(\frac{H}{L(T)}\right) - e^{-\alpha H} - \alpha L \text{sh}\left(\frac{H}{L(T)}\right)} \quad (10)$$

Expression de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction

La **figure 4** représente le profil du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_b pour plusieurs valeurs de la température (T).

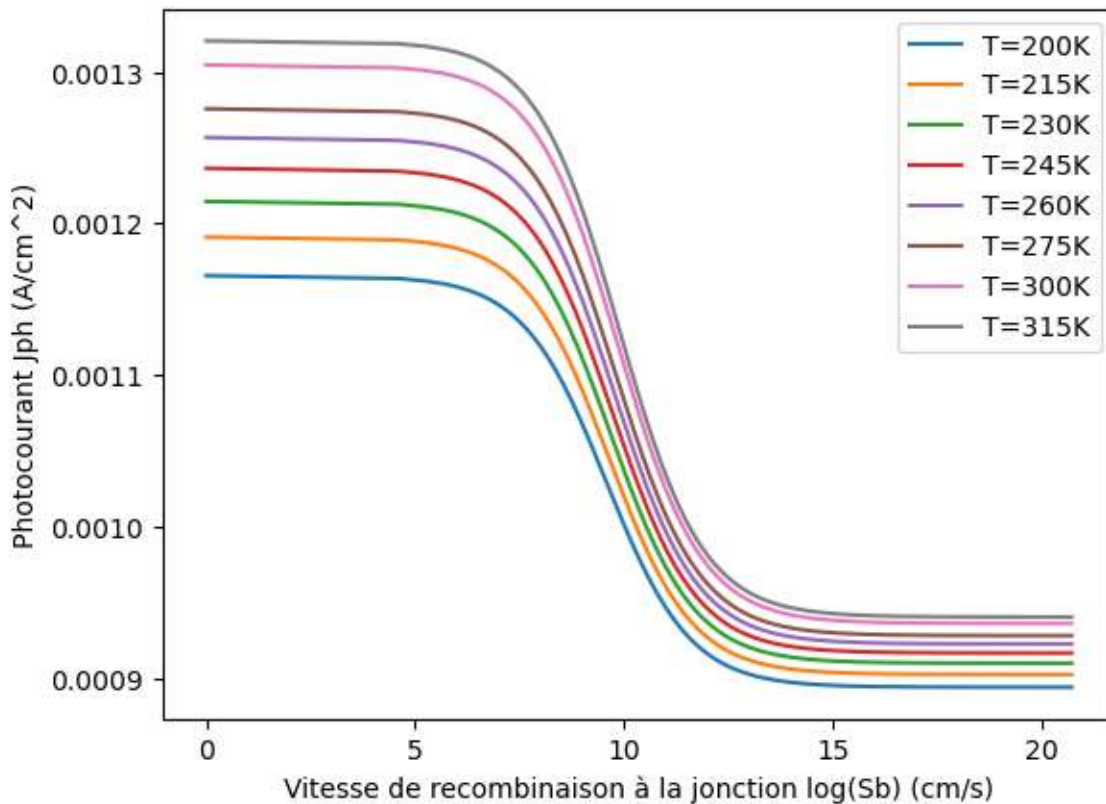


Figure 4:- Profil du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_b pour la photopile à diverses valeurs de la température (T), ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

Les courbes de densité de photocourant des porteurs minoritaires de charge en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière présentent, aux faibles valeurs de S_b , un plateau qui croît avec la température. Cela traduit un effet important du champ arrière (BSF)[40, 41] en face arrière (p/p+) qui renvoie les porteurs minoritaires vers la jonction, pour être collectés et accroître ainsi le photocourant. Aux grandes valeurs de S_b , la densité de photocourant est faible, asymptotique et varie peu avec la température, ce qui correspond à un effet de contact Ohmique en face arrière, avec une forte recombinaison des porteurs minoritaires de charge, induisant une baisse de porteurs de charge collectés à la jonction, et conduisant aux expressions de la vitesse de recombinaison à la jonction[22, 23, 26-28] des porteurs minoritaires de charge

$$\left. \frac{\partial J_{ph}(S_f, S_b, H, T, \alpha)}{\partial S_b} \right|_{S_b \leq 1,1 \times 10^3 \text{ cm.s}^{-1}} = 0 \quad (11)$$

La résolution de l'équation (11) nous conduit aux équations (12) et (13) :

$$S_{f1}(H, T) = -\frac{D(T)}{L(T)} \operatorname{th}\left(\frac{H}{L(T)}\right) \quad (12)$$

$$S_{f2}(H, T, \alpha) = \frac{D(T)}{L(T)} \frac{L(T)\alpha e^{-\alpha H} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(T)}\right) - (L(T))^2 \alpha e^{-\alpha H} \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(T)}\right)}{L(T)\alpha e^{-\alpha H} \operatorname{sh}\left(\frac{H}{L(T)}\right) + e^{-\alpha H} \operatorname{ch}\left(\frac{H}{L(T)}\right) - 1} \quad (13)$$

L'expression (Eq. 9) est également produite en (Eq. 12) pour la vitesse de recombinaison (S_{f1}) des porteurs minoritaires à la jonction [22, 23, 26-28].

Resultats:-

Détermination de l'épaisseur optimum de la couche de CZTS à la temperature(T)

Le contrôle de l'épaisseur de la couche CZTS, s'avère important afin d'éviter l'introduction de certains composants résistifs qui peuvent affecter les performances de celle-ci. L'épaisseur optimum est déterminée en s'appuyant sur le modèle de l'architecture de la structure de la photopile à jonctions verticales connectées en parallèle [66-68] conduisant à un photocourant optimum. Ainsi la représentation graphique bi axes par la **figure. 5** des expressions des vitesses de recombinaison [22] $Sb1$ et $Sb2$ (Eq. 9 et 10), pour différentes températures, conduits aux résultats du **tableau. 1**. Ensuite la représentation graphique bi axes par la **figure. 6** des expressions de $Sb2$ et $Sf2$ (Eq.10 et 13)[57], a permis d'extraire les valeurs de l'épaisseur optimum (**Tableau. 2**) et puis de les représenter pour différentes valeurs de la température.

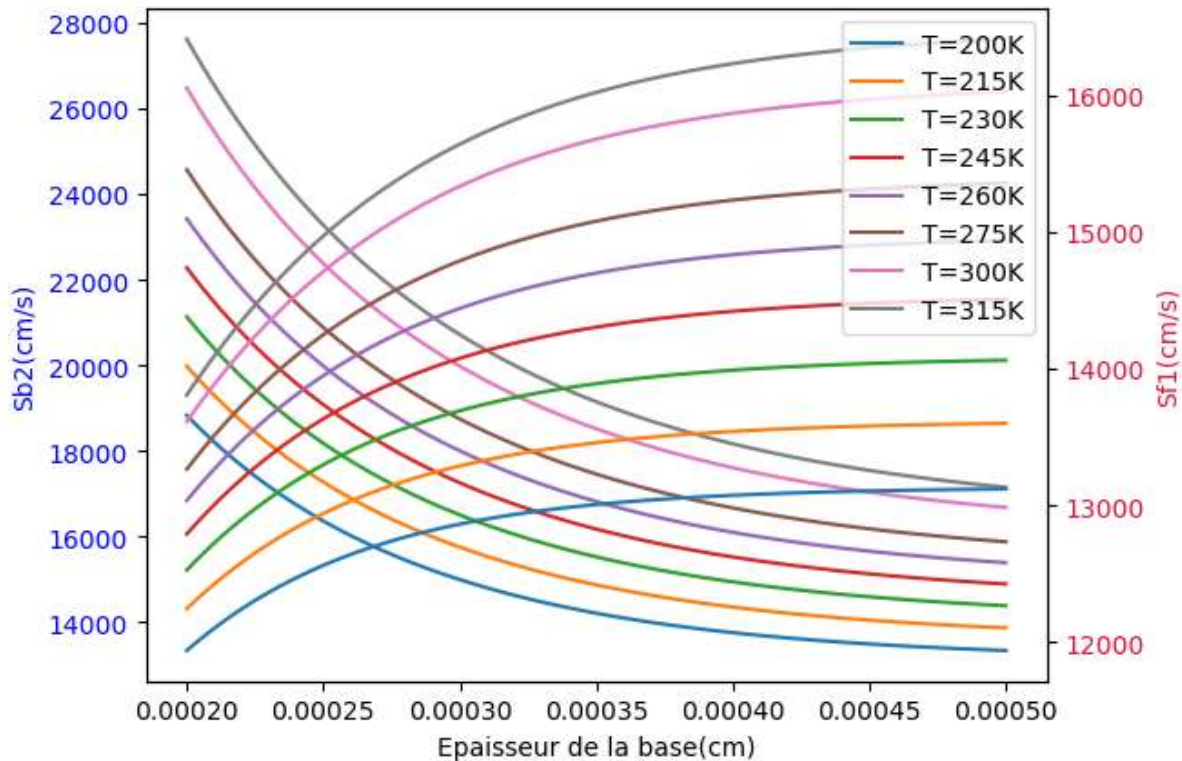


Figure 5:- Courbe de $Sb1$ et $Sb2$ pour différentes valeurs de la température ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

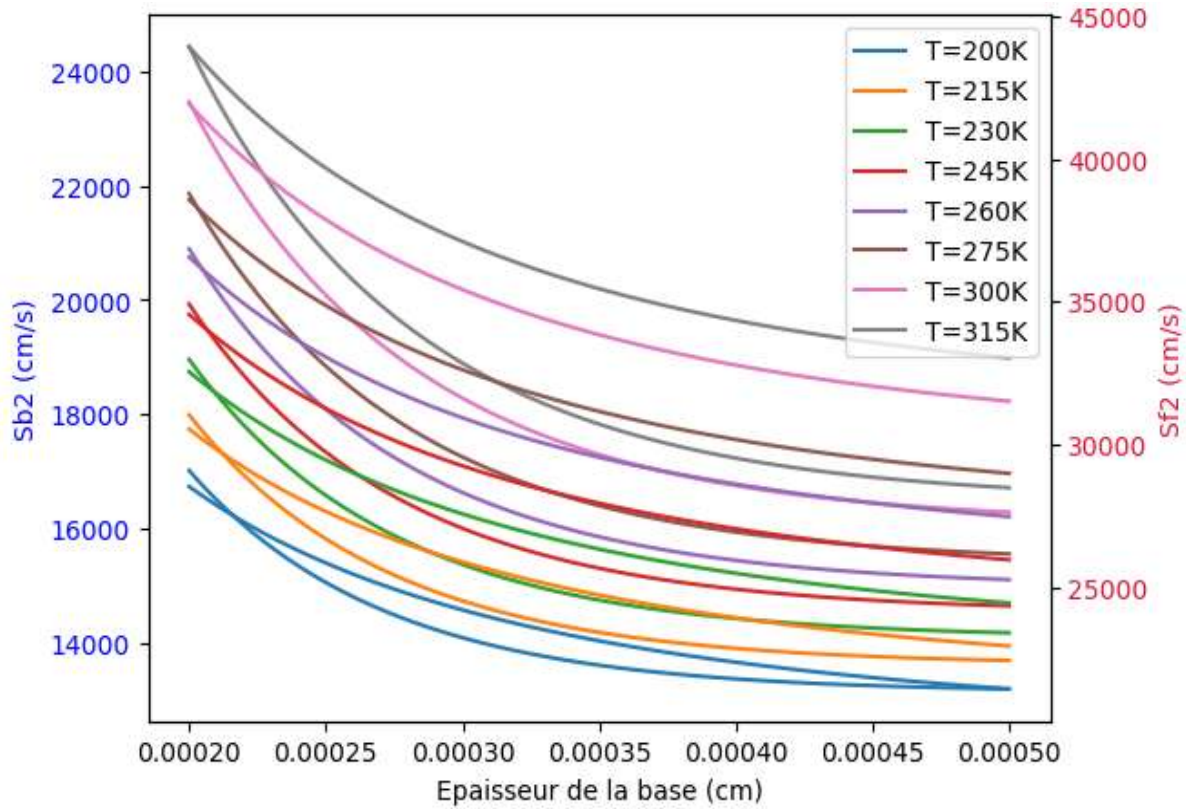


Figure 6:- Courbe de Sb2 et Sf2 pour différentes valeurs de la température ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

Le **tableau. 1** présente les valeurs extraites de l'épaisseur optimum $H_{op1}(T)$ de la **figure. 5** en fonction de la température.

Tableau 1:- Epaisseur optimum $H_{op1}(T)$ pour différentes valeurs de T, ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

T(K)	200	215	230	245	260	275	300	315
Hop1 (cm)	0.00027	0.000265	0.00026	0.000255	0.000253	0.000252	0.000252	0.000252

Le **tableau. 2** présente les valeurs de l'épaisseur optimum $H_{op1}(T)$ en fonction de la température, extraites de la **figure 6**.

Tableau 2:- Epaisseur optimum $H_{op2}(T)$ pour différentes valeurs de T.

T(K)	200	215	230	245	260	275	300	315
Hop2 (cm)	0.00022	0.000218	0.000216	0.000212	0.00021	0.000208	0.000205	0.0002

Les **tableaux. 1** et **2** permettent de représenter sur les **figures. 7** et **8**, respectivement, l'épaisseur optimum $H_{op1}(T)$ et $H_{op2}(T)$ en fonction de la température de la cellule solaire CZTS.

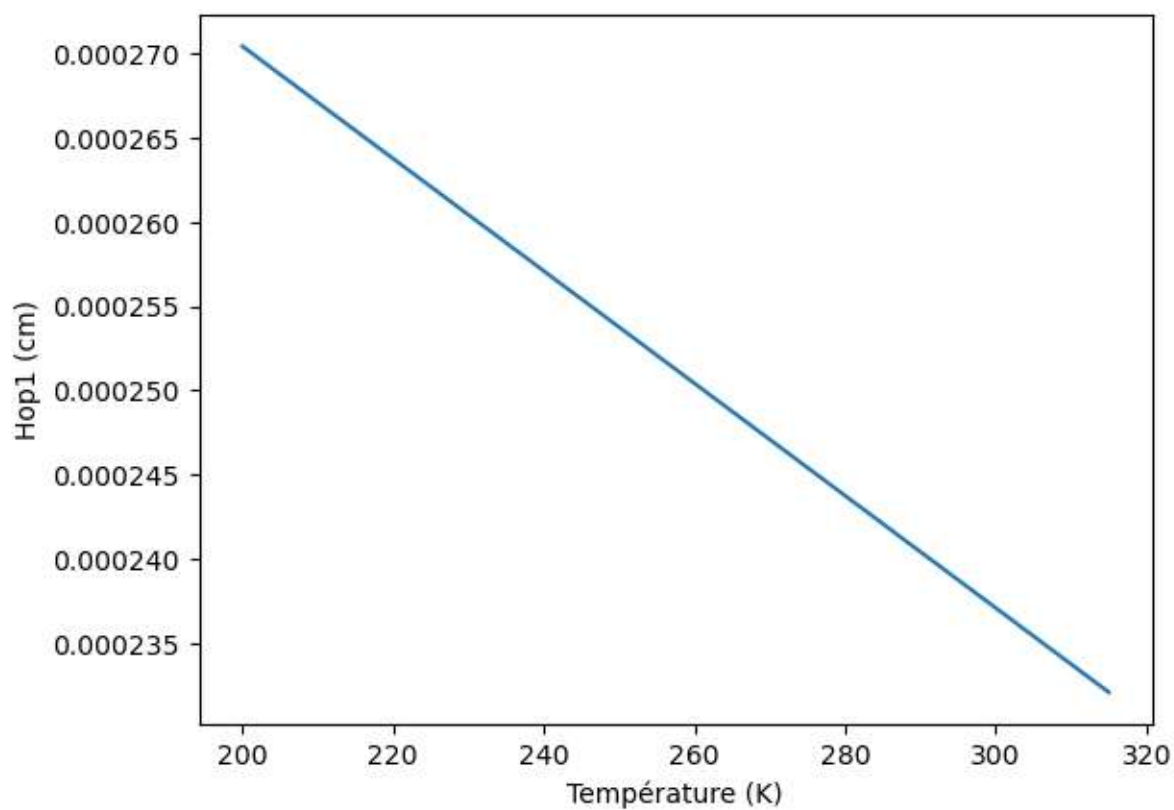


Figure 7:- Profil de l'épaisseur optimum H_{op1} en fonction de la température T .

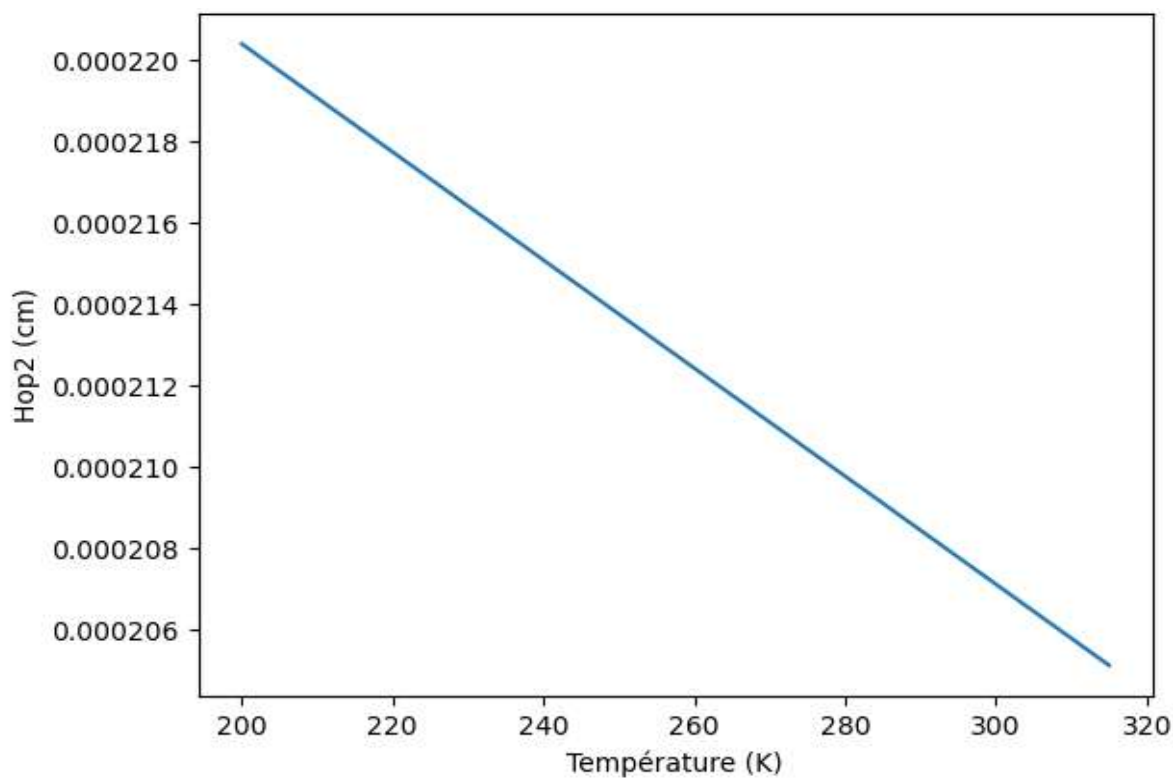


Figure 8:- Profil de l'épaisseur optimum H_{op2} en fonction de la température T .

Les équations mathématiques modélisant les courbes des **figures. 7 et 8** de l'épaisseur optimum de la base, respectivement $H_{op1}(T)$ et $H_{op2}(T)$ sont données par les relations suivantes :

$$H_{op1}(T) = -2 \times 10^{-6}T + 7.2 \times 10^{-4} \quad (14)$$

$$H_{op2}(T) = -1.33 \times 10^{-7}T + 2.47 \times 10^{-4} \quad (15)$$

Les **figures. 7 et 8** illustrent l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche CZTS avec la température. On remarque sur ces deux figures que l'épaisseur de la couche CZTS diminue lorsque la température augmente. L'impact de la température sur la couche CZTS entraînant une augmentation des porteurs de charge photogénérés se veut une épaisseur moins large de la couche CZTS. Ces remarques sont similaires à des travaux évoqués dans la littérature [50-56].

Des travaux antérieurs sur les photopiles à base épaisse en général et en particulier sur les couches minces à base de CZTS, illustrent ces résultats, montrant la réduction de l'épaisseur optimale [1,6].

Conclusion:-

Cette étude de l'effet de la température sur l'épaisseur de la couche absorbante CZTS a été présentée à travers la technique de représentation graphique des expressions des vitesses des porteurs de charge minoritaires à la jonction et en face arrière en fonction de l'épaisseur, pour différentes températures. Les résultats de simulation ont montré que le paramètre externe comme la température a un effet sur la densité des porteurs photogénérés ainsi que sur l'épaisseur de la base de la couche CZTS.

Ce travail présente un intérêt certain dans la modélisation de l'optimisation de l'épaisseur de la couche de CZTS, et peut constituer un référentiel pour le contrôle du processus de fabrication et réaliser des économies de matériaux.

References Bibliographiques:-

1. J.H.N. Tchognia, B. Hartiti, J-M. Ndjaka, A. Ridah Et P. Thevenin., Performances des cellules solaires à base de Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) ResearchGate: une analyse par simulations numériques via le simulateur SCAPS., 11(4) :16-23,2015.
2. Sagna, K. Djessas, C. Sene, M. Belaqziz, H. Chehouani, O. Briot and M. Moret., Growth, structure and optoelectronic characterizations of high quality Cu₂ZnSnS₄ thin films obtained by close spaced vapor transport, Superlattices and Microstructures 6036(15)30048-3,2015.<http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2015.06.019>
3. Sagna, K. Djessas, C. Sene, K. Medjnoun, and S. Grillo., Close spaced vapor transport deposition of Cu₂ZnSnS₄ thin films: Effect of iodine pressure, Journal of Alloys and Compounds, 8388(16)31658-9,2016.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.05.297>
4. . Ouédraogo, R. SAM, F. Ouédraogo, M. B. Kébré, F. Zougmore and J.M.B. Ndjaka., Optimization of Copper Indium Gallium Di-Selenide (CIGS) based solar cells by back S grading, Journal of Ovonic Research, 9(4) :95-103,2014.<http://dx.doi.org/10.1109/AFRCON.2013.6757813>
5. S. Ouédraogo, F. Zougmore , and J.M.B. Ndjaka., Computational analysis of the effect of the surface defect layer (SDL) properties on Cu(In,Ga)Se₂-based solar cell performances, Journal of Physics and Chemistry of Solids 75 (2014) 688–695, 2014.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpcs.2014.01.010>
6. S. Ouédraogo, M. B. Kébré, A. T. Ngoupo, D. Oubda, and F. Zougmore, Comprehensive Analysis of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ Based Solar Cells with Zn_{1-y}Mg_yO Buffer Layer, Materials Sciences and Applications, 11 :880-892,2020.<https://doi.org/10.4236/msa.2020.1112058>
7. S. Ouédraogo, B. Traoré, M. B. Kébré, D. Oubda, A. Zongo, I. Sankara and F. Zougmore., Performance Enhancement Strategy of Ultra-Thin CIGS Solar Cells, American Journal of Applied Sciences, 17: 246.255,2020.<https://doi.org/10.3844/ajassp.2020.246.255>
8. S. Ouédraogo, M.B. Kébré, A.T. Ngoupo, D. Oubda, F. Zougmore and J.M. Ndjaka., Required CIGS and CIGS/Mo Interface Properties for High-Efficiency Cu(In, Ga)Se₂ Based Solar Cells, Advances in Materials Physics and Chemistry, 10 :151-166,2020.<https://doi.org/10.4236/ampc.2020.107011>
9. Y.H. Khattak, F. Baig, T. Hanae, S. Ullah, B. Marí, S. Beg, and H. Ullah, Effect of CZTSe BSF and minority carrier lifetime on the efficiency enhancement of CZTS kesterite solar cell, 1739 (18) 30074-9, 2018.<http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2018.03.013>
10. Bahfir, M. Boumaour and M. Kechouane, Prospects of Potential ZnMgO Front Layer in CZTS Solar Cells, apply to the journal pertain, 4026(18)30717-4,2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.068>

11. N. Touafek., M.S. Aida., R. Mahamdi., and A. Bouloufa., Influence of band gap profiling in front part of absorber on CIGS solar cell performance, International Renewable Energy Congress, 978 (1):4799-2195,2014.<https://doi.org/10.1109/IREC.2014.9826966>
12. N. Touafek and R. Mahamdi, Back Surface Recombination Effect on the UltraThin CIGS Solar Cells by SCAPS, International Journal of Renewable Energy Research, 4(4):958-964, 2014.
13. N. Touafek, C. Dridi and R. Mahamdi., Bathocuproine Buffer Layer Effect on the Performance of Inverted Perovskite Solar Cells, Journal of Technology Innovations in Renewable Energy, 9 :1-6,2020.
14. N. Touakek and R. Mahamdi., Excess Defects at The CdS/CIGS Interface Solar Cells., Chalcogenide Letters, 11(11) :589 – 596,2014.
15. V. Foncrose, J. Persello, P. Puech, J. Y.Chane-Ching , D. Lagarde , A. Balocchi and X. Marie., Chemical insights into the formation of Cu₂ZnSnS₄ films from all-aqueous dispersions for low-cost solar cells., Nanotechnology 28(2017) : 445709,2017.<https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa873a>
16. Z.O. Elhmaidi, M. Abd-Lefdil, and M. A. Khakani, Photoconversion Optimization of Pulsed-Laser-Deposited p-CZTS/n-Si-Nanowires Heterojunction-Based Photovoltaic Devices, Nanomaterials, 10(7), 2020.<https://doi.org/10.3390/nano10071393>
17. Z.O. Elhmaidi, R. Pandiyan, M. Abd-Lefdil, E. Saucedo, and M.A. El Khakani, In-situ tuning of the zinc content of pulsed-laser-deposited CZTS films and its effect on the photoconversion efficiency of p-CZTS/n-Si heterojunction photovoltaic devices, Applied Surface Science, 4332(19)33820-6,2019.<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145003>
18. Z.O. Elhmaidi, R. Pandiyan, M. Abd-Lefdil, and M.A. El Khakani, Pulsed Laser Deposition Of CZTS Thin Films, Their Thermal Annealing And Integration Into n-Si/CZTS Photovoltaic Devices, International Renewable and Sustainable Energy Conference, 978(1) :5090-5713,2016.<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7983988>
19. A.J. Farjana and J.R. Mohammad., Simulation study to find suitable dopants of CdS bufer layer for CZTS solar cell., Journal of Theoretical and Applied Physics.,14 :75-84,2020.
20. P.DeVischere, Comment on G.J. Rees —Surface Recombination Velocity —A Useful Conceptl. Solid-State Electronics,1986,29,1161-1165. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(86\)90059-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90059-6)
21. Gupta, S., Ahmed, P. and Garg, S. (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\(88\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90058-0)
22. G. Sissoko, C. Museruka, A. Corr  a, I. Gaye and A.L.Ndiaye, Spectral Light Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. World Renewable Energy Congress, Denver, 1996,15-21 June 1996, Part III, 1487-1490.
23. H.L.Diallo, A.S. 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, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
24. 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. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
25. K. Denise, L.B. Mamadou, A.B. Mamour, D., Gora, S. El Hadj, M. Oulimata and S. Gregoire (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>
26. 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 (IJETCS), 2012, 2278/6856:18-23).
27. Ly, M. Ndiaye, M. Wade, N. Thiam, S. Gueye and G. Sissoko, Concept of Recombination Velocity Sfcc 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/rjas.5.5105>
28. 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>
29. Vardanyan, R.R., Kerst, U., Wawer, P., Nell, M.E. and Wagemann, H.G. (1998) Method for Measurement of All Recombination Parameters in the Base Region of Solar Cells. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July 1998, 191-193.

30. Gaubas, E. and Vanhellemont, J. (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/10.1063/1.363705>
31. Traore, Y. , Thiam, N. , Thiame, M. , Thiam, A. , Ba, M. , Diouf, M. , Diatta, I. , Mballo, O. , Sow, E. , Wade, M. and Sissoko, G. (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, 10, 1235-1246. doi: 10.4236/jmp.2019.1010082
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. Richard, M., Ibrahima, L., Mamadou, W., Ibrahima, D., Marcel, S.D., Youssou, T., Mor, N., Seni, T. and Grégoire, S. (2017) Minority Carrier Diffusion Coefficient $D^*(B, T)$: Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.91001>
34. 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>
35. M. Saad, A. Kassis (2003). Effect of interface recombination on solar cell parameters. *Solar Energy Materials and Solar Cells* vol. 79, issue 4, Pp. 507-517. [http://dx.doi.org/10.1016/s0927-0248\(03\)00101-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0927-0248(03)00101-6)
36. J.A. Giesecke, M.C. Schubert, B. Michl, F. Schindler, W. Warta (2011). Minority carrier lifetime imaging of silicon wafers calibrated by quasi-steady-state photoluminescence. *Solar Energy Materials and Solar Cells* Vol. 95 issue 3, Pp. 1011-1018 <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.016>
37. Ly Diallo, H., Wade, M., Idrissa, L., Diaye, N.M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Amadou, S.M. 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.
38. 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*, 22, 593-602. <https://doi.org/10.1002/pip.2283>
39. E.Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs and R.Mertens, 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, 66-69. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17
40. J.G. Fossum (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>
41. Le Quang Nam, M. Rodot, M. Ghannam, J. Coppye, P. de Schepper, J. Nijs, D. Sarti, I. Perichaud & S. Martinuzzi. (1992). Solar cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicon, using impurity gettering, back surface field and emitter passivation. *International Journal of Solar Energy*, vol. 11, pp. 273-279. <https://doi.org/10.1080/01425919208909745>
42. K. Taretto, U. Rau, Thomas A. Wagner, Jens Werner (2003). A Simple Method to Extract the Diffusion Length from the Output Parameters of Solar Cells - Application to Polycrystalline Silicon. *Solid State Phenomena* Vol. 93, Pp 399-404 <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.93.399>
43. 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
44. 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>
45. Wafaa Abd El-Basit, Ashraf Mosleh Abd El-Maksood and Fouad Abd El-Moniem Saad Soliman (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, pp.13-28. (<http://ljs.academicdirect.org/>)
46. Ayvazian, G.E., Kirakosyan, G.H. and Minasyan, G.A. (2004) Characteristics of Solar Cells with Vertical p-n Junction. *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, 7-11 June 2004, 117-119
47. Salinger J., Measurement of Solar Cell Parameters with Dark Forward I-V Characteristics, *Acta Polytechnica*, Czech Technical Univ. Publ. House, 2006, 46(4), p. 25- 27

48. Ramos-Hernanz J. A., Campayo J. J., Zulueta E., Barambones O., Eguía P., Zamora I., Obtaining the Characteristics Curves of a Photocell by Different Methods, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13), Bilbao (Spain), 11, 2013, p. 20-26.
49. K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou (2007). Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6, Pp. 1647-165. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
50. M. Bashahu and A. Habyarimana (1995). Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. *Renewable Energy*, 6, 2, pp. 127-138. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)E0021-V](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)E0021-V).
51. El-Adawi, M.K. and Al-Nuaim, I.A. (2002). A Method to Determine the Solar Cell Series Resistances from a Single I-V Characteristic Curve Considering Its Shunt Resistance—New Approach. *Vacuum*, 64, 33-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00370-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00370-0)
52. D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate (2003). A new characterization method for solar cell dynamic impedance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 80, Issue 4, Déc. 2003, Pp. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
53. Jen-Cheng W., Jyh-Cherng S., Yu-Li S. Kun-Chang K., Yen-Wei C., Yu-Ting L., Jui-Jen C., Kuo-Chi L., Joe-Air J., A Novel Method for the Determination of Dynamic Resistance for Photovoltaic Modules, *Energy*, 2011, 36, p. 5968-5974.
54. Matar Niane, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Khady Loum, Rasmane Simporé, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Segha Gueye and Gregoire Sissoko. Etude d'une photopile ($n^+/p/p^+$) au silicium cristallin sous éclairage Polychromatique en modulation de fréquence: effet de la vitesse surfacique de recombinaison, de la fréquence et de l'épaisseur sur les paramètres électriques. *International Journal of advanced Research (IJAR)*, 12(05), 276-289. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18715>.
55. Yasar, S., Kahraman, S., Cetinkaya, S., Apaydin, S., Bilican, I. and Uluer, I. (2016) Numerical Thickness Optimization Study of CIGS Based Solar Cells with wxAMPS, *Optik*, 127, 8827-8835. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.094>
56. Sayem, A.A., Arafat, Y. and Rahman, M.M. (2014) Thickness Optimization and Composition Grading Effect in Heterojunction CIGS Solar Cell. 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, 20 December 2014, 524-527. <https://doi.org/10.1109/ICECE.2014.7026952>
57. Matar Niane, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Moussa Ibra Ngom, Mamadou Yacine Ba, Khady Loum, Segha 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.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 152 – 163, 2023.
58. Sidi Dede, M. Lamine Ba, M. Amadou Ba, M. Ndiaye, S. Gueye, E. Sow, et al. 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. <http://www.scirp.org/journal/epehttps://doi.org/10.4236/epe.2020.127027>
59. Dione, G.N., BA, H.Y., Diop, G., Ndiaye, M., Diatta, I., Loum, K., Traore, Y., Thiame, M., Sow, O., Wade, M. and Gregoire, S. (2022) Bifacial ($n^+ - p - p^+$) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization, While Illuminated by the Rear Face with Monochromatic Light of Shortwavelengths. *International Journal of Advanced Research (IJAR)*, 10, 409-418. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/15372>
60. K. Loum, G. Diop, I. Diatta, R. Mané, M. Ndiaye, Y. Traore, S. Gueye, M. Thiame, O. Sow, M. Wade, and G. 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*, 13(2) :139-151, 2023.
61. . Khady Loum, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Malick Ndiaye, Segha Gueye, Moustapha Thiame, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. 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.
62. R. Simporé, Khady Loum, Segha Gueye, Hamet Y. B.A, Emanuel Nanema, Frederic Ouattara and G. Sissoko (2024). Determination de l'épaisseur optimum de la couche (p) czts, sous éclairage monochromatique, par l'analyse des vitesses surfaciques de recombinaison *Int. J. of Adv. Res. (Apr)*. 394-405 (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com
63. Khady Loum, Nafy Diop, Ibrahima Diatta, Gilbert N Dione, Malick Ndiaye, Youssou Traore, Ousmane Sow, Segha 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(5):34-43.
64. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Moussa Ibra Ngom, Youssou Traore , Segue 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.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 164 – 175, 2023.
65. Matar Niane, Lemerabott Habiboulha, Khady Loum,, Rasmane Simpore Ibrahima Diatta,; Youssou Traore, Moustapha Thiame , Segue Gueye And Gregoire Sissoko (2024). Series Vertical multijunction (SVMJ) silicon solar cell placed under polychromatic illumination in frequency modulation: Effect of surface recombination velocity, frequency and thickness on electrical parameters. JCBPS; Section C. Vol. 14, No. 3; 224-242.
66. 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>
67. Wise, J.F. (1970) Vertical Junction Hardened Solar Cell. U.S. Patent 3, 690-953.
68. D. J. Paez, E. Huante-Ceron, A. P. Knights (2013). A Vertical PN Junction Utilizing the Impurity Photovoltaic Effect for the Enhancement of Ultra-thin Film Silicon Solar Cells MRS Proceedings Vol. 1536, Pp.39 to 44 <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2013.750>.