



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

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/18565
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18565>



RESEARCH ARTICLE

DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIMUM DE LA COUCHE (p) CZTS, SOUS ÉCLAIREMENT MONOCHROMATIQUE, PAR L'ANALYSE DES VITESSES SURFACIQUES DE RECOMBINAISON

R. Simore^{1,5}, Khady Loum¹, Sega Gueye^{1,2}, Hamet Y. B.A.^{1,3}, Emanuel Nanema^{1,4}, Frederic Ouattara^{1,5} and G. Sissoko¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Faculté des Sciences des Techniques de l'Éducation et de la Formation, Université Cheikh AntaDiop, Dakar, Senegal.
3. Ecole Polytechnique de Thiès-Senegal.
4. Centre National de Recherche Scientifiques et Technologiques. IRSAT, Ouagadougou. Burkina Faso.
5. Université Norbert Zongo. Koudougou. Burkina Faso.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 20 February 2024
Final Accepted: 23 March 2024
Published: April 2024

Key words:-

Photopile-Couches Minces CZTS-
Coefficient D'absorption-Vitesse de
Recombinaison-Epaisseur Optimum

Abstract

Dans ce travail, la cellule solaire mono-faciale à couche mince à base de CZTS a été étudiée à partir de l'équation de continuité relative à la densité de porteurs minoritaires de charge en excès dans la base. Les effets des paramètres de structure tel que l'épaisseur et du coefficient d'absorption de la cellule sur les vitesses de recombinaison ont été analysés. La représentation graphique sur échelle bi axes en fonction de l'épaisseur (H), des expressions de la vitesse de recombinaison Sb_1 et Sb_2 ont permis d'extraire les valeurs de l'épaisseur optimum puis, les représenter pour différentes valeurs du coefficient d'absorption. L'effet du coefficient d'absorption sur le fonctionnement de la cellule a montré que plus le coefficient d'absorption augmente plus l'épaisseur optimum diminue. Ce travail ainsi présente un intérêt car il contribue à comprendre le fonctionnement de la cellule CZTS et permet de fabriquer des cellules solaires à couches minces avec un contrôle précis des paramètres du processus d'élaboration.

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

Introduction:-

Ces dernières années, la technologie photovoltaïque ne cesse de croître du fait du développement de nouvelles techniques de fabrication et de l'amélioration du rendement de conversion. De nos jours, le marché des cellules solaires est encore dominé par le silicium cristallin qui occupe environ 80% du marché [1] avec un coût élevé de ces cellules solaires dû à la grande utilisation du matériau et des processus de fabrication qui utilisent des techniques énergivores.

Les cellules solaires à couches minces sont développées pour répondre à ces coûts élevés qui consomment moins de matériaux. Le problème cependant avec cette technologie est que les premières cellules solaires en couches minces qui ont montrées des rendements de 16.5% et 20.3% à savoir les filières CdTe et CIGS respectivement sont faites d'éléments rares et toxiques (Te, Cd, Ga, In, Se) [1-19]. Pour s'affranchir de ces verrous, de nouveaux matériaux absorbants composés de cuivre, de zinc, d'étain, de soufre et parfois de sélénium, $Cu_2 Zn Sn S_4$ (noté CZTS, (Se)) font l'objet de beaucoup d'investigation pour leur utilisation dans les cellules photovoltaïques en couches

Corresponding Author:- G. Sissoko

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

minces. L'engouement suscité par le matériau CZTS est dû à l'abondance, au faible coût ainsi qu'à la non-toxicité des éléments chimiques qui le constituent.

Une variété de techniques [2,3,15-18] physiques et chimiques a été utilisée 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 pyrolysis, etc. Le rendement de conversion [9, 16-18] de cette cellule a été amélioré de 0.66% en 1996 et à 12.92% en 2018. Malgré le développement des différentes techniques de fabrication et l'amélioration du rendement, la compréhension des cellules à base de CZTS reste relativement limitée comparée aux cellules solaires CIGS et CdTe. Afin de proposer des cellules solaires avec de grande efficacité, une étude avancée des procédés de fabrication est nécessaire ainsi qu'une compréhension des performances de la cellule solaire.

Des études ont été réalisées en effectuant des simulations numériques pour mieux comprendre le fonctionnement théorique de la cellule ainsi que ses performances en utilisant le logiciel de simulation SCAPS-1D [1,4-9,11-14,19].

TCHOGNIA et al.[1] a montré que l'épaisseur optimale pour la structure CdS/CZTS est de 2,4 μm en utilisant comme outil de simulation le logiciel SCAPS-1D. Ces résultats ont été obtenus dans des conditions de simulation où l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante CZTS sur la performance de la cellule a été étudié en variant celle-ci de 1 à 5 μm avec d'autres paramètres maintenus constants tel que le coefficient d'absorption fixé à $2,5 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$ et la mobilité à $100 \text{cm}^2/\text{V.s}$.

KHATTAK et al. [9] ont analysé l'effet de l'épaisseur de la couche absorbante en modifiant l'épaisseur de la couche absorbante CZTS de 1 μm à 5 μm tout en maintenant les autres paramètres matériels des différentes couches inchangés. Il ressort de cette étude que l'augmentation de l'épaisseur de la couche absorbante entraîne une augmentation de J_{sc} et de V_{oc} . Il en ressort de leur analyse que l'augmentation de la J_{sc} avec une augmentation de V_{oc} est principalement due à une plus grande absorption des photons de plus grande longueur d'onde, ce qui, à son tour, affectera la proportion de porteurs photo-générés. La valeur optimale de l'épaisseur de la couche absorbante obtenue est de 4 μm avec une mobilité des électrons fixée à $60 \text{cm}^2/\text{V.s}$.

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 [20-37] et macroscopiques [38-42].

Notre étude porte sur l'optimisation [43-56] de l'épaisseur de la base de la cellule solaire CZTS sous éclairage monochromatique en régime statique. Pour cela, nous résolvons l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires. Cette résolution nous permettra de déterminer l'expression de la densité de photocourant $J_{ph}(S_f, S_b, \alpha, H)$ afin de déduire les expressions de $S_b(\alpha, H)$ [21] à l'aide du concept de la vitesse de recombinaison (S_f) [22, 34] des porteurs minoritaires de charge à la jonction.

Ce travail s'appuie sur la technique de détermination de l'épaisseur de la base [50-56], en exploitant l'intersection des représentations graphiques bi axes, des expressions de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires $S_b(H, \alpha)$ et $S_b(H)$ en fonction de H , pour différentes valeurs du coefficient d'absorption, afin d'extraire l'épaisseur optimale (H_{opt}) de la base de la cellule solaire CZTS éclairée par sa face avant (n^+).

Theorie

Description et rôle et des différentes régions de la cellule CZTS

Le $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (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 (**Figure. 1**). La structure utilisée dans le cadre de notre étude est représentée sur **la figure. 1**, commençant par le substrat, la barrière d'isolation, les contacts arrière et avant, les couches semi-conductrices et enfin, le revêtement antireflet.

1. Le contact avant : Il constitue une première couche d'oxyde conducteur transparent (TCO) et est généralement utilisé comme contact frontal dans les cellules solaires, comme l'oxyde de zinc ZnO, l'oxyde d'étain-indium $\text{In}_2\text{O}_3\text{Sn}$ (ITO) et l'oxyde d'étain dopé au fluor $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO). La couche TCO doit présenter une transparence optique élevée et sur laquelle une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la

- résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Il doit s'agir d'un semi-conducteur à large bande interdite de plus de 3eV. En outre, elle doit avoir une faible résistivité.
2. La couche fenêtre : elle est aussi de nature d'oxyde conducteur transparent et doit être aussi à la fois transparente, afin de laisser suffisamment de lumière à la région de jonction et la couche absorbante du dispositif, et conductrice pour permettre le transport du photo-courant généré au circuit extérieur sans trop de pertes. La couche fenêtre est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO: Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO: B) ou le Gallium (ZnO: Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. Ils servent à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait de la couche absorbante par la couche tampon. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO: Al ont respectivement des bandes d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV.
 3. La couche tampon : La fonction principale d'une couche tampon est de former une jonction pn avec la couche absorbante. En outre, la couche tampon doit pouvoir permettre à un maximum de lumière d'atteindre la jonction et doit présenter moins de pertes d'absorption et de recombinaison avec une résistance minimale. En général, les matériaux de type n dans les couches minces utilisés comme couche tampon comprennent le CdS, le ZnS et l'In₂S₃. La densité de dopage dans la couche tampon doit être supérieure à celle de la couche absorbante pour limiter la région de déplétion au niveau de l'absorbeur, car les porteurs de charge sont séparés par son champ électrique. La couche tampon doit avoir une large bande interdite pour une transmission maximale dans la région visible du spectre solaire. En outre, la désadaptation du réseau et l'alignement du décalage de bande doivent être proches de zéro pour réduire les dislocations et les pièges à porteurs à la jonction.
 4. La couche absorbante : C'est dans cette couche qu'a lieu l'absorption de la lumière et le matériau semi-conducteur absorbant doit avoir une bande interdite directe (environ 1,5eV). car il a un coefficient d'absorption élevé. Les performances des cellules solaires à couche mince reposent sur la couche absorbante, car c'est dans cette couche que se produisent la lumière absorbée et les porteurs générés. Cette couche est donc la partie vitale de la cellule solaire. Un semi-conducteur de type p dans les couches est généralement utilisé comme couche absorbante, notamment le Si, le CdTe, le CIGS et le CZTS. La couche absorbante doit avoir une bande interdite directe avec un coefficient d'absorption élevé de plus de 10⁴cm⁻¹.
 5. La face arrière (BSF) est constitué par une couche de CZTSesurdopée (p+) 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.
 6. Un contact métallique est utilisé en face arrière est constitué de, Al, Ni, Au et Mo. Le contact entre l'hétérojonction métal/semiconducteur dépend des fonctions de travail du métal et de l'affinité électronique du semi-conducteur. Si la fonction de travail du métal est supérieure à celle du semi-conducteur, le contact est ohmique lorsque le semi-conducteur est de type p, et est un contact Schottky lorsque le semi-conducteur est de type (n). En raison de la différence dans la fonction de travail, une barrière apparaît entre le métal et le semi-conducteur, ce qui conduit au contact Schottky. Le contact arrière doit avoir un bon contact électrique (contact ohmique avec le semi-conducteur) et une bonne réflexion optique car, lorsque la lumière n'est pas absorbée par la couche absorbante et atteint le contact arrière, elle doit être réfléchi vers l'absorbeur.
 7. Le substrat : La fonction de cette couche est de fournir un support mécanique et de porter les couches de la cellule solaire. Le substrat de la cellule solaire est généralement constitué de verre, comme le verre sodocalcique, de métal comme conducteur, comme le verre revêtu de Pt, et de feuilles métalliques ou de plastique pour la flexibilité, comme l'acier inoxydable ou le polymère, respectivement. Un substrat en verre conducteur est un excellent conducteur ; cependant, le verre a des limites de forme, est fragile et coûteux. Les feuilles métalliques sont flexibles, peu coûteuses et légères, avec de bonnes conductivités électrique et thermique. En outre, le substrat en plastique est flexible, peu coûteux, léger et plus fin ; cependant, il n'est utilisé que pour les applications nécessitant une basse température en raison de sa faible résistance à la chaleur et du fait qu'il est difficile à manipuler parce qu'il se plie.

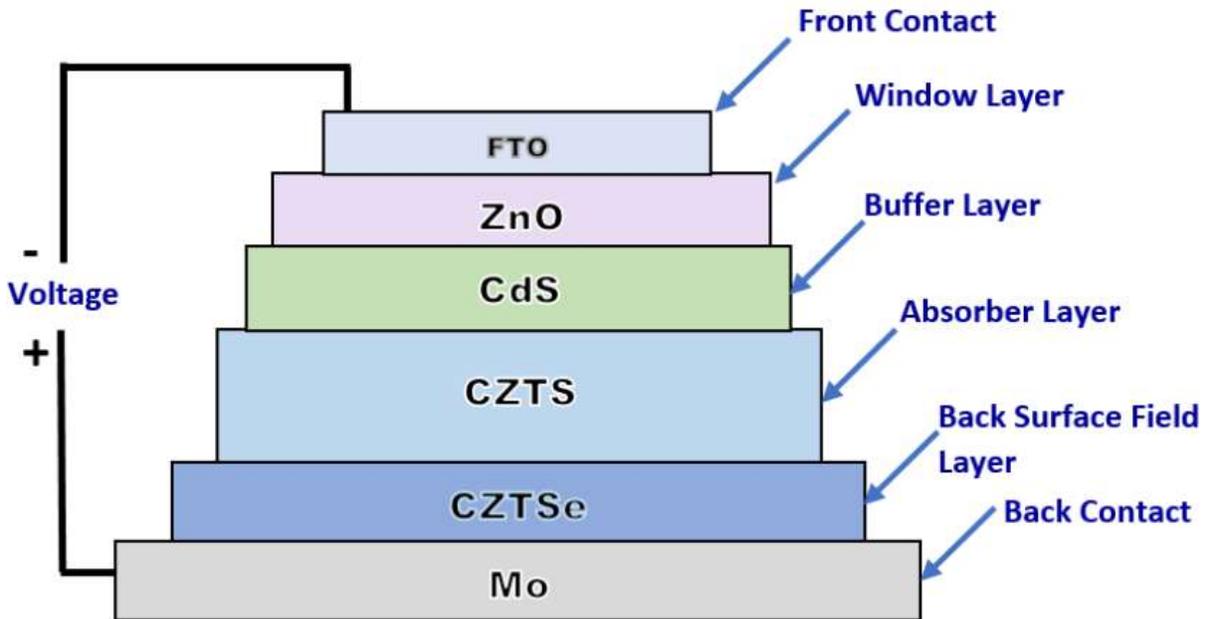


Figure 1:- Schéma fonctionnel de la cellule solaire CZTS [6].

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 de surface arrière BSF (p^+) sera assimilé la couche CZTSe. La **figure. 2** nous donne la représentation simplifiée [59] dans le modèle à une dimension d'espace, de la structure de la cellule solaire à couche mince CZTS.

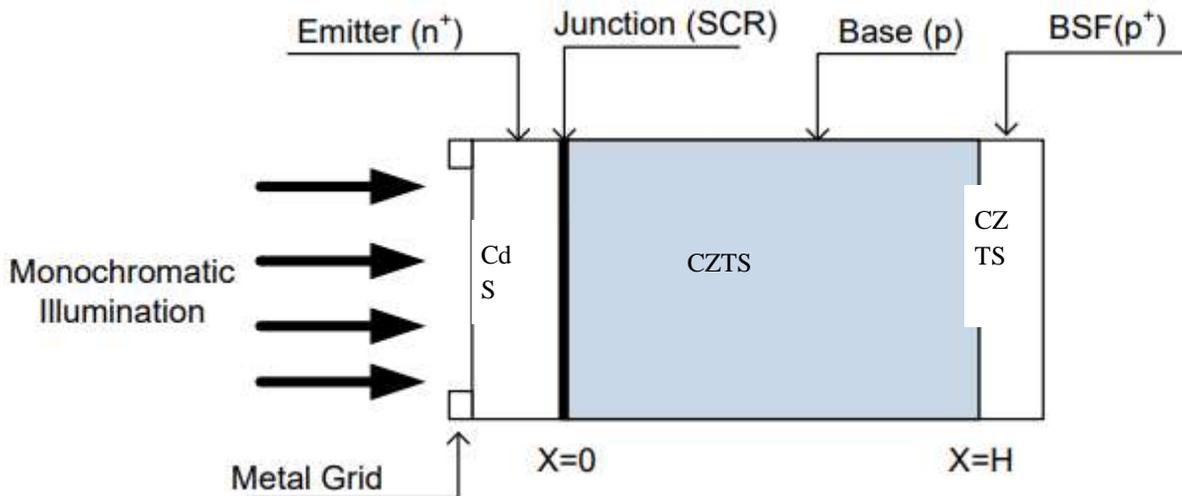


Figure 2:- Structure simplifiée d'une photopile monofaciale à couche mince.

La photopile comprend quatre parties essentielles :

1. Emetteur : zone frontale de type n^+ , dopée en atomes donneurs est modélisée par les couches d'oxyde d'étain 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.
2. Base : zone de type p, 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'étain 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.

3. 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.
4. Zone arrière : zone surdopée p+ en atomes accepteurs, représentée par la couche de diséléniure de cuivre d'éteint 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.

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 :

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

$\delta(x)$ est la densité de porteurs de charges minoritaires en excès générés dans la base en fonction de la profondeur de base x ; D et τ étant respectivement le coefficient de diffusion et la durée de vie des porteurs de charges minoritaires et $g(x)$ le taux de génération [31] pour une radiation monochromatique exprimée 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 est donné par la relation d'Einstein :

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

Où q , T , $\mu = 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [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, la mobilité et la constante de Boltzmann.

Résolution de l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge

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. Elle est donnée par la relation (4) :

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

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

- A la jonction ($x = 0$)

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

- A la face arrière de la base ($x = H$)

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

S_f et S_b représentent respectivement les vitesses de recombinaison des porteurs de charge minoritaires à la jonction [22, 34, 38] et en face arrière [21, 23, 26, 30] de la cellule solaire.

Et $\delta(0, \alpha)$ et $\delta(H, \alpha)$ représentent respectivement les densités de porteurs minoritaires de charge à la jonction et en face arrière de la couche CZTS.

Expression de la densité de photocourant extrait du CZTS

La densité de photocourant est obtenue à partir de l'expression de la densité $\delta(x, S_f, S_b, H, \alpha)$ des porteurs minoritaires de charge dans la base.

$$\text{Soit } J_{ph}(S_f, S_b, H, \alpha) = qD \frac{\partial \delta(x, S_f, S_b, H, \alpha)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (7)$$

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 pour plusieurs valeurs du coefficient d'absorption.

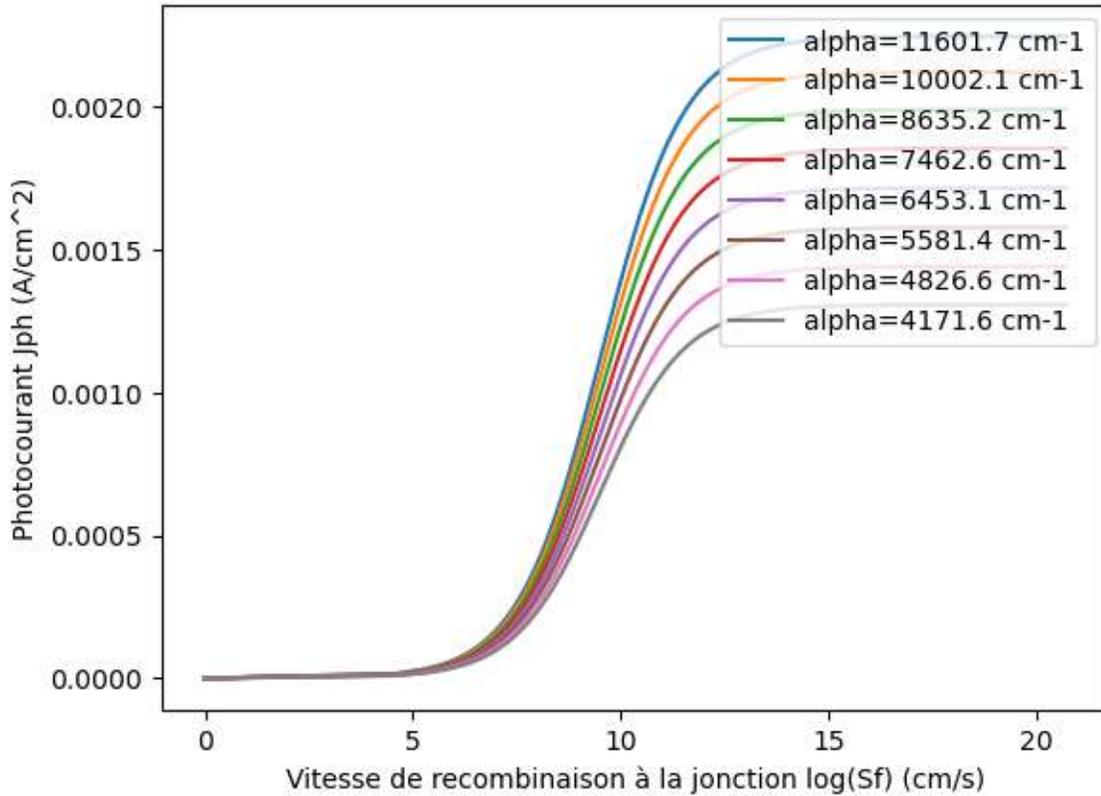


Figure 3:- Profil de de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison S_f

Les courbes de densité de photocourant des porteurs minoritaires de charge en fonction des vitesses de recombinaison à la jonction montrent que pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison le photocourant est nul et présente un plateau pour les grandes valeurs de S_f correspondant à la situation de court-circuit. On peut donc déduire l'écriture suivante [22, 34, 35] :

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

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

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

Cette expression (Eq. 9) est également produite pour la vitesse de recombinaison (S_{f01}) des porteurs minoritaires à la jonction [21, 35].

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

Détermination de l'épaisseur optimum du CZTS

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. En s'apuyant sur la structure de la photopile à jonctions verticales connectées en parallèle [57, 58] conduisant à un photocourant optimum, la représentation graphique bi axes (figure. 4) des expressions des vitesses de recombinaison S_{b1} et S_{b2} (Eq. 9 et 10) [21] a permis d'extraire les valeurs de l'épaisseur optimum puis les représenter pour différentes valeurs du coefficient d'absorption.

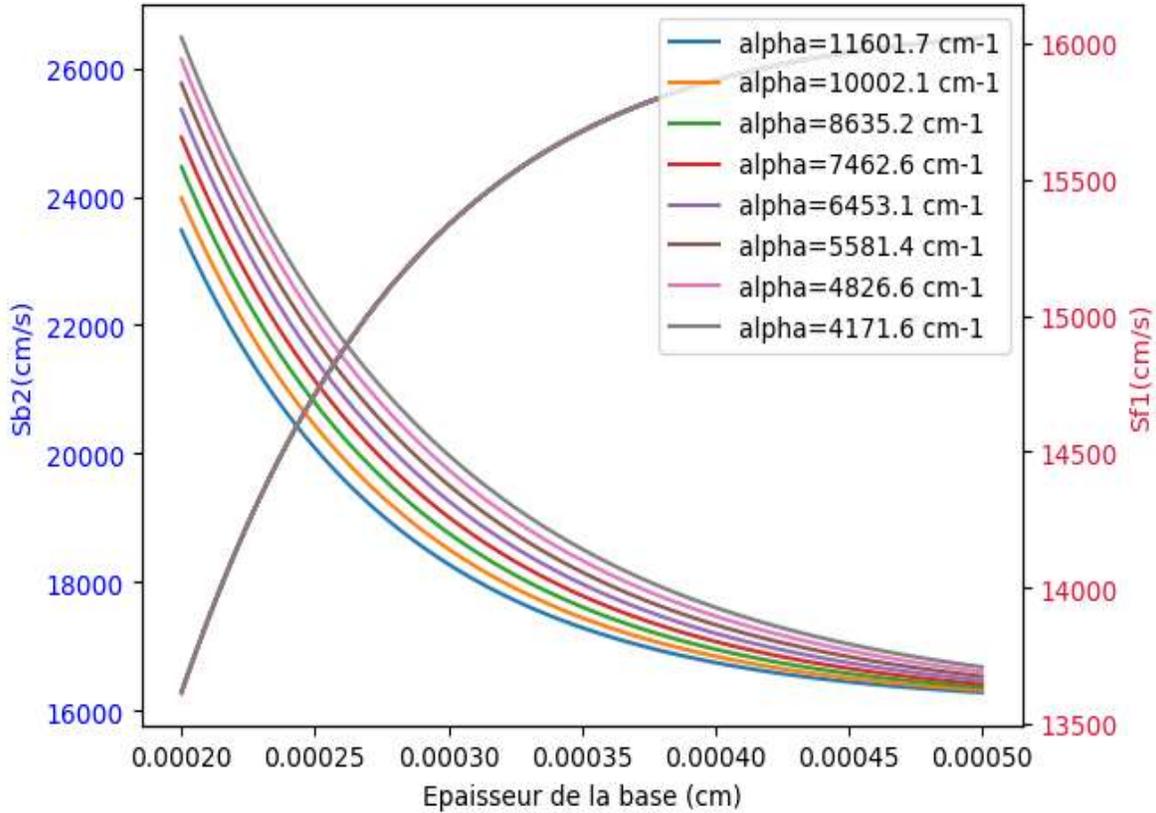


Figure 4:- Courbes de Sb1 et Sb2en fonction de (H) pour différentes valeurs de α

Le **tableau. 1** présente les valeurs de l'épaisseur optimum $H_{opt}(\alpha)$ en fonction du coefficient d'absorption.

Tableau 1:- Epaisseur optimum $H_{op}(\alpha_\lambda)$ pour différentes valeurs de α_λ .

α_λ (cm^{-1})	11601.7	10002.1	8635.2	7462.6	6453.1	5581.4	4826.6	4171.6
Hop (cm)	0.00024	0.000245	0.00025	0.000255	0.00026	0.000265	0.00027	0.000275

Le **tableau.1** permet de représenter sur la **figure. 5**, l'épaisseur optimum $H_{op}(\alpha)$ en fonction du coefficient d'absorption de la cellule solaire CZTS.

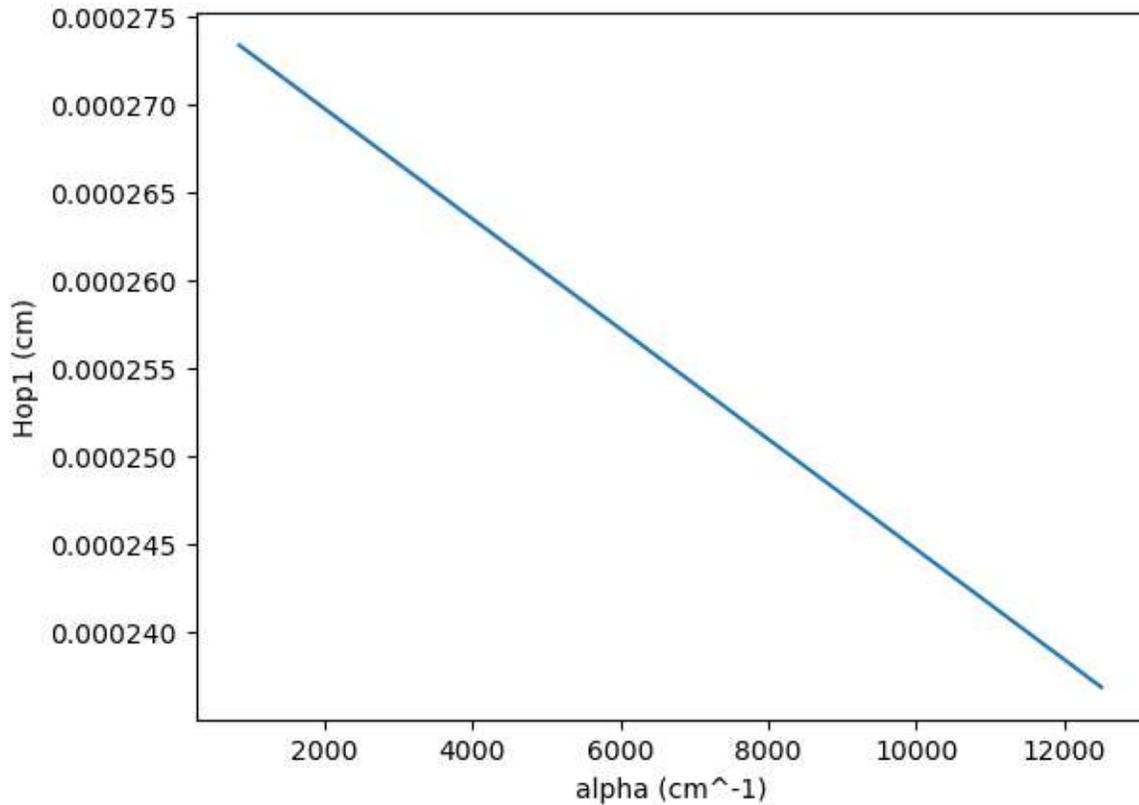


Figure. 5:-Profil de l'épaisseur optimum H_{op1} pour en fonction du coefficient d'absorption (α).

L'équation mathématique modélisant la courbe de la **figure. 5** de l'épaisseur optimum de la base $H_{op}(\alpha)$ est donnée par la relation suivante:

$$H_{op1}(\alpha) = -3.13 \times 10^{-9}\alpha + 2.76 \times 10^{-4} \quad (11)$$

La **figure. 5** illustre l'effet de la variation du coefficient d'absorption sur l'épaisseur de la cellule solaire. Nous constatons que l'augmentation du coefficient du coefficient d'absorption entraîne une diminution de l'épaisseur de la couche CZTS, comme observée sur d'autres travaux [50-56]. Ainsi il n'est donc pas nécessaire de produire des cellules solaires CZTS avec une épaisseur très large.

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

Conclusion:-

L'effet du coefficient d'absorption sur l'épaisseur de la couche absorbante CZTS a été étudié, à travers la technique de représentation graphique des expressions de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière de la couche. 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 des simulations expérimentales avec un contrôle précis des paramètres du processus de fabrication et faire des économies de matériaux. Les effets d'autres paramètres physiques tels que, le taux de dopage, la fréquence de modulation de l'éclairement incidente, la variation de la température, l'application de champ électromagnétique, pourraient être étudiés sur l'optimisation de l'épaisseur de la couche CZTS.

Références Bibliographiques:-

1. J.H.N. Tchognia, B. Hartiti, J-M. Ndjaka, A. Ridah Et P. Thevenin. Performances des cellules solaires à base de Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) ResearchGate: une analyse par simulations numériques via le simulateur SCAPS., 11(4) :16-23,2015.

2. A. 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. A. 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. S. 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 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. Marf, S. Beg, and H. Ullah, Effect of CZTSe BSF and minority carrier life time 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. Touafek 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 buffer layer for CZTS solar cell., Journal of Theoretical and Applied Physics.,14 :75-84,2020.
20. 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)
21. Sissoko, C. Museruka, A. Corréa, 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.

22. 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>
23. 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>
24. 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.
25. 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>
26. Wang, C.H. and Neugroschel, A. (1991) Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity Measurement by Frequency-Domain Photoluminescence. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 38, 2169-2180. <https://doi.org/10.1109/16.83745>
27. Flohr, Th. and Helbig, R. (1989) Determination of Minority-Carrier Lifetime and Surface Recombination Velocity by Optical-Beam-Induced-Current Measurements at Different Light Wavelengths. *Journal of Applied Physics*, 66, 3060-3065. <https://doi.org/10.1063/1.344161>
28. Betser, Y., Ritter, D., Bahir, G., Cohen, S. and Serling, J. (1995) Measurement of the Minority Carrier Mobility in the Base of Heterojunction Bipolar Transistors Using a Magneto Transport Method. *Applied Physics Letters*, 67, 1883-1884
29. P.DeVischere, Comment on G.J. Rees "Surface Recombination Velocity —A Useful Concept". *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)
30. G. Sissoko, E. Nanema, A. Correa, M. Adj, A.L. Ndiaye, M.N. Diarra (1998). Recombination parameters measurement in double sided surface field solar cell. *Proceedings of World Renewable Energy Conference, Florence-Italy*, pp. 1856-1859.
31. E. D. Stokes and T. L. Chu (1977). Diffusion Lengths in Solar Cells From Short-Circuit Current Measurements. *Applied Physics Letters*, Vol. 30, No8; pp 425-426
32. Dhariwal, S.R. and Vasu, N.K. (1981). A Generalized Approach to Lifetime Measurement in pn Junction Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 24, 915-927. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90112-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90112-X)
33. 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>
34. 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
35. I. 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>
36. 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>
37. I. Ly, O.H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko, (2012). Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°2 pp 187 – 206
38. 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 (s_f). *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 6(2) (2011), pp.103-114-ISSN 2229 – 6107, www.ijopaasat.in
39. 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/>)
40. M. Bashahu and Habyarimna, (1995). Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance. *Renewable Energy*, 6, 2, pp. 127-138.

41. 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).
42. 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>
43. 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>
44. Sun, X., Khan, M.R., Deline, C. and Alam, M.A. (2018) Optimization and Performance of Bifacial Solar Modules: A Global Perspective. *Applied Energy*, 212, 1601-1610. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>
45. 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>
46. Van Steenwinkel, R., Carotta, M.C., Martinelli, G., Mercli, M., Passari, L. and Palmeri, D. (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-B](https://doi.org/10.1016/0379-6787(90)90063-B)
47. Honma, N. and Munakata, C. (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>
48. 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>
49. 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
50. 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>
51. 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>
52. Sall, M., Fall, M.F., Diasse, O., Diop, G., Diatta, I., Dia, O., Loum, K., Wade, M. and Sissoko, G. (2022) Determination of the Optimum Thickness of the Base of the n⁺/p/p⁺ Silicon Solar Cell, Illuminated by the Rear Face by a Monochromatic Light of Long Wavelength in Frequency Modulation. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, 12, 64-77.
53. 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.
54. K. Loum, O. Sow, G. Diop, R. Mane, I. Diatta, M. Ndiaye, S. Gueye, M. Thiame, M. Wade and G. 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*, 13:40-50, 2023.
55. A.Ndiaye, S. Gueye, O. Sow, G. Diop, A. Ba, M. Ba, I. Diatta, L. Habiboullah and G.Sissoko, A.C. Recombination Velocity as Applied to Determine n⁺/p/p⁺ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness. *Energy and Power Engineering*, 2020, 12, 543-554. <https://doi.org/10.4236/epe.2020.1210033>
56. Ndiaye, M., Sow, O., Diatta, I., Diop, G., Faye, D., Loum, K., Traore, Y., Thiame, M., Wade, M. and Sissoko, G. (2022) Optimization of the Thickness of the Doping Rate Base (Nb) of the (n⁺/p/p⁺) Silicon Solar Cell with Vertical Multi-Junction Connected in Series and Placed under Monochromatic Illumination in Frequency Modulation. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, 12, 266-280. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.12.4.25165>

57. 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>
58. Wise, J.F. (1970) Vertical Junction Hardened Solar Cell. U.S. Patent 3, 690-953.
59. 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>.