



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

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/13832
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13832>



RESEARCH ARTICLE

EFFET DE L'ENERGIE D'IRRADIATION SUR LA RESISTANCE SERIE DANS UNE PHOTOPILE (N+/P/P+) AU SILICIUM A JONCTIONS VERTICALES SERIES

Oumar DIA¹, Mamadou Lamine BA¹, Gora DIOP¹, Ibrahima DIATTA², Mor SARR², Mamadou WADE¹
and Gregoire SISSOKO²

1. Polytechnic School of Thiès, BP A10, Thiès, Senegal.
2. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable(GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 29 September 2021
Final Accepted: 31 October 2021
Published: November 2021

Key words:-

Photopile au Silicium, Jonction Verticale Serie, Irradiation, Resistance Serie

Abstract

Les paramètres phénomologiques dans la photopile (n+/p/p+) au silicium à jonctions verticales séries, sous éclairage, sont utilisés pour extraire la résistance série, pour chaque dose d'irradiation appliquée. L'équation de diffusion des porteurs minoritaires de charge électriques dans la base (p) est influencée par le flux et l'intensité de l'irradiation par des particules chargées. Sa résolution conduit à la densité de courant de charges électriques et la phototension, qui permettent d'établir la caractéristique J_{ph} - V_{ph} , pour chaque dose d'irradiation. Le modèle électrique équivalent à la photopile, en fonctionnement de circuit ouvert, permet de déduire la résistance série pour chaque épaisseur de base(p) optimisée et chaque dose d'irradiation.

Copy Right, IJAR, 2019,. All rights reserved.

Introduction:-

Il existe divers types de photopiles au silicium [1], [2], [3], [4], [5], [6], selon la cristallinité du matériau, ou selon la possibilité d'éclairage, verticale ou horizontale (mono ou double face) par rapport à la surface de la jonction. Alors les techniques de caractérisation sont variées [7], selon le régime de fonctionnement établi (statique ou dynamique)[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] en vue d'extraire les paramètres qui sont désignés par :

- Phénomologiques, représentant la durée de vie, la mobilité, la longueur et le coefficient de diffusion, les vitesses de recombinaison surfaciques (émetteur, jonction, base, et joints de grains) [13], [14], [15], [16] des porteurs de charge.
- Electriques, car représentant les paramètres du modèle équivalent électrique de la photopile sous obscurité ou sous éclairage, qui sont, les résistances série, shunt, capacité, et self inductance) [12], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

Dans ce travail, nous proposons la détermination de la résistance série d'une photopile (n+/p/p+) au silicium à jonctions verticales [6], [23], [24], [25], [26], préalablement irradiée par des particules chargées (électron, ions légers ou lourds) [27], [28], [29], [30], [31], [32] [33]et placée sous éclairage polychromatique, en régime statique. Le coefficient de dommage (kl) et l'énergie du flux (ϕ_p) d'irradiation de particules chargées, influencent les phénomènes de diffusion $D(kl, \phi_p)$ des porteurs de charge dans la base(p)[34], [35]. Alors nous considérerons les paramètres phénomologiques à travers la résolution de l'équation de diffusion relative à la densité des porteurs

Corresponding Author:- Gregoire SISSOKO

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

photogénérés $\delta(kl, \phi_p, x, z)$ aux coordonnées (x, z) dans la base (p), et munie des conditions aux limites caractérisées par les vitesses de recombinaison à la jonction (Sf) [37], [38] et (Sb) en face arrière [39], [40], [41]. La densité de photocourant ($J_{ph}(Sf)$) et la phototension ($V_{ph}(Sf)$) sont respectivement déduites par la loi de Fick et de Boltzmann, afin d'établir la caractéristique courant ($J_{ph}(Sf)$)-tension ($V_{ph}(Sf)$) de la photopile sous éclairage [38], [42], [43], pour chaque cas d'irradiation. Le modèle électrique équivalent de la photopile sous éclairage, au point de fonctionnement de circuit ouvert défini par (Sf) la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction, permet de remonter à la résistance série de la photopile d'épaisseur de base optimisée [45], [46], [47], [48], [49], [50], pour chaque dose d'irradiation.

Présentation de la photopile

La structure de la photopile à jonctions verticales [23], [24], [25], [26] séries, éclairée par une lumière polychromatique et sous irradiation est représentée par la **figure.1** ci-dessous.

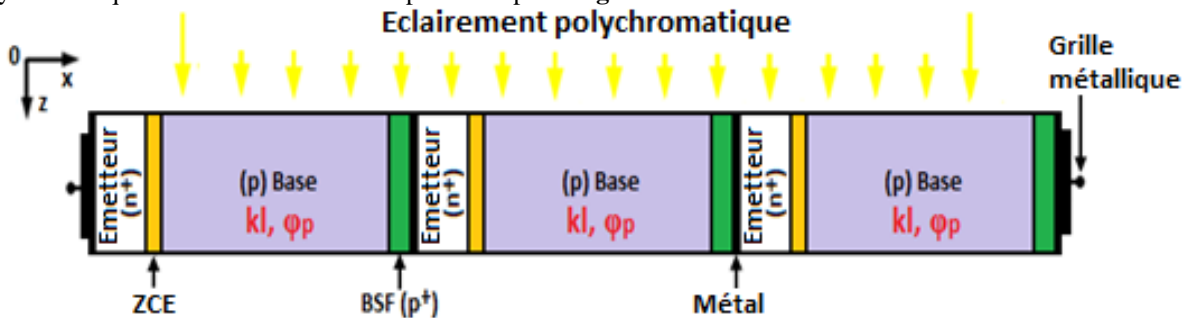


Figure 1:- Photopile à jonctions verticales séries de type $n^+ - p - p^+$ type sous éclairage polychromatique et sous irradiation.

La **figure 2** représente la structure d'une unité de photopile à jonctions verticales séries sous éclairage polychromatique et sous irradiation.

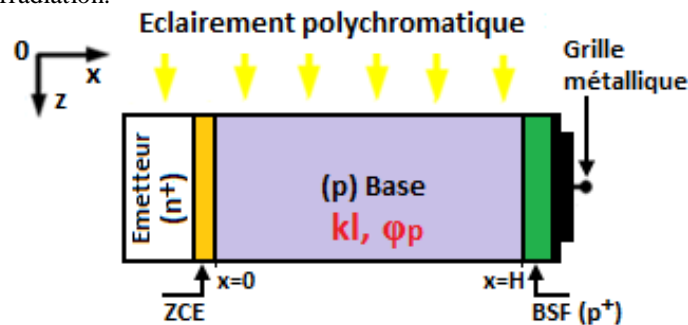


Figure.2:- Unité de photopile à jonction verticale série.

Ces différentes régions sont :

- L'émetteur de type n^+ , d'épaisseur faible ($0,5$ à $1\mu m$), et fortement dopé en atomes donneurs (10^{17} à 10^{19} atomes par cm^3)
- La base de type p est relativement peu dopée en atomes accepteurs (10^{15} à 10^{17} atomes par cm^3). Son épaisseur est beaucoup plus importante, et a fait l'objet d'études en optimisation [45], [46], [47], [48], [49], [50].
- La Zone de Charge d'Espace (ZCE) est obtenue à l'interface des deux semi-conducteurs mis en contact, produisant la diffusion des porteurs majoritaires du type (n) vers le type (p) et vis versa. A la limite de pénétration, les charges électriques se fixent et constituent la zone de charge d'espace (jonction) où règne un champ électrique très intense. Ce champ permet la séparation des paires électron-trou pour les renvoyer vers les contacts externes.
- Le BSF (Back Surface Field) de type (p^+) est une zone située en face arrière de la base, elle est surdopée en atomes accepteurs (10^{17} à 10^{19} atomes par cm^3) par rapport à la base. Cela induit un champ électrique arrière qui permet de renvoyer vers la jonction les charges électriques photogénérées dans la base.

Equation de continuité

L'équation de continuité régissant les phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base sous irradiation et sous éclairage polychromatique est définie par l'expression ci-après.

$$D(kl, \phi_p) \frac{\partial^2 \delta(kl, \phi_p, x, z)}{\partial x^2} - \frac{\delta(kl, \phi_p, x, z)}{\tau} + G(z) = 0 \quad (1)$$

$\delta(kl, \phi_p, x, z)$: densité des porteurs de charge minoritaires en excès photogénéré dans la base de la photopile à la position x , dépendant du flux d'énergie d'irradiation ϕ_p et de l'intensité du coefficient de dommage kl .

$D(kl, \phi_p)$: coefficient de diffusion des électrons dans la base dépendant du flux d'énergie d'irradiation ϕ_p et de l'intensité du coefficient de dommage kl .

et τ : durée de vie des porteurs de charges minoritaires dans la base définie par la relation Einstein suivante:

$$\tau = \frac{L^2(kl, \phi_p)}{D(kl, \phi_p)} \quad (2)$$

avec $L(kl, \phi_p)$: longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base en fonction du flux d'énergie d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage. Elle représente aussi la distance moyenne parcourue par les porteurs minoritaires avant leur recombinaison dans la base sous irradiation. Son expression est donnée par la relation empirique ci-après [34], [35]:

$$L(kl, \phi_p) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{L_0^2} + kl \times \phi_p\right)}} \quad (3)$$

Où: L_0 : longueur de diffusion des porteurs minoritaires à l'absence d'irradiation.

ϕ_p : flux d'énergie d'irradiation et kl l'intensité du coefficient de dommage.

L'expression du taux de génération des porteurs minoritaires à la profondeur z dans la base est donnée par la relation suivante:

$$G(z) = n \times \sum_{i=1}^3 (a_i \times \exp(-b_i \times z)) \quad (4)$$

Avec a_i et b_i des coefficients tabulés du rayonnement solaire et dépendent du coefficient d'absorption du silicium avec la longueur d'onde [51]. Il permet de corréler le niveau d'éclairement expérimental au niveau d'éclairement de référence pris sous AM 1.5.

Résolution de l'équation de continuité

L'expression de l'équation de continuité devient:

$$\frac{\partial^2 \delta(kl, \phi_p, x, z)}{\partial x^2} - \frac{\delta(kl, \phi_p, x, z)}{L^2(kl, \phi_p)} + \frac{1}{D(kl, \phi_p)} \times n \times \sum_{i=1}^3 (a_i \times \exp(-b_i \times z)) = 0 \quad (5)$$

La solution est donnée sous la forme suivante:

$$\delta(kl, \phi_p, x, z) = A \times \cosh\left[\frac{x}{L(kl, \phi_p)}\right] + B \times \sinh\left[\frac{x}{L(kl, \phi_p)}\right] + \sum_{i=1}^3 (K \times \exp(-b_i \times z)) \quad (6)$$

$$K = \frac{a_i \times n \times L^2(kl, \phi_p)}{[L^2(kl, \phi_p) \times b_i^2 - 1] \times D(kl, \phi_p)} \quad \text{Avec: } (L^2(kl, \phi_p) \times b_i^2 \neq 1) \quad (7)$$

Les coefficients A et B sont déterminés à partir des conditions aux limites, qui sont les suivantes:

i) A la jonction ($x = 0$)

$$\left. \frac{\partial \delta(kl, \phi_p, x, z)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D(kl, \phi_p)} \times \delta(kl, \phi_p, 0, z) \quad (8)$$

Sf est la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la jonction, imposée par la charge extérieure et caractérise le point de fonctionnement de la photopile, variant du circuit ouvert au court-circuit [14], [15], [37], [38].

ii)A la face arrière (x = 0)

$$\left. \frac{\partial \delta(kl, \phi_p, x, z)}{\partial x} \right|_{x=H} = \frac{-S_b}{D(kl, \phi_p)} \times \delta(kl, \phi_p, H, z) \quad (9)$$

Sb est la vitesse de recombinaison des porteurs de charge à la face arrière [39], [40], [41]. Elle est la conséquence du champ électrique créé par la jonction p/p+ et caractérise le comportement des porteurs de charges dans cette zone [2].

Densité de photocourant et phototension

La densité de photocourant est définie par la relation de Fick suivante:

$$J_{ph}(kl, \phi_p, S_f, H) = q \times D(kl, \phi_p) \times \left. \frac{\partial \delta(kl, \phi_p, x, z)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (10)$$

Où q est la charge électrique de l'électron

L'expression de la phototension aux bornes de la photopile sous éclairage multispectral constant est donnée par la relation de Boltzmann définie ci-après :

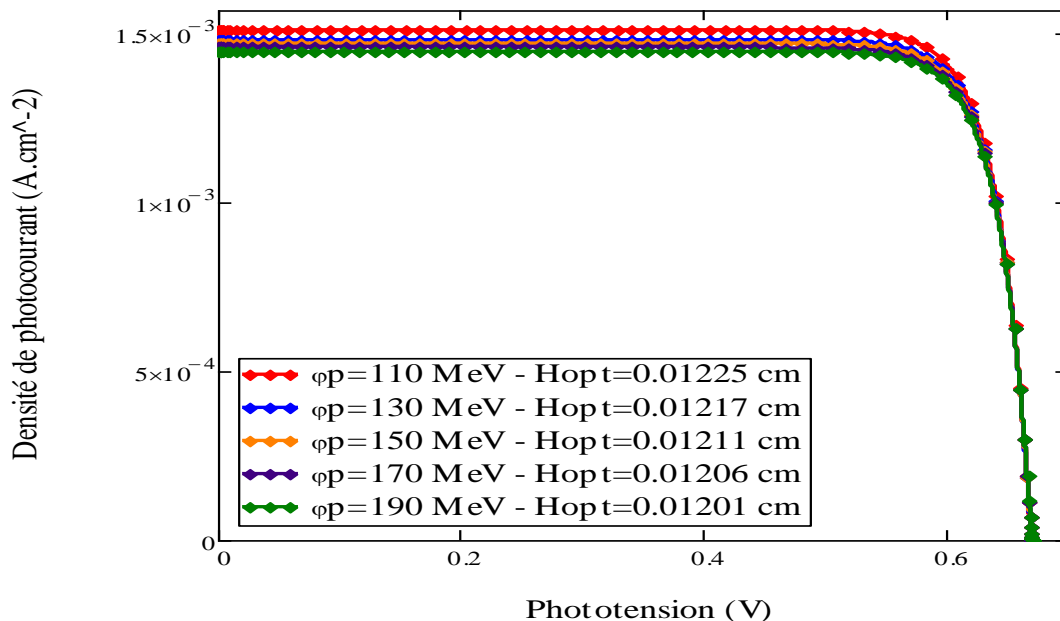
$$V_{ph}(kl, \phi_p, S_f, H_{opt}) = \frac{K_b \times T}{q} \ln \left[\frac{N_b}{(n_i)^2} \times \delta(kl, \phi_p, 0, z, H_{opt}) + 1 \right] \quad (11)$$

Où :K_b : constante de Boltzmann, q : charge élémentaire de l'électron, T : température, N_b : taux de dopage dans la base de la photopile, n_i : densité intrinsèque des porteurs minoritaires de charge.

Caractéristique J_{ph}(kl,φp, Hopt, Sf)-V_{ph}(kl,φp, Hopt, Sf) de la photopile sous éclairage

Les figures 3 et 4 représentent les profils de la caractéristique J_{ph}(kl,φp, Hopt, Sf)-V_{ph}(kl,φp, Hopt, Sf)de la photopile respectivement, pour différentes variations du flux d'irradiation et de l'intensité du coefficient de dommage, correspondant à une épaisseur optimum de la base.

Figure 3:-Profil de la caractéristique J_{ph}-V_{ph} pour différentes valeurs du flux d'énergie d'irradiation et de l'épaisseur optimum de la base.



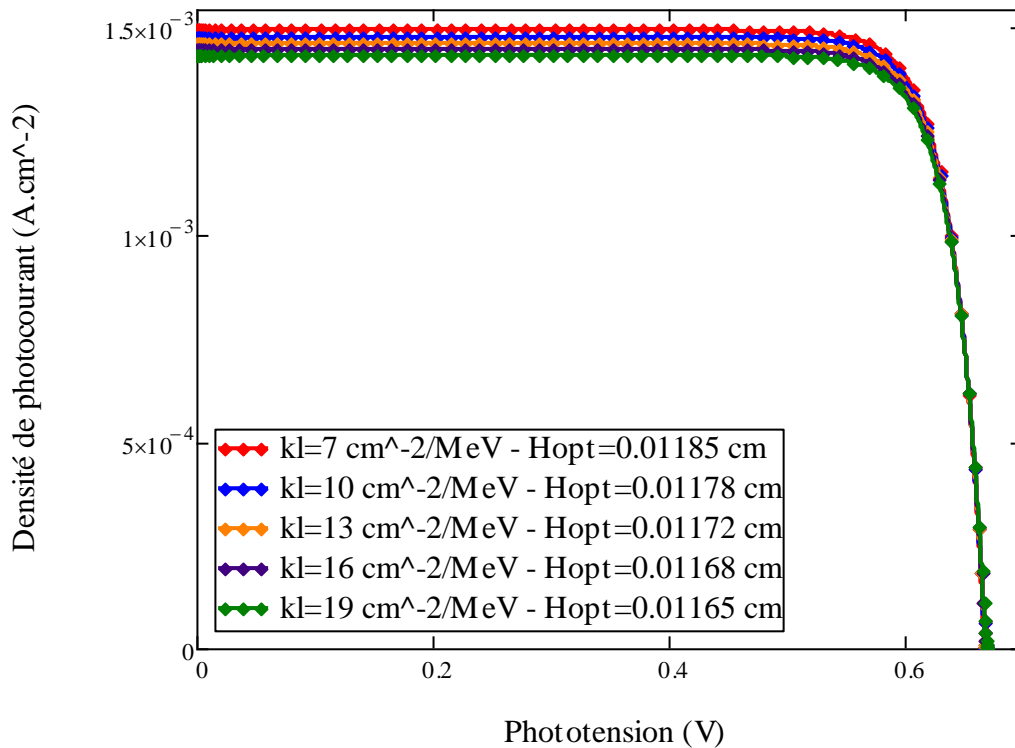


Figure 4:- Profil de la caractéristique $J_{ph}(Sf)-V_{ph}(Sf)$ pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage et de l'épaisseur optimum de la base.

Circuit électrique équivalent et expression de la résistance série

Le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle sous éclairage est représenté sur la **figure 5**. Ce circuit traite la photopile comme un générateur idéal de courant qui débite une densité de photocourant J_{ph} dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et une résistance shunt R_{sh} et en série avec une résistance série R_s puis, le tout connecté en parallèle sur une charge R_{ch} .

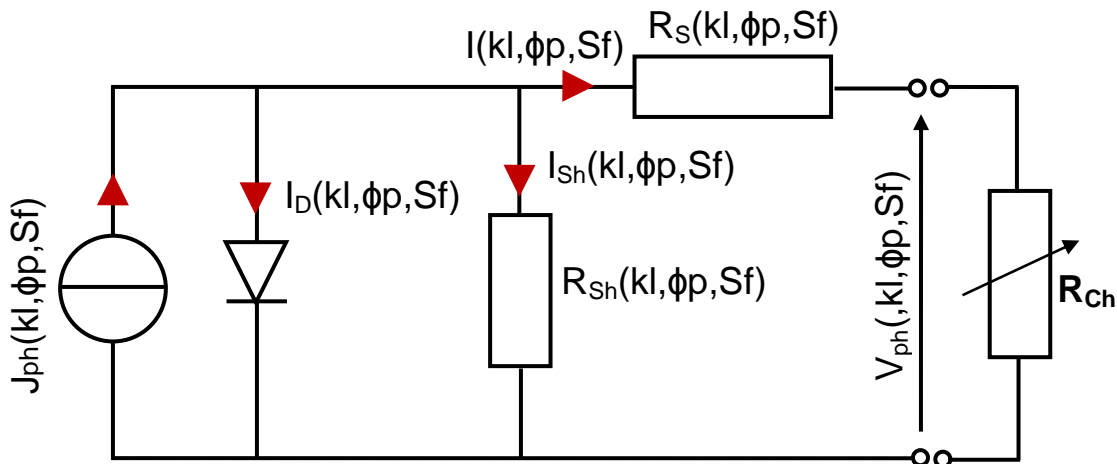


Figure 5:- Schéma du circuit électrique équivalent d'une photopile.

Etude de la résistance série

La résistance série R_s est un paramètre fondamental qui dépend de la nature du substrat, de la température et de la technologie utilisée et joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. Elle caractérise les effets résistifs du

matériau et du dispositif de contact utilisé. Pour des photopiles de bonne qualité, elle est souvent très faible [12], [17], [18], 19].

Modèle électrique de la photopile en circuit ouvert

Sur la caractéristique, densité de photocourant en fonction de la phototension de la photopile, nous considérons la situation de circuit-ouvert où la phototension est maximale et la densité de photocourant nulle. Dans cette zone la caractéristique est supposée être une droite oblique permettant de modéliser la photopile comme une source idéale de tension en série avec une résistance série R_s . La **figure 6** ci-dessous matérialise le modèle au voisinage du circuit ouvert.

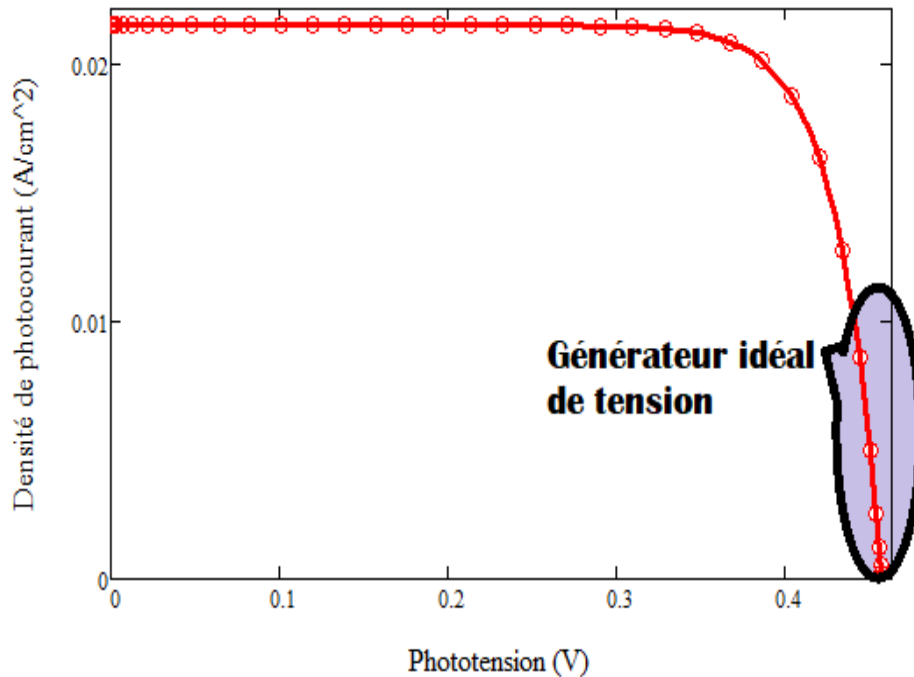


Figure 6:- Caractéristique densité de photocourant-phototension d'un générateur de tension.

Le schéma électrique équivalent de la photopile fonctionnant en situation de circuit ouvert est représenté par la figure suivante.

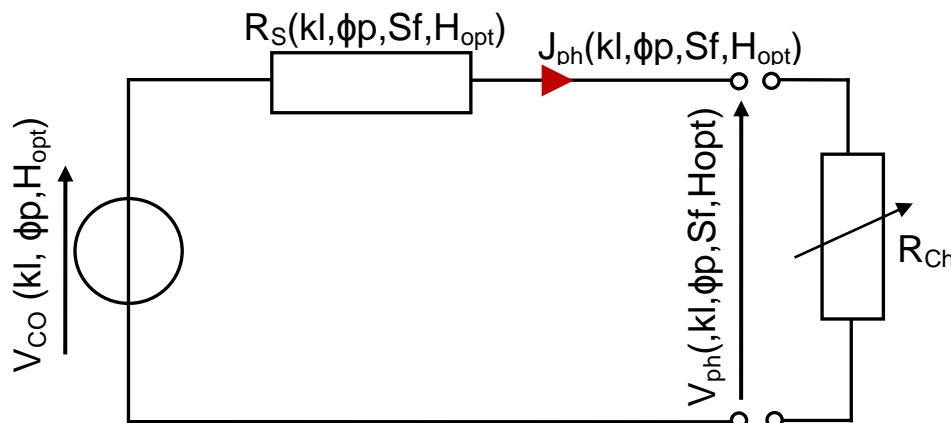


Figure 7:- Circuit électrique équivalent de la photopile en circuit ouvert.

L'expression de la résistance série [42], [43] s'obtient en appliquant les lois des nœuds et des mailles sur le circuit électrique de la **figure 7**. Elle est définie par l'équation suivante:

$$R_s(kl, \phi p, S_f, H_{opt}) = \frac{V_{co}(kl, \phi p, H_{opt}) - V_{ph}(kl, \phi p, S_f, H_{opt})}{J_{ph}(kl, \phi p, S_f, H_{opt})} \tag{12}$$

La figure 8 représente la courbe de calibration de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum correspondantes au flux de l'énergie d'irradiation.

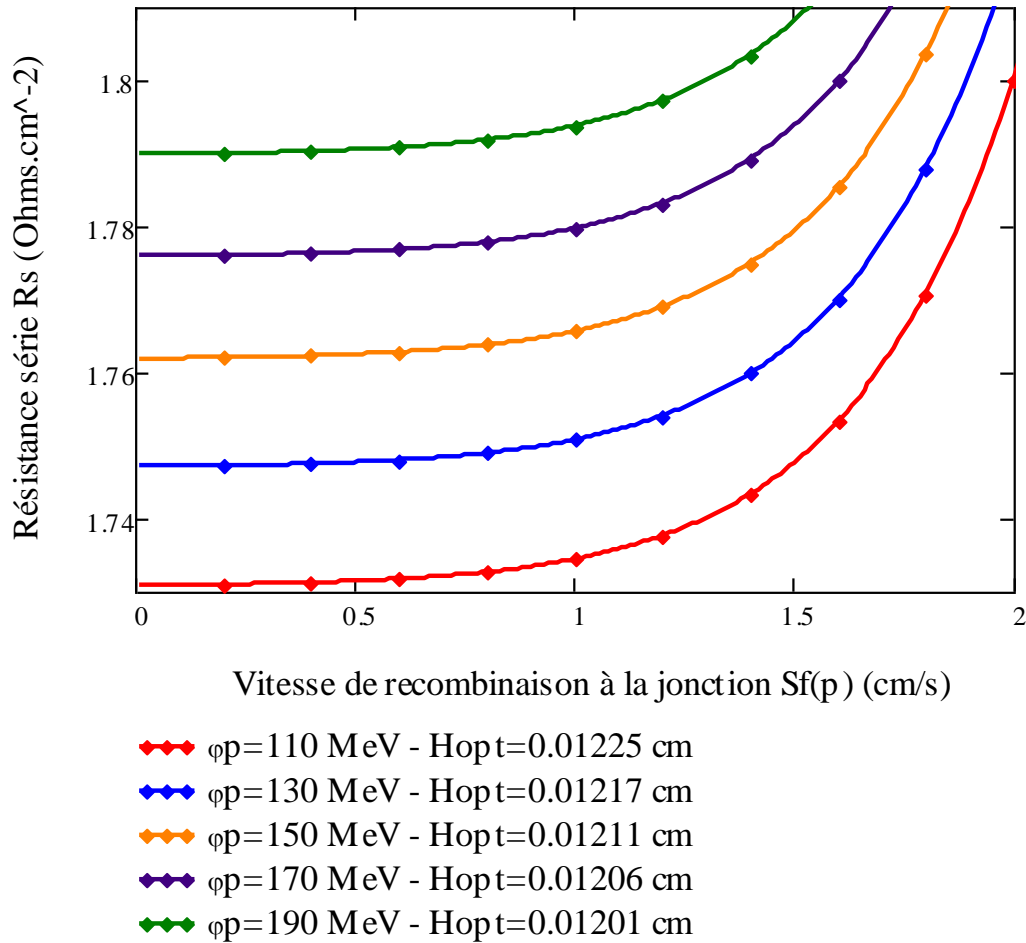


Figure 8:- Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du flux de l'énergie d'irradiation et de l'épaisseur optimum.

En analysant la figure 8 nous constatons que, la résistance série R_s est quasi constante et faible ceci pour de valeurs faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f < 1 \cdot 10^1 \text{ cm/s}$). Elle augmente de façon significative à des valeurs élevées de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f > 1 \cdot 10^1 \text{ cm/s}$). Nous remarquons qu'une augmentation du flux de l'énergie d'irradiation combinée à l'épaisseur optimale produit une augmentation de la résistance série.

Le tableau 1 ci-dessous donne quelques valeurs numériques de la résistance série (R_s) obtenues à partir de la figure 8, pour différentes valeurs du flux de l'énergie d'irradiation et de l'épaisseur optimale.

Tableau1:- Valeurs numérique de la résistance série (R_s) pour différentes valeurs du flux de l'énergie d'irradiation et de l'épaisseur optimum.

$\phi p(\text{MeV})$	110	130	150	170	190
$H_{opt}(\text{cm})$	0.01225	0.01217	0.01211	0.01206	0.01201
$R_s(\Omega.\text{cm}^{-2})$	1.7312	1.7473	1.7621	1.7764	1.7903

Le **tableau 1** a permis de tracer les profils de la résistance série respectivement en fonction du flux de l'énergie d'irradiation (**figure 9**) et de l'épaisseur optimum (**figure 10**).

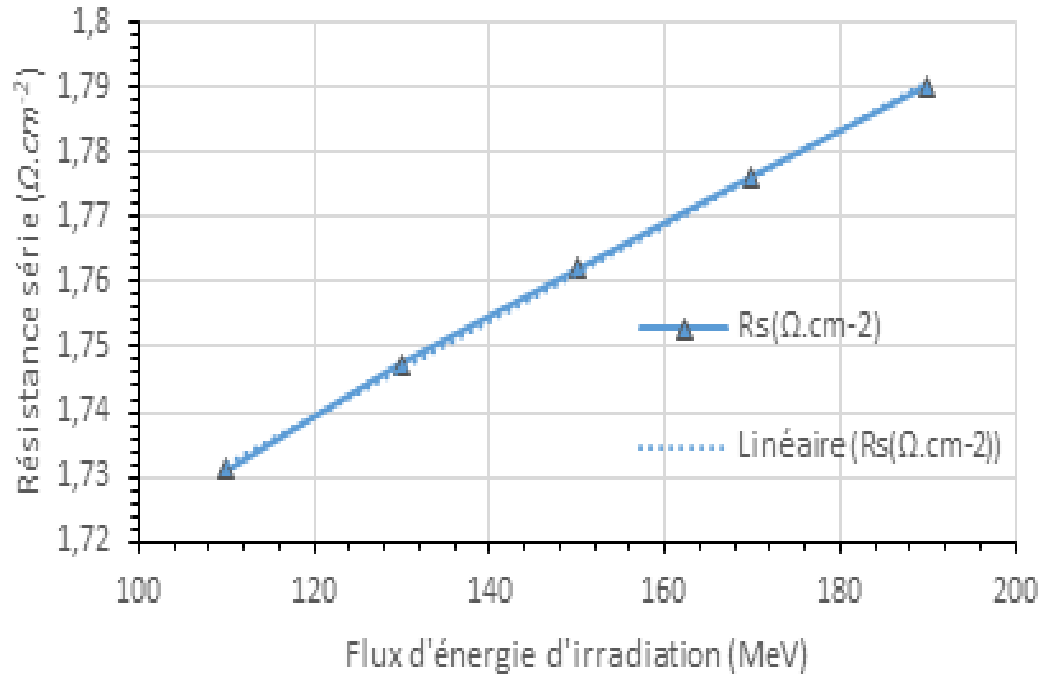


Figure 9:- Profil de la résistance série en fonction du flux de l'énergie d'irradiation.

Equation de corrélation mathématique est donnée par:

$$R_s(\Omega.cm^{-2}) = 7 * 10^{-4} \times \phi p (MeV) + 1,651 (13)$$

Nous constatons au niveau de la figure 9, que l'amplitude de la résistance série (R_s) augmente lorsque le flux de l'énergie d'irradiation augmente. La résistance série (R_s) croît linéairement lorsque le flux de l'énergie d'irradiation augmente.

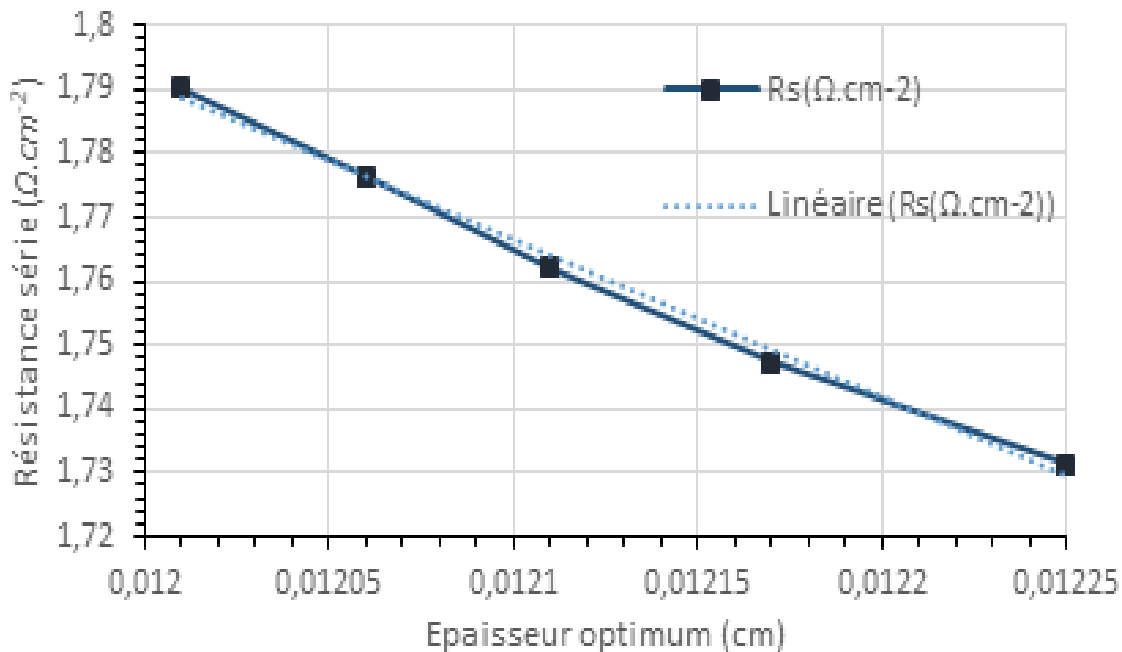


Figure 10:- Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur optimum.

Equation de corrélation mathématique est donnée par:

$$Rs(\Omega.cm^{-2}) = -274,64 \times Hopt(cm) + 4,7629 \quad (14)$$

Nous remarquons au niveau de la figure 10 que la résistance série (Rs) diminue lorsque l'épaisseur optimale de la base de la photopile augmente. Cette résistance série décroît linéairement.

La **figure 11** représente le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs de l'épaisseur optimum correspondantes à l'intensité du coefficient de dommage.

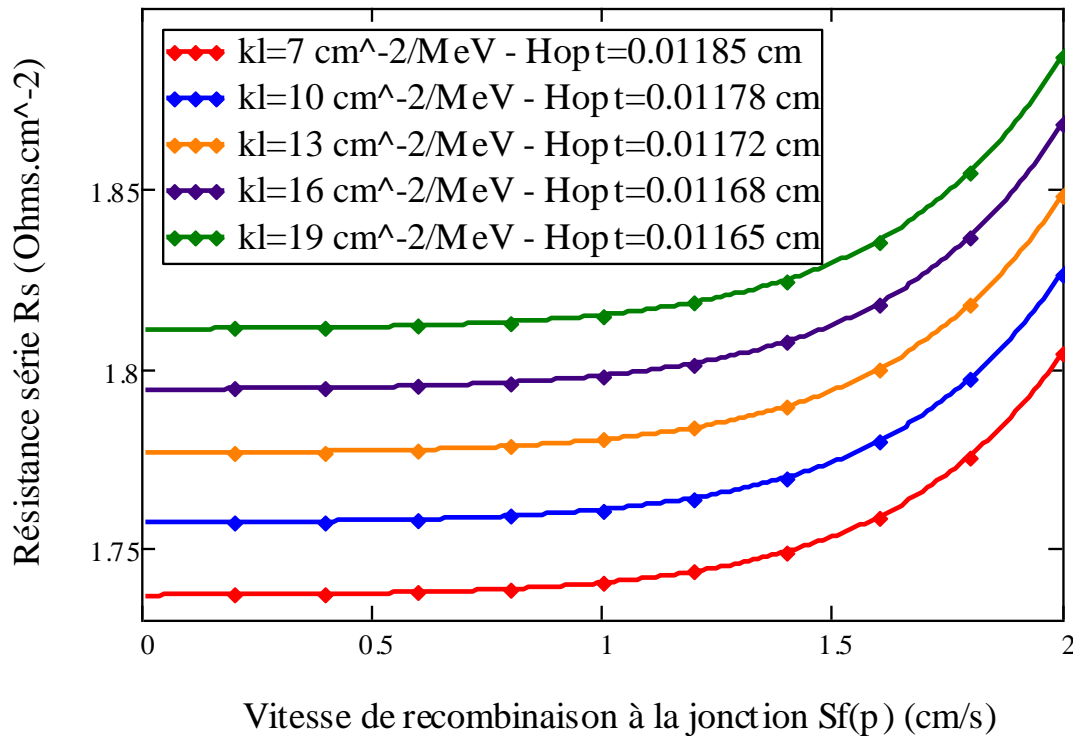


Figure 11:- Courbes de calibration de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage et de l'épaisseur optimum.

La figures 11 montre que la résistance série Rs est quasi constante et faible pour de valeurs faibles de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f < 1,5 \cdot 10^{15} cm/s$). Elle augmente de façon significative à des valeurs élevées de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f > 1,5 \cdot 10^{15} cm/s$). Nous remarquons qu'une augmentation de l'intensité du coefficient de dommage couplé à l'épaisseur optimale entraîne une augmentation de la résistance série.

Le tableau 2 représente les valeurs numériques de la résistance série (Rs) extraites de la figure 11 pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage et de l'épaisseur optimale.

Tableau 2:- Valeurs numérique de la résistance série (Rs) pour différentes valeurs de l'intensité du coefficient de dommage et de l'épaisseur optimale.

kl(cm ² /MeV)	7	10	13	16	19
Hopt(cm)	0.01185	0.01178	0.01172	0.01168	0.01165
Rs(Ω.cm ⁻²)	1.7377	1.7577	1.777	1.7944	1.8111

Le **tableau 2** a permis de tracer les profils de la résistance série en fonction respectivement de l'intensité du coefficient de dommage (**figure 12**) et de l'épaisseur optimum (**figure 13**).

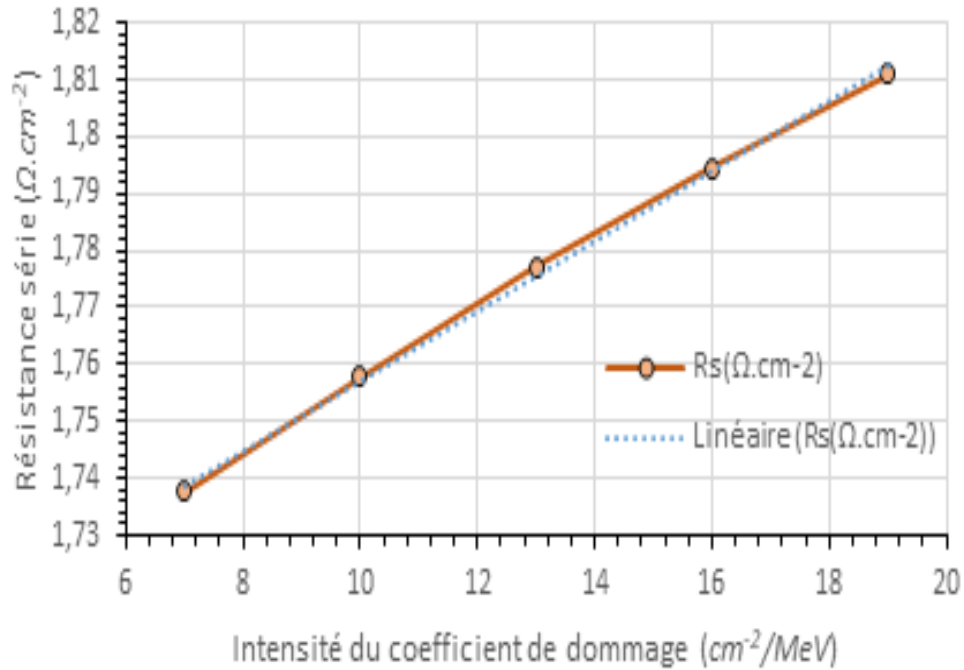


Figure 12:- Profil de la résistance série en fonction de l'intensité du coefficient de dommage.

Equation de corrélation mathématique est donnée par l'expression:

$$Rs(\Omega.cm^{-2}) = 6,1 * 10^{-3} \times kl(cm^{-2}.MeV^{-1}) + 1,6961 \quad (15)$$

Nous constatons au niveau de la figure 12 que l'amplitude de la résistance série (Rs) augmente lorsque l'intensité du coefficient de dommage augmente. La résistance série (Rs) croît linéairement.

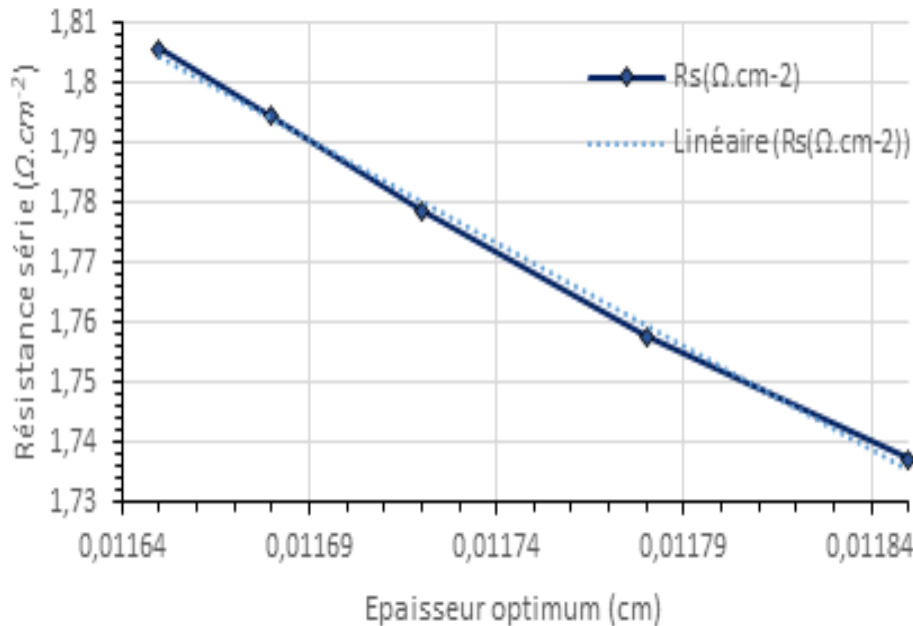


Figure 13:- Profil de la résistance série en fonction de l'épaisseur optimum.

L'observation de la figure 13 permet de voir que la résistance série (Rs) diminue lorsque l'épaisseur optimum de la base de la photopile augmente. Cette résistance série décroît linéairement et est modélisée par l'équation suivante :

$$R_s(\Omega \cdot \text{cm}^{-2}) = -345,22 \times H_{opt}(\text{cm}) + 5,8262 \quad (16)$$

Conclusion:-

L'étude du paramètre électrique qu'est la résistance série (R_s) de la photopile à jonctions verticales sous l'influence de du flux et de l'intensité de l'irradiation par des particules chargées qui ont imposé une épaisseur optimum de la base. a été réalisée.

En effet, nous avons d'abord étudié l'équation de diffusion relative aux porteurs minoritaires dans la base, pour ensuite établir la caractéristique densité de courant-photension, de la photopile sous éclairage. La résistance série est obtenue en partant du modèle électrique de la photopile en circuit ouvert où cette résistance est connectée en série avec la charge élevée. La courbe calibration de cette résistance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_j) a été tracée pour différentes valeurs du flux de l'énergie d'irradiation et du coefficient de dommage et sous l'effet de l'épaisseur optimum. La résistance série croît avec le flux de l'irradiation et le coefficient de dommage. Et elle décroît avec l'épaisseur optimum de la base, quels que soient, le flux et l'intensité de l'irradiation.

Références Bibliographiques:-

- [1] Green. M (1995). Silicon Solar Cells, Advanced Principles and Practice. Center for Photovoltaic Devices and Systems, 258-265.
- [2] 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>
- [3] Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997). Double Side Solar Cells to Improve Static Concentrator. Proceeding of the European Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, 269-277. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25
- [4] J. Del Alamo, J. Eguren and A. Luque (1980). Operating limits of Al-Alloyed high-low junction for BSF solar cells. Solid-States-Electronics Vol. 24, pp. 415- 420.
- [5] 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>
- [6] Wise, J.F.(1970). Vertical Junction Hardened Solar Cell. US Patent 3, 690-953.
- [7] Dhariwal, S.R. and Vasu, N.K. (1981). A generalized approach to lifetime measurement in p-n 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)
- [8] Vardayan, R.R., Kerst, U., Wawer, P., Nell, M.N. and Wagemann, H.G (1998). Method of Measurement of All Recombination Parameters in the Base Region of Solar Cells. Proceedings of 2nd Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, 6-10 July 1998, 191-193.
- [10] Jung, T.-W., Lindholm, F.A. and Neugroschel, A. (1984). Unifying View of Transient Responses for Determining Lifetime and Surface Recombination Velocity in Silicon Diodes and Back-Surface-Field Solar Cells, with Application to Experimental Short-Circuit-Current Decay. IEEE Transactions on Electron Devices, 31, 588-595. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1984.21573>
- [12] D. Chenvidhya, K. Kirtikara, C. Jivacate (2003). A new characterization method for solar cell dynamic impedance. Volume 80, Issue 4, Déc. 2003, Pages 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
- [13] 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.
- [14] Sissoko, G., Nanéma, E., Corr a, 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.
- [15] Diallo, H.L., Wereme, A., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (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, pp.203-211. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [16] Y. Betsler, D. Ritter, G. Bahir, S. Cohen, and J. Sperling (1995). Measurement of the minority carrier mobility in the base of heterojunction bipolar transistors using a magnetotransport method", Appl. Phys. Lett., Vol. 67, No. 13, Pp. 1883-1884.

- [17] 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>
- [18]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)
- [19]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)
- [20]Diallo, H.L., Dieng, B., Ly, I., Dione, M.M., Ndiaye, M., Lemrabott, O.H., Bako, Z.N., Wereme, A. and Sissoko, G (2012). Determination of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 2626-2631.
- [21] R. Anil Kumar, M. S. Suresh et J. Nagaraju.(2001).Measurement of AC parameters of gallium arsenide (GaAs/Ge) solar cell by impedance spectroscopy. *IEEE Transactions on electron devices*, Volume 48, Issue 9, Sept., Pp.2177 – 2179. DOI: 10.1109/16.944213.
- [22]J. Thongpron, K. Kirtikara, C. Jivacate (2006). A method for the determination of dynamic resistance of photovoltaic modules under illumination. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91, Pp. 3078-3084.
- [23] Hu, C., Carney, J.K. and Frank, R.I. (1977). New Analysis of a High Voltage Vertical Multijunction Solar Cell. *Journal of Applied Physics*, 48, 442-444. <https://doi.org/10.1063/1.323355>
- [24]Sarfaty, R., Cherkun, A., Pozner, R., Segev, G., Zeierman, E., Flitsanov, Y., Kribus, A. and Rosenwaks, Y. (2011). Vertical Junction Si Micro-Cells for Concentrating Photovoltaics. *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg*, 5-6 September 2011, 145-147.
- [25]Gover, A. and Stella, P. (1974). Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-21, 351-356.
- [26]Terheiden, B., Hahn, G., Fath, P. and Bucher, E. (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. *Proc. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow*, 1-5 May 2000, 1377-1380.
- [27]E. Bendada, K. Rais and P. Mialhe (1997). Caractérisation des dégradations de transistors MOS de puissance sous irradiations. *J. Phys. III. France*. 7, Pp. 2131-2141.
- [28]ManjunathaPattabi, SheejaKrishman, Ganesh Sanjeev (2007). Studies on the temperature dependence of I-V and C-V characteristics of electron irradiated silicon photo- detectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91, Pp. 1521-1524.
- [29]Seitz, F. and Koehler, J.S. (1956). Displacement of Atoms during Irradiation. In: Seitz, E. and Turnbull, D., Eds., *Solid State Physics*, Vol. 2, Academic Press, London/New York, 305.
- [30]Tada, H.Y., Carter, J.R., Anspaugh, B.E. and Downing, R.G. (1982). *Solar Cell Radiation Handbook*. JPL Publication 82-69, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena.
- [36] Mamadou L. Ba, NdeyeThiam, MoustaphaThiame, YoussouTraore, Masse S. Diop, Mamour Ba, Cheikh T. Sarr, Mamadou Wade et GregoireSissoko (2019). Base Thickness Optimization of a (n+-p-p+) Silicon Solar Cell in Static Mode under Irradiation of Charged Particles. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 11, pp. 173-185 <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
- [37] Sissoko, G., Sivoththanam, S., Rodot, M. and Mialhe, P (1992). Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CI OCDV) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, pp.352-354.
- [38]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.
- [39] Joardar, K.,Dondero, R.C. and Schroda, D.K (1989).A Critical Analysis of the Small- Signal Voltage-Decay Technique for Minority-Carrier Lifetime Measurement in Solar Cells. *Solid-State Electronics*, 32, pp.479-483.[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(89\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(89)90030-0)
- [40]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>
- [41] Diasse, O., Diao. A., Ly, I., Diouf. M.S., Diatta, I., Mane. R., Traore Y. and Sissoko. G (2018). Back Surface Recombination Velocity Modeling in White Biased Silicon Solar Cell under Steady State. *Journal of Modern Physics*, 9, pp.189-201.<https://doi.org/10.4236/jmp.2018.92012>
- [42] 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 multispectral constant en régime statique. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N° 2, Pp. 187-206.

- [43] Marcel SitorDiouf, GohanSahin, AmaryThiam, Khady Faye, MoussaIbraNgom, Doudou Gaye, GrégoireSissoko (2015). Determination of the junction surface recombination velocity limiting the open circuit (sfoc) for a bifacial. IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 2 Issue 9, Sept, ISSN 2348 – 7968.
- [44] Mbodji, S., Ly, I., Diallo, H.L., Dione, M.M., Diasse, O. and Sissoko, G. (2012). Modeling Study of N+/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf). Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4, 1-7.
- [45] Omar Dia, Mohamed AbderrahimOuld El Moujtaba, Sega Gueye, MamadouLamine Ba, IbrahimaDiatta, Gora Diop, Marcel SitorDiouf and GregoireSissoko (2020). Optimum thickness determination technique as applied to a series vertical junction silicon solar cell under polychromatic illumination: effect of irradiation. Int. J. Adv. Res. 8(05). pp. 616-626. Article DOI:10.21474/IJAR01/10967 DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10967>
- [46] Diop M.S., Ba H.Y., Thiam N., Diatta I., Traore Y., Ba M.L., Sow E.H., Mballo O. and Sissoko G. (2019). Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. World Journal of Condensed Matter Physics, 9, 102-111. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2019.94008>.
- [47] Dede, M.M.S., Ndiaye, M., Gueye, S., et al. (2020) Optimum Base Thickness Determination Technique as Applied to n/p/p+ Silicon Solar Cell under Short Wavelengths Monochromatic Illumination. International Journal of Innovation and Applied Studies, 29, 576-586. <http://www.ijias.issr-journals.org>
- [48] Ndiaye, F.M., Ba, M.L., Ba, M.A., Diop, G., Diatta, I., Sow, E.H., Mballo, O. and Sissoko, G. (2020) Lamella Silicon Optimum Width Determination under Temperature. International Journal of Advanced Research, 8, 1409-1419. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/11228>
- [49] AmadouSarrGning, MamadouLamine Ba, MamourAmadou Ba, Gora Diop, IbrahimaDiatta, El Hadji Sow, OulimataMballo and GregoireSissoko (2020). Optimum basethickness determination of a back illuminated silicon solar cell: irradiation effect. International Journal of Advanced Research, 8(07), 100-109. <http://dx.doi.org/10-21474/IJAR01/11268>
- [50] MorSarr, Idrissa Gaye, SeydiAbabacarNdiaye, MamadouLamine Ba, Gora Diop, IbrahimaDiatta, LemrabottHabiboullah, GregoireSissoko (2021). Effet de l'irradiation par des particules chargees sur le coefficient de diffusion de la base d'une photopile au silicium (n+-p-p+) : determination de l'epaisseur optimum sous eclairement monochromatique. International Journal of Advanced Research. 9(03), 127-135. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12565>
- [51] Furlan, J. and Amon, S. (1985). Approximation of the Carrier Generation Rate in Illuminated Silicon. Solid-State Electronics, 28, 1241-1243. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(85\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0038-1101(85)90048-6).