



### RESEARCH ARTICLE

#### MAGNETORESISTANCE DANS UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTIONS VERTICALES PARALLELES EN REGIME STATIQUE SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE

Moussa I. Ngom<sup>1</sup>, Mohamed Lemine CHEIKH<sup>1</sup>, M. Yacine BA<sup>1</sup>, Malick NDIAYE<sup>1</sup>, A. Mamour BA<sup>1</sup>, Sega GUEYE<sup>1</sup>, Moustapha THIAME<sup>1,2</sup>, Ousmane SOW<sup>1,3</sup>, Mamadou WADE<sup>1,4</sup> and Gregoire SISSOKO<sup>1</sup>

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Université Assane SECK, Ziguinchor, Senegal.
3. Institut Universitaire de Technologie. Université Iba Der THIAM de Thiès-Senegal.
4. Ecole Polytechnique de Thiès, BP A10, Thiès, Senegal.

#### Manuscript Info

##### Manuscript History

Received: 20 April 2023

Final Accepted: 24 May 2023

Published: June 2023

##### Key words:-

Photopile A Jonctions Verticales  
Paralleles, Champ Magnétique,  
Photocourant, Vitesse De  
Recombinaison, Résistance Shunt

#### Abstract

Une étude théorique de la photopile au silicium polycristallin à jonctions verticales parallèles en régime statique sous éclairage polychromatique et sous champ magnétique est présentée. La résolution de l'équation de magnéto-transport relative à la densité des porteurs minoritaires de charge dans la base a permis de déduire les expressions du photocourant et de la résistance shunt ( $R_{sh}$ ) de la photopile en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et de la profondeur  $z$  de la photopile pour différentes valeurs du champ magnétique.

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

#### Introduction:-

Les performances des photopiles [1-7] sont souvent limitées par les phénomènes de recombinaisons des porteurs de charge photogénérés. Pour améliorer ces performances, de nouvelles architectures de photopiles sont élaborées: photopiles mono faciale a champ arrière [8, 9], bifaciales [10-17], photopiles à multi jonctions verticales [18-27]. Les photopiles à jonctions verticales, appelées Multi Jonctions Verticales (MJV) sont de deux types: les photopiles (n/p) connectées en parallèles afin d'augmenter le courant électrique (MJVP) et les photopiles (n/p/p+) connectées en série pour augmenter la tension électrique de sortie (MJVS).

Pour améliorer les performances des photopiles, plusieurs techniques ont été élaborées, pour la détermination des paramètres phénoménologiques de recombinaison (volumique et surfaciques) [28-40] et de caractérisation électriques [41-50]. Ces techniques maintiennent la photopile en régimes de fonctionnement, statique [51, 52], dynamique fréquentiel [30-32, 53, 54] et transitoire [55, 56]. Ces techniques s'appuient sur des modèles théoriques d'étude prenant en compte les dimensions (1D, 2D et 3D) [19, 21, 24, 35, 49, 50] des différentes zones qui constituent la photopile, ainsi que les paramètres phénoménologiques associés. L'optimisation des épaisseurs [57-63], en particulier de la base [57, 61-63] de la photopile, a produit plusieurs résultats, en fonction du coefficient d'absorption et du coefficient de diffusion dépendant du taux de dopage, de la température, du champ magnétique, de la fréquence de modulation de la lumière incidente et du flux d'irradiation exercé par des particules chargées.

Notre contribution porte sur l'influence du champ magnétique appliqué [64, 65] dans la détermination de la résistance shunt de la photopile au silicium à jonctions verticales parallèles en régime statique sous éclairage polychromatique.

**Corresponding Author:- Gregoire SISSOKO**

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

La résolution de l'équation de magnéto transport relative à la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base permet d'obtenir l'expression de la densité des porteurs de charge, de la densité de photocourant, du photocourant de court-circuit. La résistance shunt est ensuite déduite, à partir du concept de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) [28-31, 33-35], en particulier initiant le court-circuit(Sfcc) [66], à travers la représentation graphique de la courbe de calibration de l'expression théorique obtenue de Rsh(Sf) [49, 66-69].

### Theorie

La photopile à jonctions verticales[1, 18-27]est conçue de telle sorte que l'éclairement incident est parallèle au plan de la zone de charge d'espace. La photopile est de type  $(n^+ - p - n^+ - p \dots)$  est représentée par la figure. 1.

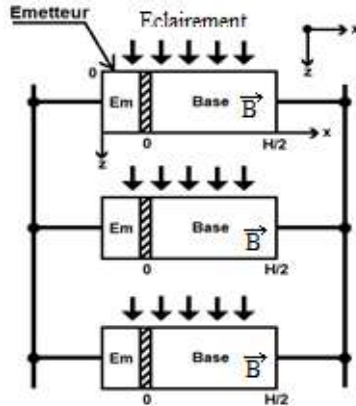


Figure 1:- Photopiles à jonctions verticales connectées en parallèle sous champ magnétique

L'équation de magnéto-transport relative à la densité des porteurs minoritaires en excès  $\delta(x, z, B)$  dans la base est donnée par l'équation suivante [24, 64, 65]:

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

$G(z)$  est le taux de génération des porteurs minoritaires en excès en fonction de la profondeur  $z$  et dont l'expression [70] est donnée par l'équation suivante :

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

Les valeurs stables du rayonnement solaire (airmass 1,5) sont modélisées à travers  $a_i$  et  $b_i$

Le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base soumise à un champ magnétique orienté perpendiculairement au plan  $(x, O, z)$  est  $D^*$ . Son expression est donnée par la relation [64, 65] suivante :

$$D^* = \frac{D_0}{[1 + (\mu B)^2]} \quad (3)$$

$D_0$  est le coefficient de diffusion [71] des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base en absence de champ magnétique et  $(\mu)$  est la mobilité des porteurs minoritaires dans la base [72].

La longueur de diffusion ( $L^*$ ) des porteurs minoritaires de charge en présence de champ magnétique est donnée par l'expression :

$$L^* = \sqrt{\tau D^*} \quad (4)$$

$\tau$  est la durée de vie des porteurs minoritaires de charge photogénérés dans la base de la photopile

La solution générale de l'équation de continuité (1) est donnée par l'expression (5) :

$$\delta(x, z, B, Sf) = A \cosh\left(\frac{x}{L^*}\right) + C \sinh\left(\frac{x}{L^*}\right) + \sum_{i=1}^3 K_i e^{-b_i z} \quad (5)$$

avec

$$K_i = \frac{a_i L^{*2}}{D^*} \quad (6)$$

où les coefficients  $A$  et  $C$  sont déterminés à partir des conditions aux limites suivantes :

- I. Les conditions aux limites
  - a) A la jonction en  $(x=0, z)$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, z, B)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{Sf}{D^*} \delta(x, z, B)|_{x=0} \quad (7)$$

Les électrons subissent des recombinaisons à la jonction constituée par l'émetteur-base ( $x = 0, z$ ) de la photopile, caractérisée par la vitesse de recombinaison  $Sf$  [28, 29, 33-35].

b) Au milieu de la base, en  $x = H/2$ , le gradient de la densité des porteurs minoritaires, loin de la jonction est nul [24, 25] :

$$\left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=\frac{H}{2}} = 0 \quad (8)$$

## Résultats et Discussion :-

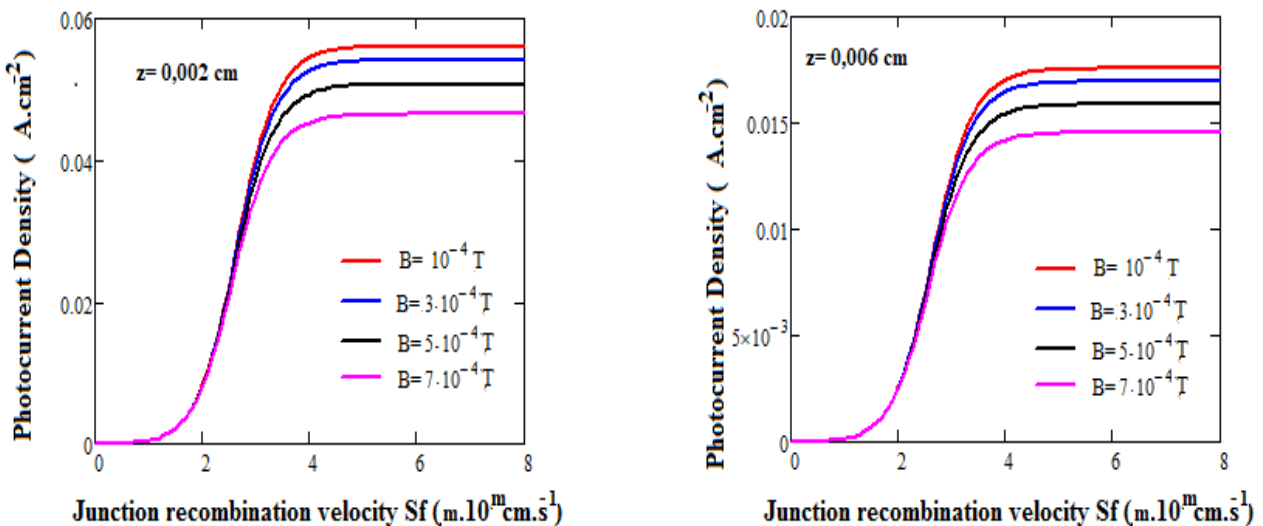
### Densité de photocourant

La densité de photocourant résulte de la diffusion des porteurs minoritaires de charge à travers la jonction. Elle est obtenue par le gradient de la densité des porteurs minoritaires à la jonction et son expression est [23-27]:

$$J_{ph} = 2qD^* \left. \frac{\partial \delta(x, z, B)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (9)$$

Où  $q$  est la charge élémentaire de l'électron. Pour une photopile à jonctions verticales parallèles, le photocourant est la contribution de deux photocourants issus de la base, à travers les deux jonctions (émetteurs-base) adjacentes à la base.

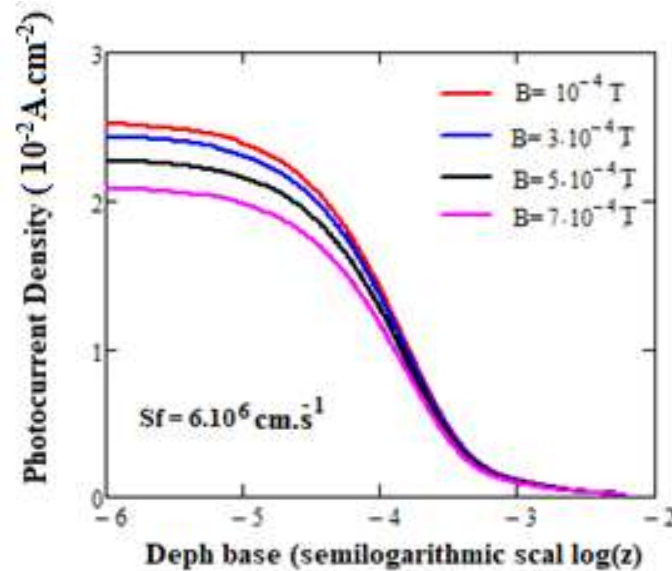
La **figure. 2**, donne le profil de la densité du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, pour différentes valeurs du champ magnétique, respectivement pour des profondeurs,  $z = 0.002\text{cm}$  (**Figure 2, a**) et  $z = 0.006\text{cm}$  (**Figure 2, b**).



**Figure 2:-** Densité du photocourant ( $z = 0.002\text{ cm}$  et  $z = 0.006\text{ cm}$ ) en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ .

$$D_0 = 26\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}; H = 0,03\text{ cm}; \tau = 10^{-5}\text{ s}$$

La **figure. 3**, donne pour différentes valeurs du champ magnétique, la densité du photocourant (proche du court-circuit) en fonction du logarithme décimal de l'épaisseur  $z$  de la photopile, pour la vitesse de recombinaison ( $Sf$ ) à la jonction de valeur  $Sf = 6 \cdot 10^6\text{ cm/s}$ .



**Figure 3:-** Densité du photocourant en fonction de la profondeur  $z$  de la base pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ , ( $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H = 0,03 \text{ cm}$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ s}$ ).

Quelle que soit la valeur du champ magnétique, la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$ , entre deux paliers, dont le premier palier est aux valeurs de  $S_f < 2 \cdot 10^2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  correspondant à la situation de circuit ouvert où la densité de photocourant est minimale (voire nulle) et le second est aux valeurs de  $S_f > 4 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , alors la densité de photocourant est maximale, et correspond à la situation de court-circuit [29, 33-35]

Le photocourant diminue avec l'intensité du champ magnétique. Cette diminution est due à la déflexion des porteurs minoritaires, alors le flux de charges électriques qui traversent les jonctions base-émetteur pour contribuer photocourant est faible [64, 65].

On constate aussi que la densité de photocourant diminue avec la profondeur  $z$  de la photopile. Ce qui peut être expliqué par le fait que la photo-génération [67] diminue en profondeur lorsque l'épaisseur  $z$  augmente et provoquant la diminution du flux de porteurs minoritaires qui traversent les jonctions pour générer un photocourant.

#### Densité de photocourant de court-circuit

Au voisinage du court-circuit, la densité de photocourant de court-circuit est déterminée. Son expression est donnée par :

$$J_{cc} = \lim_{S_f \rightarrow \infty} J_{ph} \quad (10)$$

Ce qui donne :

$$J_{cc} = 2q \cdot L^* \sum_{i=1}^3 a_i e^{-b_i z} \left\{ \text{th} \left( \frac{H}{2L^*} \right) \right\} \quad (11)$$

Le profil de la densité de photocourant de court-circuit est donné à la **figure. 4**, respectivement en fonction du logarithme décimal de la profondeur  $z$  (**Figure 4, a**) pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ , puis en fonction du champ magnétique (**Figure 4, b**), pour différentes valeurs de la profondeur  $z$ .

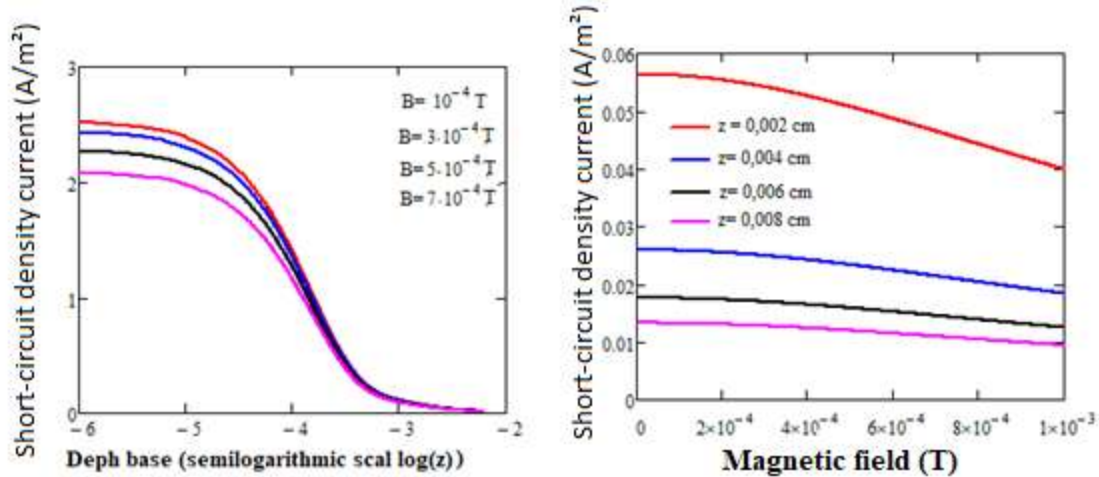


Figure 4:- (a)

(b)

a) Densité du photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur  $z$  pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ .  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H = 0,03 \text{ cm}$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ s}$

b) Densité du photocourant de court-circuit en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la profondeur  $z$ .  $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H = 0,03 \text{ cm}$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ s}$

La densité de photocourant de court-circuit diminue avec la profondeur  $z$  de la photopile. Elle diminue aussi avec l'intensité du champ magnétique, qui dévie les porteurs de charge, sous l'action de la force de Lorentz [40, 57, 63-65]. Par conséquent le flux de porteurs minoritaires de charge qui traverse les jonctions base-émetteur pour participer à la création de photocourant de court-circuit, est faible.

#### Détermination graphique du courant de court-circuit $J_{cc}$ et de la vitesse de recombinaison initiant le courant de court-circuit $S_{fcc}$

La méthode de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $S_{fcc}$ ) initiant la situation de court-circuit [66-69] est donnée à la figure 5. Pour cela on s'intéresse au maximum de la courbe (juste avant le palier horizontal) qui correspond à un point initiant le court-circuit. La projection orthogonale de ce point sur l'axe des ordonnées nous donne le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et sa projection sur l'axe des abscisses nous donne la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le courant de court-circuit  $S_{fcc}$ .

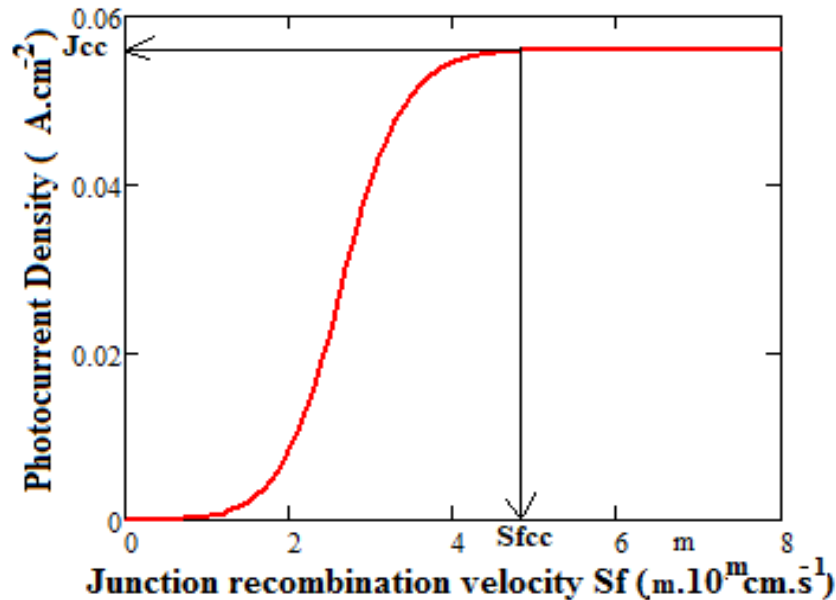


Figure 5:- Méthode de détermination du courant de court-circuit  $J_{cc}$  et de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le courant de court-circuit.

A partir de la **figure. 2** (a et b) les résultats du courant de court-circuit et de la vitesse (Sfcc) de recombinaison des porteurs de charge initiant le court-circuit, sont extraites et consignées dans le **tableau. 1**.

**Tableau 1:-** Valeurs du courant de court-circuit Jcc, de la vitesse de recombinaison initiant le courant de court-circuit Sfcc pour différentes valeurs de la profondeur z de la photopile et du champ magnétique B.

| z(cm)    | B(T)               | Jcc (A/cm <sup>2</sup> ) | Sfcc (cm.s <sup>-1</sup> ) |
|----------|--------------------|--------------------------|----------------------------|
| z= 0,002 | 10 <sup>-4</sup>   | 0,056                    | 3,89.10 <sup>5</sup>       |
|          | 3.10 <sup>-4</sup> | 0,053                    | 1,42.10 <sup>5</sup>       |
|          | 5.10 <sup>-4</sup> | 0,050                    | 1,11.10 <sup>5</sup>       |
|          | 7.10 <sup>-4</sup> | 0,046                    | 8,58.10 <sup>4</sup>       |
| Z= 0,006 | 10 <sup>-4</sup>   | 0,017                    | 2,36.10 <sup>5</sup>       |
|          | 3.10 <sup>-4</sup> | 0,016                    | 1,83.10 <sup>5</sup>       |
|          | 5.10 <sup>-4</sup> | 0,015                    | 8,58.10 <sup>4</sup>       |
|          | 7.10 <sup>-4</sup> | 0,014                    | 6,66.10 <sup>4</sup>       |

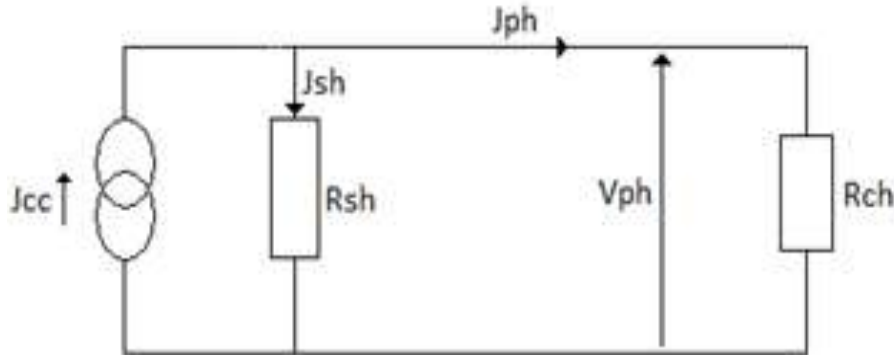
### Résistance shunt

La résistance shunt [43, 44, 54] est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend donc de la qualité de la jonction et des matériaux constitutifs. Elle est aussi indicatrice d'une bonne ou mauvaise qualité d'une photopile. Lorsqu'elle est grande, le courant de fuite à travers la photopile est faible [51, 52].

Pour déterminer la résistance shunt, la photopile est considérée dans son fonctionnement en situation de court-circuit où le photocourant est égal au courant de court-circuit. La photopile fonctionne alors en générateur de courant, en parallèle avec la résistance shunt et le tout en série avec une résistance de charge (Rch) qui fixe le point de fonctionnement à travers(Sf) [28, 29]. Alors elle peut être définie par:

$$R_{ch}(S_f) = \frac{V_{ph}(S_f)}{J_{ph}(S_f)} \quad (12)$$

Le schéma illustratif [49, 66] de ce dispositif est donné à la figure 6:



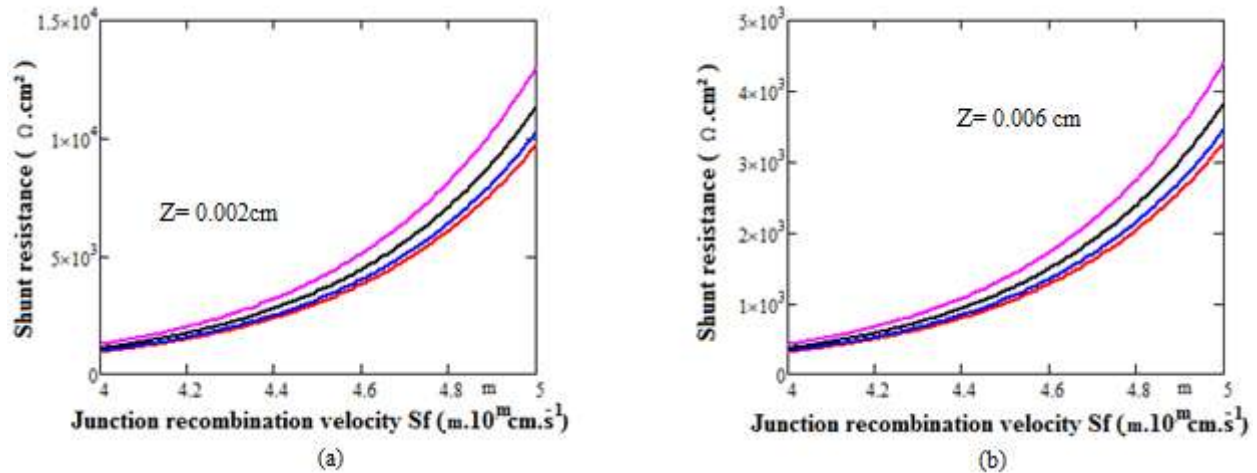
**Figure 6:-** Schéma de la photopile en fonctionnement de court-circuit.

Où Jcc est la densité decourant de court-circuit, et Jsh la densité de courant à travers Rsh.

En appliquant la loi des nœuds au circuit de la **figure. 6**, on en déduit l'expression de la résistance shunt en fonction de la vitesse (Sf)de recombinaison à la jonction[49, 66-69]:

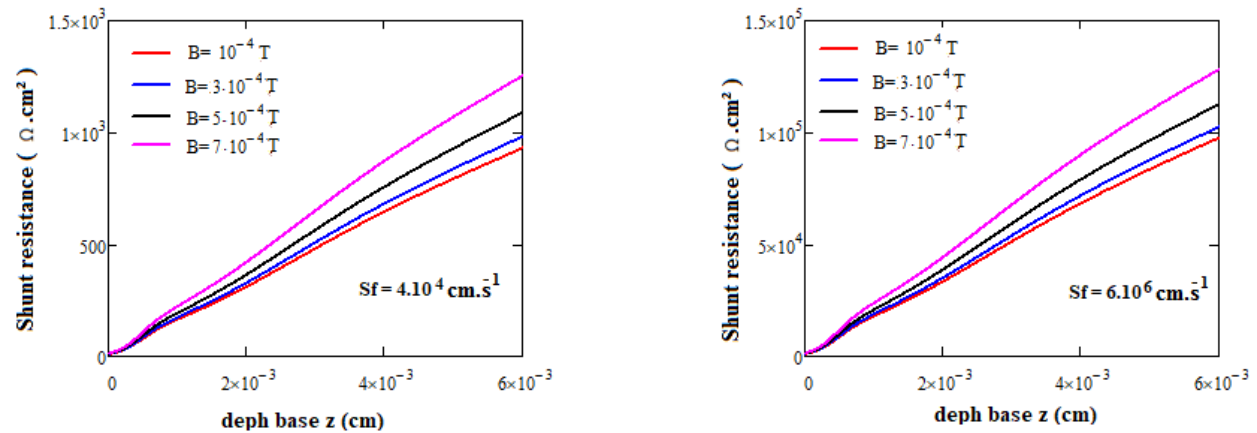
$$R_{sh}(S_f, z, B) = \frac{V_{ph}(S_f, z, B)}{J_{cc}(z, B) - J_{ph}(S_f, z, B)} \quad (13)$$

Les courbes de modélisationde la résistance shunt de la pphotopile de differentes profondeurs (z), en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique sont données à la **figure. 7**.

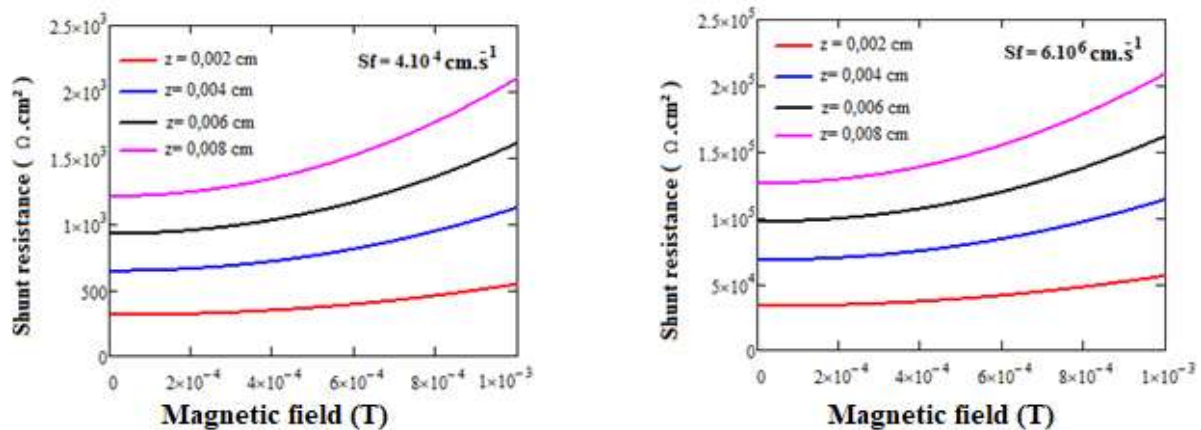


**Figure 7:-** Résistance shunt pour différentes profondeurs  $Z$ , en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ .  
 $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H = 0,03 \text{ cm}$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ s}$

Le profil des courbes de modélisation de la résistance shunt en fonction de la profondeur  $z$  de la photopile pour différentes valeurs du champ magnétique puis en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de la profondeur  $z$  est donné respectivement aux figures 8 et 9.



**Figure 8:-** Résistance shunt en fonction de la profondeur  $z$  pour différentes valeurs du champ magnétique  $B$ .  
 $D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $H = 0,03 \text{ cm}$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ s}$



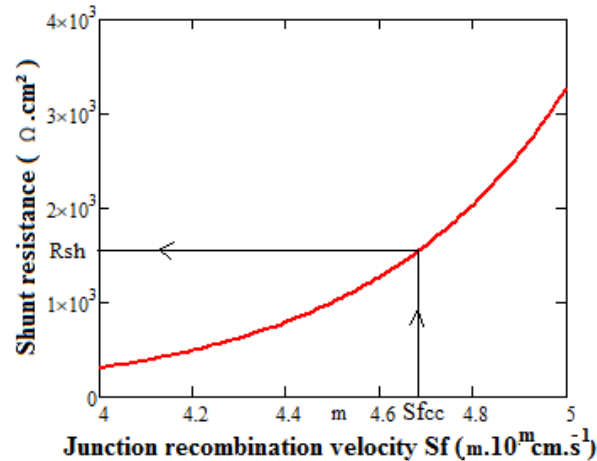
**Figure 9:-** Résistance shunt en fonction du champ magnétique  $B$ , pour différentes valeurs de la profondeur  $z$ .

$$D_0 = 26 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}; H = 0,03 \text{ cm}; \tau = 10^{-5} \text{ s}$$

La résistance shunt croît avec le champ magnétique. Elle croît également avec la vitesse de recombinaison ( $S_f$ ) à la jonction, mais diminue avec la profondeur  $z$  de la photopile. Elle est d'autant plus importante que la vitesse de recombinaison à la jonction  $S_f$  est élevée [49].

#### Détermination graphique de la résistance shunt

La méthode de détermination de la valeur de la résistance shunt  $R_{sh}$  est donnée à la **figure 10**, qui montre la courbe de calibration de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. La projection de la vitesse de recombinaison initiant le court-circuit ( $S_{fcc}$ ) sur la courbe donne un point d'intersection dont l'ordonnée représente la résistance shunt [49, 66-69]. Les résultats sont consignés dans le **tableau. 2**.



**Figure 10:-** Méthode de détermination de la résistance shunt.

**Tableau 2:-** Densité du courant de court-circuit  $J_{cc}$ , de la vitesse de recombinaison initiant le courant de court-circuit  $S_{fcc}$  et de la résistance shunt pour différentes valeurs de la profondeur  $z$  de la photopile et du champ magnétique  $B$ .

| $z(\text{cm})$ | $B(\text{T})$     | $J_{cc} (\text{A}/\text{cm}^2)$ | $S_{fcc} (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | $R_{sh} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ |
|----------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| $z = 0,002$    | $10^{-4}$         | 0,056                           | $3,89 \cdot 10^5$                         | $2,044 \cdot 10^3$                  |
|                | $3 \cdot 10^{-4}$ | 0,053                           | $1,42 \cdot 10^5$                         | $1,064 \cdot 10^3$                  |
|                | $5 \cdot 10^{-4}$ | 0,050                           | $1,11 \cdot 10^5$                         | $9,324 \cdot 10^2$                  |
|                | $7 \cdot 10^{-4}$ | 0,046                           | $8,58 \cdot 10^4$                         | $8,494 \cdot 10^2$                  |
| $Z = 0,006$    | $10^{-4}$         | 0,017                           | $2,36 \cdot 10^5$                         | $4,814 \cdot 10^3$                  |
|                | $3 \cdot 10^{-4}$ | 0,016                           | $1,83 \cdot 10^5$                         | $4,015 \cdot 10^3$                  |
|                | $5 \cdot 10^{-4}$ | 0,015                           | $8,58 \cdot 10^4$                         | $2,198 \cdot 10^3$                  |
|                | $7 \cdot 10^{-4}$ | 0,014                           | $6,66 \cdot 10^4$                         | $2,000 \cdot 10^3$                  |

#### Conclusion:-

Dans ce travail, nous avons présenté l'influence du champ magnétique sur le courant de court-circuit et la résistance shunt d'une photopile à jonctions verticales parallèles en régime statique sous éclairage polytechnique. La résolution de l'équation de magnéto-résistance nous a permis d'obtenir les expressions de la densité des porteurs minoritaires de charge et du photocourant. Le photocourant de court-circuit et de la résistance shunt en sont déduites. L'effet de magnéto-résistance entraîne la diminution du photocourant de court-circuit, de la vitesse de recombinaison initiant le courant de court-circuit  $S_{fcc}$  et de la résistance shunt.

#### References:-

- [1] Green, M.A. (1995) Silicon Solar Cells Advanced Principles & Practice. Bridge Printer Pty. Ltd., Clayton North.
- [2] 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>

- [3] Martin A. Green, Keith Emey, Yoshihiro Hishikawa and Wilhelm Warta (2011). Solar cell efficiency tables (version 37). *ProgPhotovolt: Res. Appl.* N0 19, pp 84-92.(Willey). DOI: 10. 1002/pip. 1088.
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] Liou, J.J. and Wong, 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)
- [7] R. Aliev, A. Mirzaalimov, S. Aliev (2013). Development and some photovoltaic parameters of a silicon solar generator with vertical p-n junctions. *Applied Solar Energy*, Vol. 49 issue 2, Pp 59-61 <http://dx.doi.org/10.3103/s0003701x13020011>
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] A. Cuevas, J. Sangrador, A. lueque, J.M. Ruiz, and G. Sala, High-efficiency transcells and vertical multijunction cells for double-sided concentrated illumination. *Proc. Second E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Berlin,, 1979,808-816.
- [11] A.Cuevas, R.A. Sinton and R.R.King. A Technology-Based Comparison between Two-Sided and Back-Contact Silicon Solar Cells. *The 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Lisbon, 1991, 8-12, 23-26. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_6)
- [12] Ohtsuka, H., Sakamoto, M., Tsutsui, K. and Yazawa, Y. (2000) Bifacial Silicon Solar Cells with 21.3% Front Efficiency and 19.8% Rear Efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8, 385-390. [https://doi.org/10.1002/1099-159X\(200007/08\)8:4<385::AID-PIP340>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1099-159X(200007/08)8:4<385::AID-PIP340>3.0.CO;2-B)
- [13] Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997). Double Side Solar Cells to Improve Static Concentrator. *Photovoltaic Solar Energy Conference*, Luxembourg, 269-277. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7\\_25](https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25)
- [14] A. Simashkevich, D Sherban, P. Morvillo, E. Bobeico, L. Bruk, Iu. Usatii (2007). Bifacial solar cells based on isotype junctions, 22<sup>nd</sup> EPSEC, 3-7 Sept. Milan Italy, Pp. 484-486.
- [15] Sissoko, A. Correa, E. Nanema, M. N. Diarra, A. L. Ndiaye, M. Adj (1998). Recombination Parameters measurement in silicon double sided surface field cell. *Proceeding of the World Renewable Energy Congress*, 20 – 25 September, Pp.1856 – 1859.
- [16] Meier, D.L., Hwang, J.-M. and Campbell, R.B. (1988) The Effect of Doping Density and Injection Level on Minority Carrier Lifetime as Applied to Bifacial Dendritic Web Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 35, 70-79. <https://doi.org/10.1109/16.2417>
- [17] KKhady Faye, Idrissa Gaye, Sega Gueye, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko (2014). Silicon Solar Cell Under Back Side Illumination: Effect Of Magnetic Field. *IPASJ- International Journal of Electrical Engineering (IJEE)*, Volume 2, Issue 9, September 2014, pp 1-9.
- [18] R. Sarfaty, A. Cherkun, R. Pozner, G. Segev, E. Zeierman, Y. Flitsanov, A. Kribus, Y. Rosenwaks. Vertical junction Si micro-cells for concentrating photovoltaics. *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, pp.145-147.
- [19] Heinbockel, J.H. and Walker, G.H. (1988) Three-Dimensional Models of Conventional and Vertical Junction Laser-Photovoltaic Energy Converters. *NASA-TM-403919880014727V*.
- [20] Ngom, M.I., Zouma, B., Zoungrana, M., Thiame, M., Bako, Z.N., Camara, A.G. and Sissoko, G. (2012) Theoretical Study of a Parallel Vertical Multi-Junction Silicon Cell under Multispectral Illumination: Influence of External Magnetic Field on the Electrical Parameters. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*, 2, 101-109.
- [21] Ngom, M.I., Thiam, A., Sahin, G., El Moujtaba, M.A.O., Faye, K., Diouf, M.S. and Sissoko, G. (2015) Influence of Magnetic Field on the Capacitance of a Vertical Junction Parallel Solar Cell in Static Regime, under Multispectral Illumination. *International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology*, 31, 65-75.

- [22] Y. Xing, P. Han, S. Wang, P. Liang, S. Lou, Y. Zhang, S. Hu, H. Zhu, Y. Mi, C. Zhao. Analysis of effects of front and back surface dopants on silicon vertical multi-junction solar cell by 2D numerical simulation. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56(11), pp. 2798-2807.
- [23] Paternoster Pierluigi Bellutti Amos ColliniLorenzaFerrario F. Ficorella Francesca Mattedi (2013). Back-Contact Vertical Junction Silicon Solar Cells For Concentrating Photovoltaics. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Atparis, 30 Sep-04 Oct, 2013, pp-672-675.
- [24] Suk-Ho Choi Graphene-Based Vertical-Junction Diodes and Applications. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 71, No. 6, September 2017, pp. 311~318.
- [25] A.Gover and P. Stella (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices*. Pp, 21, 351-356.[https://doi.org/ 10.1109/T-ED.1974.17927](https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17927)
- [26] J.F.Wise. Vertical Junction Hardened Solar Cell. US Patent, 1970. 3, 690-953.
- [27] B.Terheiden, G. Hahn, P. Fath and E.Bucher (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 1-5 May, pp.1377-1380.
- [28] Ayyazian, 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.
- [29] G.Sissoko, S. Sivoththanam, M. Rodot and P. Mialhe, Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, 12-16 October 1992, 352-354.
- [30] Sissoko, G., Museruka, C., Corréa, A., Gaye, I. and Ndiaye, A.L. (1996). Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*, Pergamon, Part III, pp.1487-1490.
- [31] Traore, Y. , Thiam, N. , Thiam, 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] Gueye, M., Diallo, H. ,Moustapha, A. , Traore, Y. , Diatta, I. and Sissoko, G. (2018) Ac Recombination Velocity in a Lamella Silicon Solar Cell. *World Journal of Condensed Matter Physics*, **8**, 185-196. doi: 10.4236/wjcmp.2018.84013.
- [33] ChihHsin Wang and ArnostNeugroschel (1991).Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. *IEEE transactions on electron devices*, vol.38, no. 9, pp2169-2180.
- [34] 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>
- [35] O. Diasse, A. Diao, I. Ly, M.S. Diouf, I. Diatta, R. Mane, Y. Traore and G.Sissoko (2018). Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern Physics*, **9**, 189-201. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
- [36] H.L.Diallo, A.S. Maiga, A. Wereme and G. Sissoko, (2008). 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*, **42**, 193-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [37] 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>
- [38] 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>
- [39] 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)
- [40] Gupta, S., Ahmed, F. and Garg, S. (1988). A Method for the Determination of the Material Parameters, D, L0, S and  $\alpha$  from Measured A.C. 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)

- [41] 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.
- [42] Sahin, G., Dieng, M., Moujtaba, M., Ngom, M., Thiam, A. and Sissoko, G. (2015) Capacitance of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell under Monochromatic Modulated Illumination. Journal of Applied Mathematics and Physics, 3, 1536-1543. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.311178>
- [43] Hamidou, Amadou Diao, Séré Ahmed Douani, aliMoissi, Moustapha Thiame, Fabé Idrissa Barro, Grégoire Sissoko (2013). Capacitance determination of a Vertical Parallel Junction Solar Cell under Multispectral Illumination in steady state. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). ISSN: 2278-3075, Volume-2, Issue-3, pp.1-4, February 2013
- [44] 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>.
- [45] 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).
- [46] 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)
- [47] 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>
- [48] Garland, J.E., Crain, D.J., Zheng, J.P., Sulyma, C.M. and Roy, D. (2011) Electro-Analytical Characterization of Photovoltaic Cells by Combining Voltammetry and Impedance Spectroscopy: Voltage Dependent Parameters of a Silicon Solar Cell under Controlled Illumination and Temperature. Energy & Environmental Science, 4, 485-498. <https://doi.org/10.1039/C0EE00307G>
- [49] Mora-Sero, I., Garcia-Belmonte, G., Boix, P.P., Vazquez, M.A. and Bisquert, J. (2009) Impedance Spectroscopy Characterization of Highly Efficient Silicon Solar Cells under Different Illumination Intensities Light. Energy and Environmental Science, 2, 678-686. <https://doi.org/10.1039/b812468j>
- [50] M.M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. GueyeCamara, N. Dieme, Z. NouhouBako, S. Mbodji, F. I. Barro, G. Sissoko . Determination of the shunt and series resistances of a vertical multijunction solar cell under constant multispectral light. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2010), pp. 250-254.
- [51] Barro, F.I., Gaye, S., Deme, M., Diallo, H.L., Samb, M.L., Samoura, A.M., Mbodji, S. and Sissoko, G. (2008) Influence of Grain Size and Grain Boundary Recombination Velocity on the Series and Shunt Resistances of a Poly-Crystalline Silicon Solar Cell. Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 1-5 September 2008, 612-615.11
- [52] WafaaAbd El-Basit, Ashraf MoslehAbd El-Maksood and FouadAbd El-MoniemSaad SOLIMAN (2013). Mathematical Model for Photovoltaic Cells. Leonardo Journal of Sciences, Issue 23, pp.13-28. (<http://ljsacademicdirect.org/>).
- [53] Sissoko, G., Nanéma, E., Corrêa, A., Biteye, P.M., Adj, M. and N'Diaye, A.L. (1998). Silicon Solar Cell Recombination Parameters Determination Using the Illuminated I-V Characteristic. World Renewable Energy Congress, Florence, 20-25 September 1998, 1847-1851.
- [54] 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>
- [55] Anil Kumar, R., Suresh, M.S. and Nagaraju, J. (2001) Measurement of AC Parameters of Gallium Arsenide (GaAs/Ge) Solar Cell by Impedance Spectroscopy. IEEE Transaction on Electron Devices, 48, 2177-2179. <https://doi.org/10.1109/16.944213>
- [56] Kunst, M., Muller, G., Schmidt, R. and Wetzal, H. (1988) Surface and Volume Decay Processes in Semiconductors Studied by Contactless Transient Photoconductivity Measurements. Applied Physics A, 46, 77-85. <https://doi.org/10.1007/BF00615912>
- [57] Fredrik A. Lindholm, Juin J. Liou, ArnostNeugroschel, And Taewon W. Jung, (1987) Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients. IEEE Transactions On Electron Devices, Vol.34, N°2, pp277-283
- [58] Gora Diop, Hamet Yoro Ba, NdeyeThiam, YoussouTraore, BabouDione, MamourAmadou Ba, PapeDiop, Masse Samba Diop, OulimataMballo and GregoireSissoko (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*, Vol. 14, No. 23, pp.4078-4085.
- [59] 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](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17)
- [60] 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>
- [61] Chung F; Chung-Feng Jeffery Kuo, Hung-Min Tu, Shin-Wei Liang, Wei-Lun Tsai (2010). Optimization of microcrystalline silicon thin film solar cell isolation processing parameters using ultraviolet laser. *Optics & Laser Technology*, Vol. 42 issue 6, Pp. 945-955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.01.013>
- [62] MalickNdiaye, Ousmane Sow, IbrahimaDiatta, Gora Diop, Dibor Faye, KhadyLoum, YoussouTraore, MoustaphaThiame, Mamadou Wade And GregoireSissoko (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*, Vol. 12, N<sup>o</sup> 4, 266-280. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.12.4.26680>
- [63] MamadouSall, MameFatyMbaye Fall, OusmaneDiasse, Gora Diop, IbrahimaDiatta, OumarDia, KhadyLoum, Mamadou Wade And GregoireSissoko (2022). Determination of optimum thickness of the base of  $n^+/p/p^+$  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*, Vol. 11, N<sup>o</sup> 4, 064-077. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.11.4.06477>
- [64] Sega Diagne, Ousmane Sow, Gora Diop, Richard Mane, IbrahimaDiatta, DjibyNdiongue , YoussouTraore, LemrabottHabiboullah, Mamadou Wade and GregoireSissoko. (2022) Optimization of silicon solar cell base thickness, while illuminated by a long wavelength monochromatic light: influence of both Lorentz law and Umclapp process. *International Journal of Advanced Research*, 10(08), 133-143. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/151508>
- [65] 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. <https://doi.org/10.1063/1.114364>
- [66] F. Toure, M. Zoungrana, B. Zouma, S. Mbodji, S. Gueye, A. Diao & G. Sissoko (2012) Influence of Magnetic Field on Electrical Model and Electrical Parameters of a Solar Cell Under Intense Multispectral Illumination. *Global Journal of Science Frontier Research (A)* Vol. XII, issue VI, Version I, p51-59..
- [67] Ly, I., Ndiaye, M., Wade, M., Thiam, N., Sega, Gueye. And Sissoko, G. (2013). Concept of Recombination Velocity Sf<sub>cc</sub> 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*, 5, 203-208. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
- [68] 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.
- [69] H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. NDiaye, B. Dieng, O.H. Lemrabott, A.S. Maïga and G. Sissoko(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.
- [70] I. Ly, M. Wade, H. Ly Diallo, M. A. O. El Moujtaba, O. H. Lemrabott, S. Mbodji, O. Diasse, A. Ndiaye, I. Gaye, F. I. Barro, A. Wereme, G. Sissoko (2011). Irradiation effect on the electrical parameters of a bifacial silicon solar cell under multispectral illumination. *Proceedings of 26<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 1DV.4.52 (2011)*, pp785-788; <http://www.eupvsec-proceedings.com>
- [71] Furlan, J. and S. Amon (1985). Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon. *Solid State Electron*, 28, Pp. 1241-1243.
- [72] Rosling, M., Bleichner, H., Mundqvist, M. and Nordlander, E. (1992). A Novel Technique for the Simultaneous Measurement of Ambipolar Carrier Lifetime and Diffusion Coefficient in Silicon. *Solid State Electronics*, 35, 1223-1227. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(92\)90153-4](https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90153-4)
- [73] Misiakos, K. and Tsamakis, D. (1994) Electron and Hole Mobilities in Lightly Doped Silicon. *Applied Physics Letters*, 64, 2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>.