



Journal Homepage: -www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/13668
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13668>



RESEARCH ARTICLE

DETERMINATION DE LA RESISTANCE SERIE DE LA PHOTOPILE AU SILICIUM ($N^+/P/P^+$) A JONCTIONS VERTICALES SERIES SOUS CHAMP MAGNETIQUE

Gora DIOP¹, Mame Faty Mbaye FALL¹, Mamadou SALL¹, Khady LOUM¹, Ibrahima DIATTA², Mor NDIAYE², Mamadou WADE¹ and Gregoire SISSOKO^{1,3}

1. Polytechnic School of Thiès, BP A10, Thiès, Senegal.
2. Laboratory of Semiconductors and Solar Energy, Physics Department, Faculty of Science and Technology, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal.
3. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable, BP. 15003 Dakar Fann, Senegal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 31 August 2021

Final Accepted: 30 September 2021

Published: October 2021

Key words:-

Photopile Au Silicium, Jonction Verticale Série, Magneto Transport, Resistance Serie

Abstract

L'équation de magneto transport relative aux porteurs minoritaires de charge dans la base de la photopile au silicium à jonctions verticales series, est résolue, munie des conditions aux limites, définies par les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière. Le photocourant et la phototension sont déterminés, et représentés par la caractéristique courant-tension ($I_{ph}(Sf)-V_{ph}(Sf)$) de la photopile sous éclairage monochromatique. Le modèle électrique équivalent de la photopile en situation de circuit ouvert, conduit à la détermination de la résistance série, pour différentes épaisseurs optimum de la base, imposées par le champ magnétique appliqué.

Copy Right, IJAR, 2021., All rights reserved.

Introduction:-

Les paramètres électriques macroscopiques [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] que sont les résistances série (R_s) et shunt (R_{sh}), ainsi que la capacité de la zone de charge d'espace (C_z) sont représentés dans le modèle équivalent électrique de la photopile sous obscurité et sous éclairage. Ils sont importants dans la définition de la qualité de la photopile pour son fonctionnement sous divers regimes [8], [9], [10].

Les paramètres phénoménologiques [11], [12], [13], [14], [15], [16],[17], [18], [19], [20] que sont la durée de vie (τ), le coefficient (D) et la longueur de diffusion (L), ainsi que les recombinaisons en surface (S_f et S_b) et interface (S_g) aux joints de grains [21], permettent la caractérisation du matériau semi conducteur pour l'élaboration de la photopile. Les paramètres géométriques sont imposés pour les dimensions des différentes régions qui composent la photopile [22], [23], [24]. Dans ce travail, la résistance série est déterminée dans la photopile au silicium à jonctions verticales séries [25], [26], [27] sous l'effet du champ magnétique [29],[30], [31], [32] [33]. Le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction [3] pour différentes valeurs du champ magnétique et de l'épaisseur optimum [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41] de la base de la photopile conduit à sa détermination expérimentale.

2) Présentation de la photopile au silicium à jonctions verticales séries

La photopile à jonction verticale série, étant une association en série de cellules photovoltaïques ($N^+/P/P^+$) reliées entre elles par un métal [25], [26], [27], est conçue de telle sorte que l'éclairage incident soit parallèle au plan de

Corresponding Author:- Gregoire Sissoko

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

la zone de charge d'espace (ZCE). La structure de cette photopile dans un repère (O, x, y, z) est présentée à la figure 1:

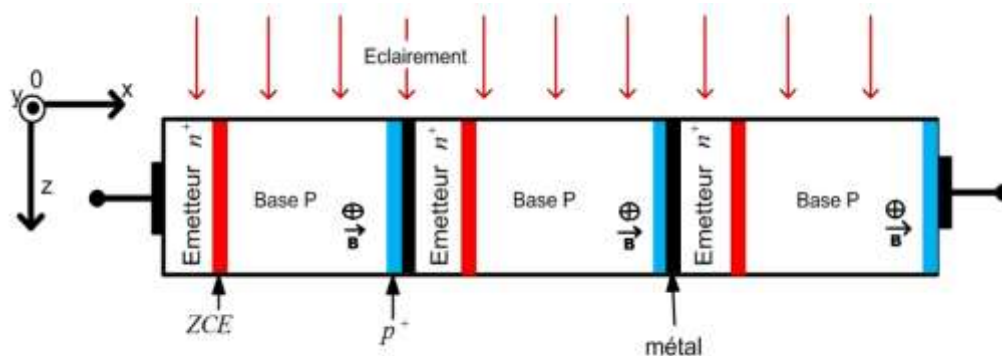


Figure 1:- Schéma d'une photopile à jonction verticale série sous éclairage monochromatique et sous champ magnétique.

La figure 2 représente le schéma d'une unité de la photopile à jonctions verticales séries sous éclairage monochromatique et sous champ magnétique.

Eclairage monochromatique

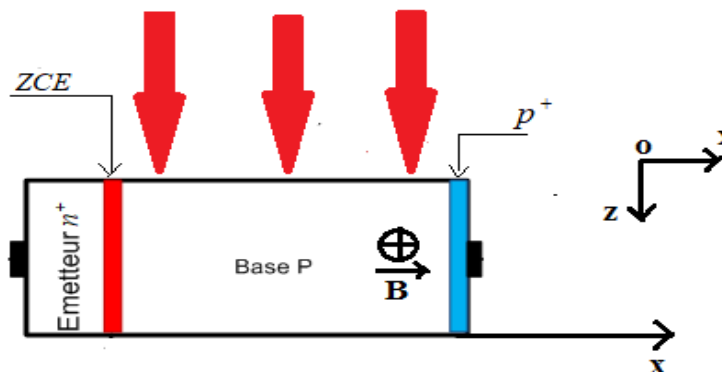


Figure 2:- Une unité de la photopile à jonction verticale série sous éclairage monochromatique sous champ magnétique.

Cette unité de la photopile à jonctions verticales séries est composée principalement de :

L'émetteur de type n^+ :

L'épaisseur est faible (0.5 à 1 μ m), elle est fortement dopée en atomes donneurs (10^{17} à 10^{19} atomes par cm^3) et recouverte d'un contact métallique qui permet de collecter les charges électriques photocréées.

La base de type p :

Cette partie est relativement peu dopée (10^{15} à 10^{17} atomes par cm^3) en atomes accepteurs. Son épaisseur est beaucoup plus importante que celle de l'émetteur. Etant de type p (dopée en atomes accepteurs). Cette partie de la structure présente un déficit d'électrons (porteurs minoritaires de charge dans la base).

La jonction émetteur-base (Zone de Charge d'Espace) :

Entre les deux zones des deux semiconducteur dopés différemment (émetteur de type n et la base de type p), il existe une jonction où règne un champ électrique très intense permettant la séparation des paires électron-trou photogénérés dans la base arrivant à cette jonction.

3) Equation de magnéto-transport de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base

L'équation de continuité de la densité des porteurs minoritaires de charge photogénérés dans la base de la photopile à jonction verticale série sous champ magnétique, sous éclairage monochromatique et en régime statique, s'écrit alors par la théorie de magnéto-transport et donne [26], [31], [32]:

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

La durée de vie est τ et est reliée à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires en excès dans la base par la relation d'Einstein: $L(B) = \sqrt{D(B) \cdot \tau}$ (2)

Avec le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires [31], [32], [33]: $D(B) = \frac{D_0}{1 + (\mu B)^2}$ (3)

Sous éclairage monochromatique, l'expression du taux de génération des porteurs de charge photogénérés, à une profondeur (z) dans la base de la photopile à jonction verticale série, est donné par l'expression [26], [42]: $G(z) = \alpha(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot z)$ (4)

Le coefficient d'absorption du matériau pour une radiation monochromatique est $\alpha(\lambda)$ (cm^{-1})

Le flux de photons incidents pour une radiation monochromatique est $\phi(\lambda)$ et le coefficient de réflexion monochromatique à la surface de la base est $R(\lambda)$. La profondeur de la base de la photopile est z (cm). La solution de cette équation peut se mettre sous la forme:

$$\delta(x)_1 = A(Sf, Sb, z, B, \lambda) \cdot \text{ch}\left(\frac{x}{L(B)}\right) + E(Sf, Sb, z, B, \lambda) \cdot \text{sh}\left(\frac{x}{L(B)}\right) \quad (5)$$

Les coefficients $A(Sf, Sb, z, B, \lambda)$ et $E(Sf, Sb, z, B, \lambda)$ sont calculées à partir des conditions aux limites.

4) Conditions aux limites:

A la jonction ($x=0$): $\left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{Sf \cdot \delta(x)}{D(B)} \Big|_{x=0}$ (6)

La vitesse de recombinaison Sf , des porteurs minoritaires à la jonction [13], [14], [21] caractérise le flux de porteurs à travers cette jonction. Lorsque Sf tend vers zéro, aucun porteur ne traverse la jonction: il y a stockage et blocage des porteurs et le courant débité par la photopile est nul; on est en circuit ouvert. Quand Sf prend de très grandes valeurs,

L'équation (6) montre que $\delta(0)$ tend vers 0: il n'y a pas de stockage, les porteurs de charge s'écoulent à travers la jonction, pour produire le photocourant de court-circuit.

A la face arrière ($x=H$): $\left. \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} \right|_{x=H} = - \frac{Sb \cdot \delta(x)}{D(B)} \Big|_{x=H}$ (7)

Où S_b est la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge en excès sur la face arrière de la photopile [14], [15], [16], [19], [43]. Elle caractérise la perte des porteurs au niveau de cette face arrière. L'existence du champ électrique arrière (BSF) permet, ainsi, de renvoyer les porteurs minoritaires photogénérés de la face arrière (jonction p/p^+) vers la jonction émetteur-base pour participer au photocourant.

5) Expression de la densité du photocourant

Les porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile ayant échappé aux phénomènes de recombinaison et de déviation due à la force de Lorentz, traversent la jonction émetteur-base pour participer au photocourant. Le photocourant émane donc de la diffusion de ces derniers à travers la jonction émetteur-base. La connaissance de l'expression de la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base, permet de déterminer la densité de photocourant en utilisant la loi de Fick. Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_{ph}(Sf, Sb, H, z, B, \lambda) = q \cdot D(B) \cdot \left. \frac{\partial \delta(Sf, Sb, z, x, B, \lambda)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (7)$$

Où q représente la charge électrique élémentaire d'un porteur minoritaires en excès dans la base de la photopile à jonction verticale série.

6)La phototension aux bornes de la photopile

L'expression de la tension qui existe aux bornes de la photopile, lorsque celle-ci est soumise à un éclairage monochromatique, est donnée par la relation de Boltzmann:

$$V_{ph}(Sf, Sb, H, z, B, \lambda) = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{\delta(0, Sf, Sb, z, B, \lambda)}{n_0} \right) \quad (8)$$

Avec $V_T = \frac{K.T}{q}$ (9) ; la tension thermique et $n_0 = \frac{ni^2}{Nb}$ (10)

n_0 est la concentration des porteurs minoritaires dans la base à l'équilibre thermodynamique ; ni est la concentration intrinsèque des électrons ; Nb le taux de dopage de la base en atomes d'impureté ; K est la constante de Boltzmann ; T est la température absolue et q la charge électrique.

7) Influence du champ magnétique sur la phototension aux bornes de la photopile

La figure 3 donne le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique, induisant des épaisseurs Hop de la base[29].

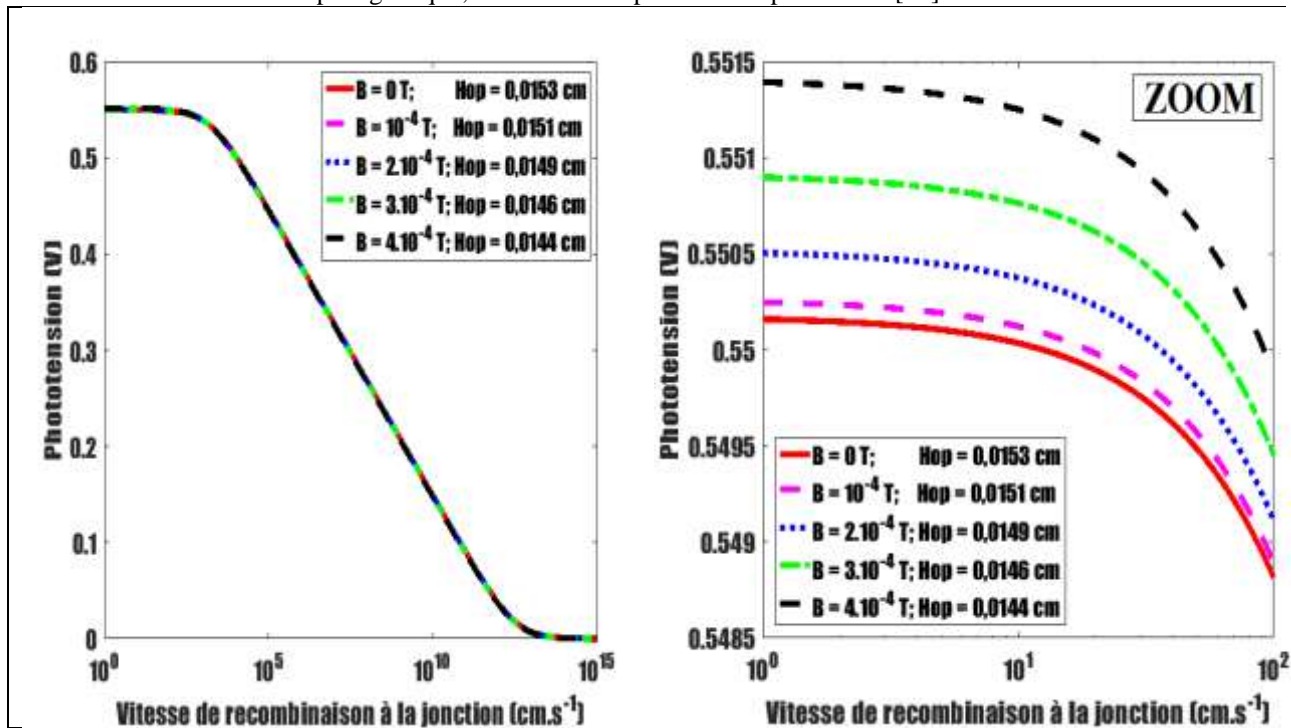


Figure 4:- Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ($\tau = 10^{-5}$ s; $\mu = 1350$ $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

Cette figure 4 montre que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la phototension est constante et maximale. La photopile est en situation de circuit-ouvert: les porteurs minoritaires sont bloqués au voisinage de la jonction. Ainsi, l'augmentation du champ magnétique augmente la densité des porteurs minoritaires de charge à la jonction et diminue ainsi le nombre de porteurs traversant la jonction par deflection. Alors phototension croît.

8)Effet du champ magnétique et de l'épaisseur optimale sur la caractéristique I-V

La figure 5 donne le profil de l'effet du champ magnétique et de l'épaisseur optimale sur la caractéristique I-V de la photopile à jonction verticale série. La figure 5 représente la variation de la densité de photocourant avec la phototension. Aux faibles valeurs de la phototension ($< 0,4$ V), la densité de photocourant est maximale et constante; elle correspond à la densité de photocourant de court-circuit. Puis, la densité de photocourant diminue

progressivement jusqu'à s'annuler lorsque la phototension atteint sa valeur maximale correspondant à la phototension de circuit ouvert.

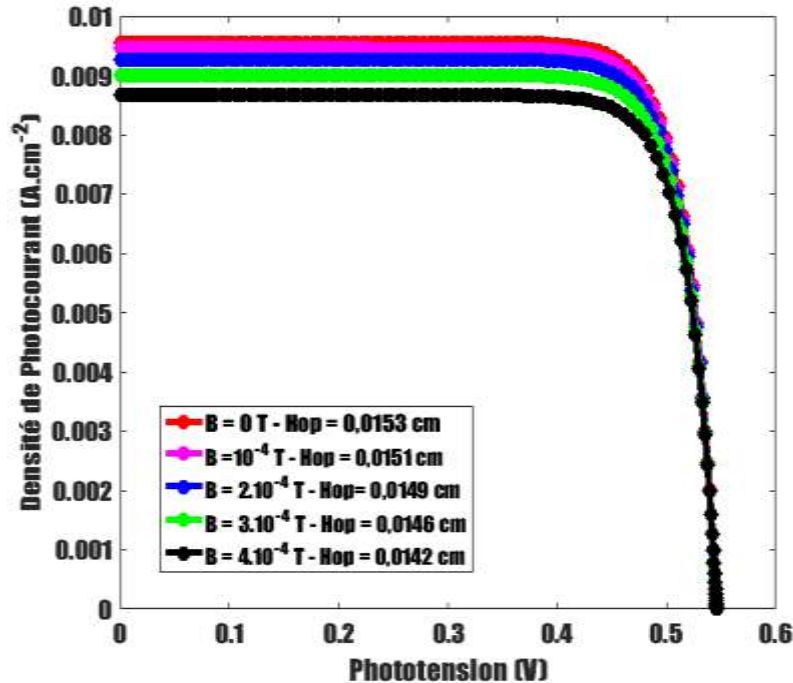


Figure 5:- Profil de la caractéristique I-V de la photopile pour différentes valeurs du champ magnétique ($\tau=10^{-5} \text{ s}$; $\mu=1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

La figure 5 représente la densité de photocourant en fonction de la phototension pour différentes valeurs du champ magnétique (B), induisant une épaisseur optimum (Hop). La densité de photocourant est maximale et constante aux faibles valeurs de la phototension et correspond à la densité de photocourant de court-circuit. Puis, elle diminue rapidement avant de s'annuler lorsque la phototension est maximale correspondant à la phototension de circuit ouvert.

En outre, lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, la densité de photocourant de court-circuit diminue et la phototension de circuit ouvert augmente légèrement.

Cette figure 5 permet d'établir le tableau de valeurs du courant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique.

Tableau 1:- Valeurs du courant de court-circuit et de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ magnétique.

B (10^{-4} T)	0	1	2	3	4
Hop (cm)	0,0153	0,0151	0,0149	0,0146	0,0142
Jphcc (mA.cm ⁻²)	9,559	9,451	9,274	9,007	8,667
Vco (V)	0,5455	0,5455	0,5456	0,5458	0,546

Ces valeurs obtenues confirment que : l'application du champ magnétique diminue le photocourant de court-circuit (Jphcc) et augmente la phototension de circuit ouvert (Vco) de la photopile à jonctions verticales séries. Ainsi, la photopile se comporte comme une résistance avec la présence du champ magnétique, c'est l'effet de la magnétorésistance.

9) Etude de la résistance série

C'est un paramètre électrique macroscopique important dans la caractérisation de la photopile à jonction verticale série. La résistance série d'une photopile dépend des effets conjugués de la résistivité du matériau semiconducteur,

des contacts métalliques constituant les électrodes permettant la collecte des porteurs minoritaires de charge dans la base. Elle est souvent très faible pour les photopiles de bonne qualité.

La résistance série R_s [1], [2], [4], [5], [8], [34] joue un rôle déterminant sur la qualité d'une photopile. Elle modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations) et est liée à la résistance des électrodes et du matériau. C'est un paramètre fondamental dépendant de la nature du substrat, de la température et de la technologie utilisée. Plus cette résistance série est petite, plus la photopile est performante.

10) Détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert (S_{fco})

Aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ($S_f < 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$), la phototension est maximale (figure 4). Les porteurs minoritaires de charge sont stockés à la jonction : on est en situation de circuit ouvert. La vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert est la valeur de la vitesse de recombinaison au-delà de laquelle la photopile n'est plus en situation de circuit ouvert.

En nous intéressant à cette partie du profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, la vitesse de recombinaison limitant le circuit ouvert (S_{fco}) est déterminée en résolvant [3], [4], [44]:

$$V_{ph}(S_f, S_b, z, B, \lambda) - V_{co}(S_b, z, B, \lambda) = 0 \quad (11)$$

Où V_{co} est la phototension de circuit ouvert et est déterminée à partir de l'équation :

$$V_{co} = \lim_{S_f \rightarrow S_{fco}} V_{ph}(S_f) \quad (12)$$

La connaissance de la phototension de circuit ouvert est nécessaire pour la détermination de certains paramètres phénoménologiques ou électriques de la photopile à jonctions verticales séries. C'est la tension aux bornes de la photopile lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle correspond à la tension maximale de la photopile. Après résolution de l'équation, l'expression de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert (S_{fco}) est donnée par l'équation :

$$S_{fco} = \frac{D(B)^2 \cdot \alpha \cdot \chi - \gamma}{\beta - L(B) \cdot \theta} \quad (13)$$

Les termes α , χ , γ , β et θ sont déterminés par la modélisation de la figure 5 qui représente la variation de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert en fonction du champ magnétique.

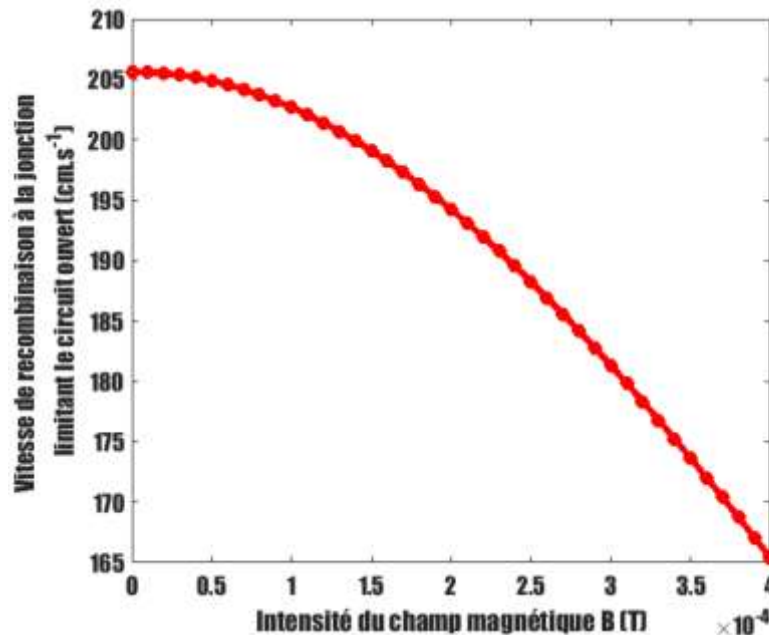


Figure 5:- Profil de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert en fonction du champ magnétique ($\tau=10^{-5} \text{ s}$; $\mu=1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

La figure 5 montre que la vitesse de recombinaison décroît avec l'intensité du champ magnétique, renforçant ainsi la situation de circuit ouvert (S_f faible). En effet, les porteurs de charge sont déviés vers les surfaces latérales par le champ magnétique. Et cela engendre leur blocage dans la base de la photopile.

a) Méthode de détermination de S_{fco}

La méthode de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert (S_{fco}) est donnée à la figure 7. Pour cela, on s'intéresse au maximum de la courbe (la fin du palier horizontal) qui correspond à un point limitant le circuit ouvert. La projection orthogonale de ce point sur l'axe des ordonnées donne la tension en circuit ouvert V_{co} et sa projection sur l'axe des abscisses donne la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert (S_{fco}) [3], [34], [45].

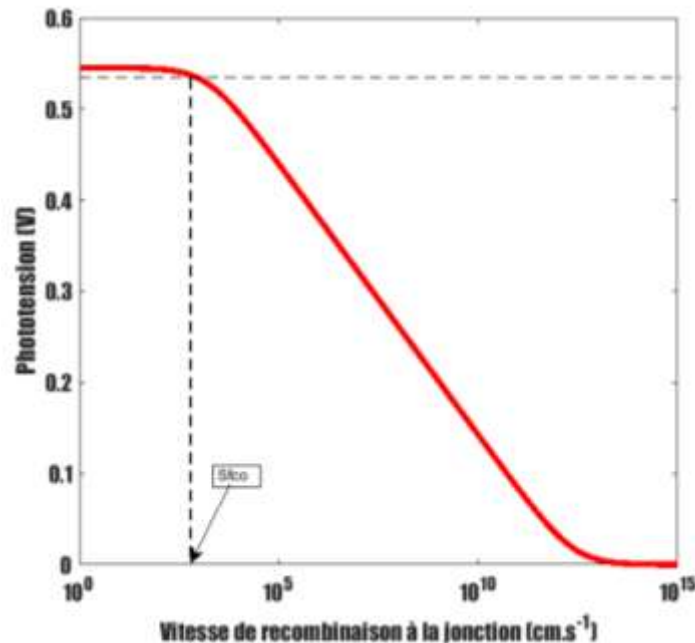


Figure 7:- Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction ($\tau = 10^{-5}$ s ; $\mu = 1350$ cm².V⁻¹.s⁻¹).

b) Effet du champ magnétique sur S_{fco}

Le tableau 2 donne les valeurs de la vitesse recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert en fonction de l'intensité du champ magnétique.

Tableau 2:- Valeurs de de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant circuit-ouvert (S_{fco}) et la phototension de circuit-ouvert (V_{co}) en fonction de l'intensité du champ magnétique.

S_{fco} (cm.s ⁻¹)	V_{co} (V)	B (10 ⁻⁴ T)
200	0,5425	0
150,9	0,5433	1
113,6	0,5440	2
85,2	0,5447	3
63,7	0,5454	4

Ce tableau 2 montre en effet que la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert diminue lorsque l'intensité du champ magnétique augmente.

10) Expression de la résistance série

Sur la caractéristique $I(S_f)$ - $V(S_f)$ sous éclairage de la photopile [5], [14], [44] à jonctions verticales séries sous champ magnétique, deux situations de fonctionnement caractéristiques sont distinguées. En situation de circuit-ouvert, la caractéristique est une droite oblique permettant la modélisation de la photopile comme une source de tension idéale. La situation de fonctionnement de la photopile en circuit ouvert est montrée à la figure 8.

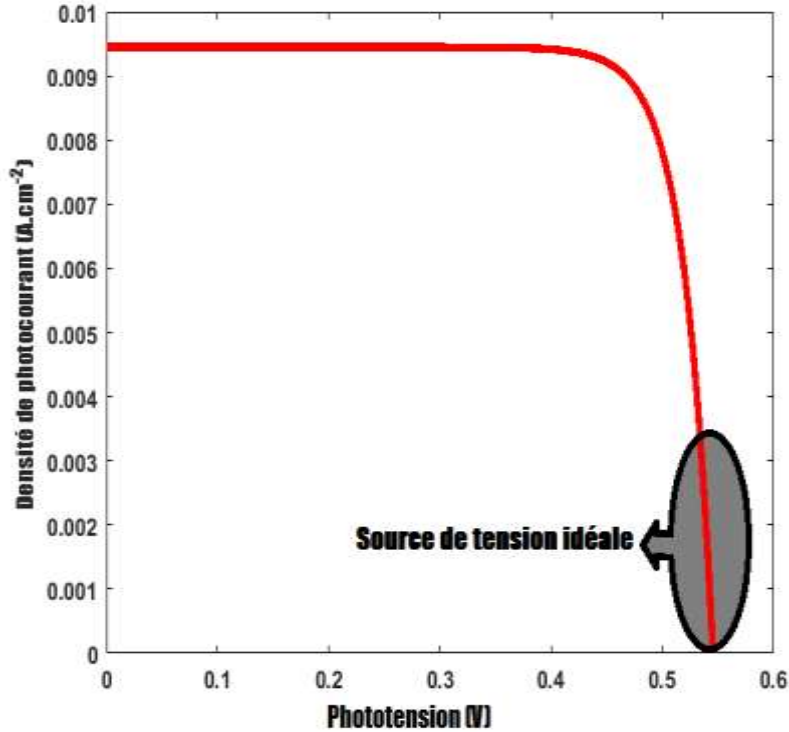


Figure 8:- Détermination de la résistance série à partir de la caractéristique I-V au voisinage du circuit ouvert ($\tau = 10^{-5}$ s; $\mu = 1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

La zone encadrée correspond à la partie de la caractéristique I-V qui est presque verticale et peu dépendante de la densité de photocourant. La photopile se présente comme une source de tension débitant une tension électrique constante quelle que soit la valeur du courant. Cette tension délivrée correspond à la phototension de circuit ouvert de la photopile à jonctions verticales séries sous champ magnétique. Puisqu'une photopile réelle n'est pas idéale, elle présentera donc des fuites de tension. Ces fuites de tension, faibles pour les photopiles de bonne qualité, se caractérisent par la présence, dans le circuit équivalent électrique, d'une résistance montée en série, appelée résistance série, avec la source de tension de force électromotrice égale à la phototension de circuit ouvert de la photopile. Ainsi, selon le théorème de Thévenin, la photopile peut être modélisée comme l'indique le schéma de la figure 9. Une photopile peut être représentée par son modèle électrique [2] à la figure suivant:

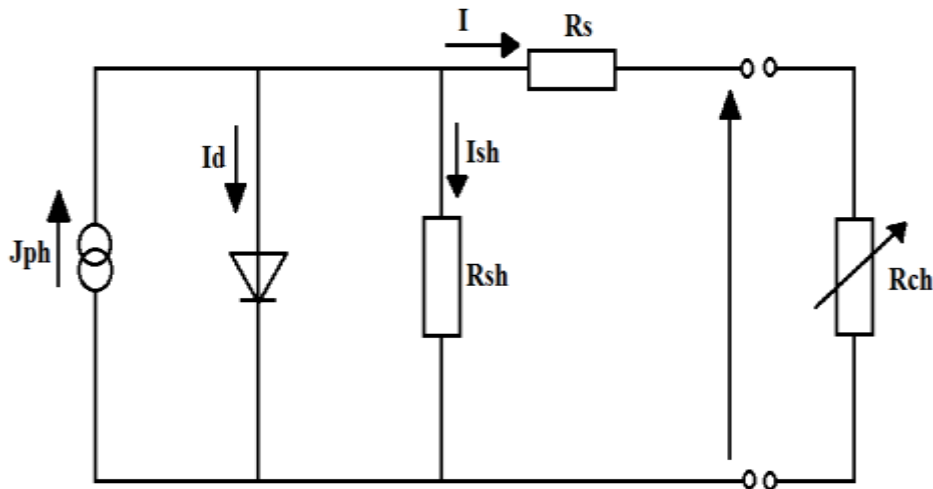


Figure 9:- Schéma du modèle électrique équivalent de la photopile sous éclairage.

En situation de circuit ouvert, la photopile est modélisée par le circuit de la figure 10 suivante :

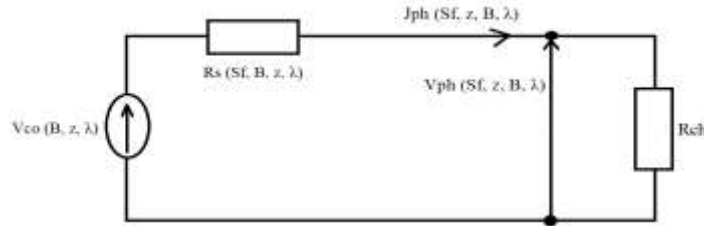


Figure 10:- Schéma électrique équivalent de la photopile comme un réel générateur de tension.

En appliquant la loi des mailles au circuit de la figure 10, l’expression de la résistance série de la photopile à jonctions verticales séries sous champ magnétique est déduite:

$$Rs(Sf, B, \lambda) = \frac{Vco(B, \lambda) - Vph(Sf, B, \lambda)}{Jph(Sf, B, \lambda)} \quad (13)$$

Ainsi, la résistance série dépend de Vco, Vph et Jph lorsque la photopile est en mode circuit ouvert, c'est-à-dire $Sf < 10^2 \text{ cm.s}^{-1}$ [1], [44], [45].

11) Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique

La figure 10 représente la variation de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de l’intensité de champ magnétique.

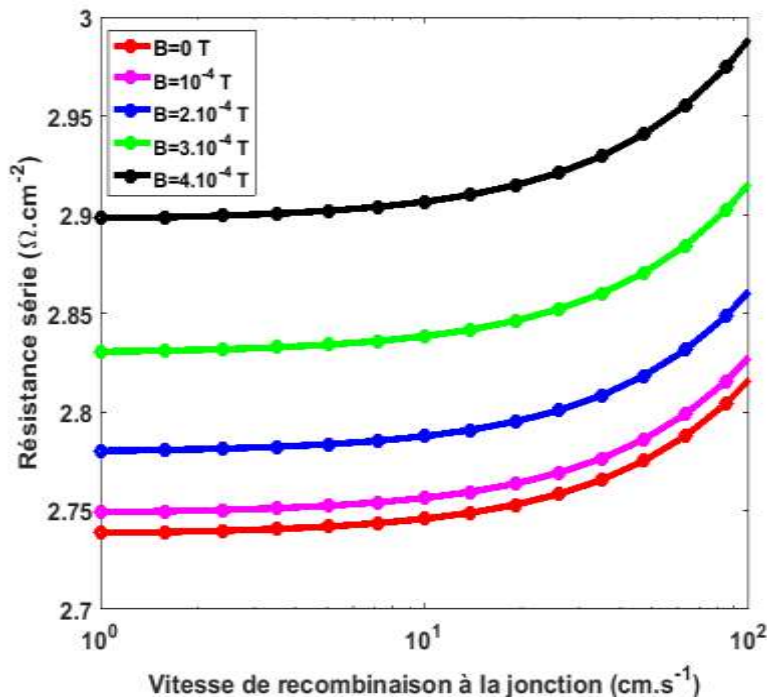


Figure 10:- Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ magnétique ($\tau = 10^{-5} \text{ s}$; $\mu = 1350 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$).

La figure 10 a montré qu’en situation de circuit ouvert, la résistance série augmente progressivement avec la vitesse de recombinaison à la jonction. Ceci est lié à l’écoulement des porteurs minoritaires de charge à la jonction quand Sf augmente; ce qui provoque une diminution de la conductivité dynamique et par conséquent l’augmentation de la résistivité.

Une augmentation de la résistance série avec l’intensité du champ magnétique est constatée. Cet effet appelé magnétorésistance, est dû à la réduction du coefficient de diffusion $D(B)$ entraînant, ainsi, une baisse de la

conductance. Ce qui entraîne une baisse de la quantité de courant délivré par la photopile [31], [32], [33]. Le champ magnétique augmente donc la résistivité du matériau semiconducteur.

12) Technique de détermination de la résistance série expérimentale

Cette technique consiste à considérer une valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction au voisinage du circuit ouvert (Sfco). Cette valeur de Sfco est projetée sur la courbe de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Le point d'intersection, avec cette dernière, est projeté sur l'axe portant les valeurs de la résistance série. Ainsi, la valeur de la résistance série expérimentale (Rsexp) de la photopile à jonctions verticales séries sous champ magnétique est obtenue [3], [4], [34].

La figure 11 montre la technique de la détermination de la résistance série expérimentale de la photopile à jonctions verticales séries.

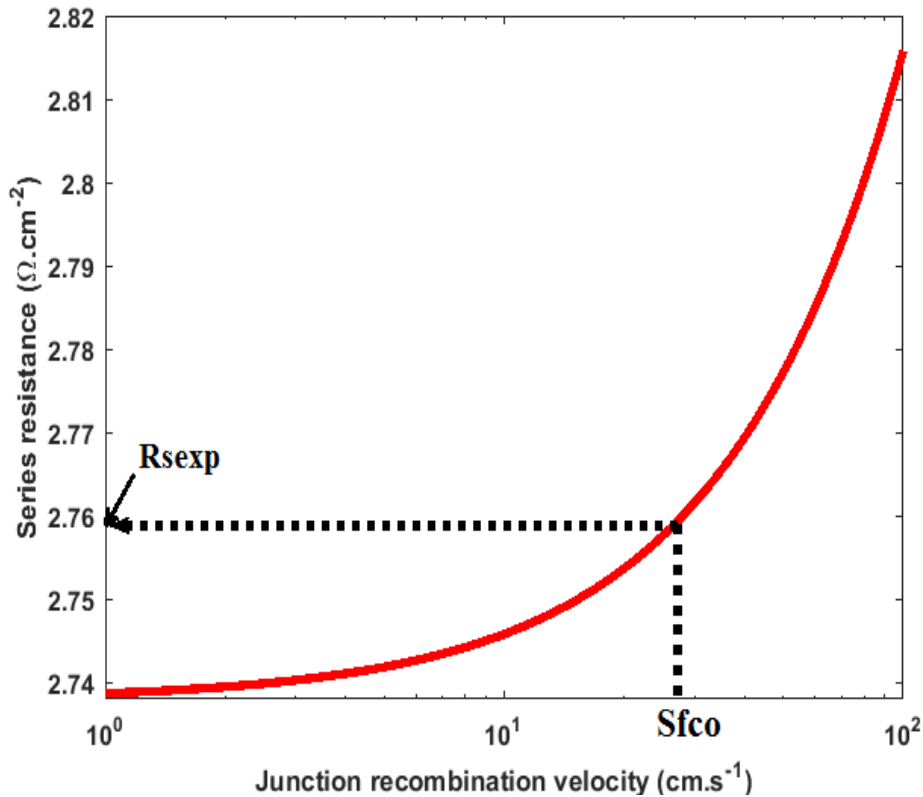


Figure 11:- La technique de détermination de la résistance série expérimentale.

Les valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert (Sfco) de la photopile et de la résistance série expérimentale sont obtenues en fonction du champ magnétique appliqué.

Tableau 3:- Résistance série expérimentale pour différentes valeurs du champ magnétique.

B (10 ⁻⁴ T)	Sfoc (cm.s ⁻¹)	Rsexp (Ω.cm ⁻²)	Vco (V)
0	200	2,760	0,5425
1	150,9	2,770	0,5433
2	113,6	2,802	0,5440
3	85,2	2,853	0,5447
4	63,7	2,923	0,5454

Ce tableau a permis de tracer la figure 12 représentant la variation de la résistance série expérimentale avec l'intensité du champ magnétique.

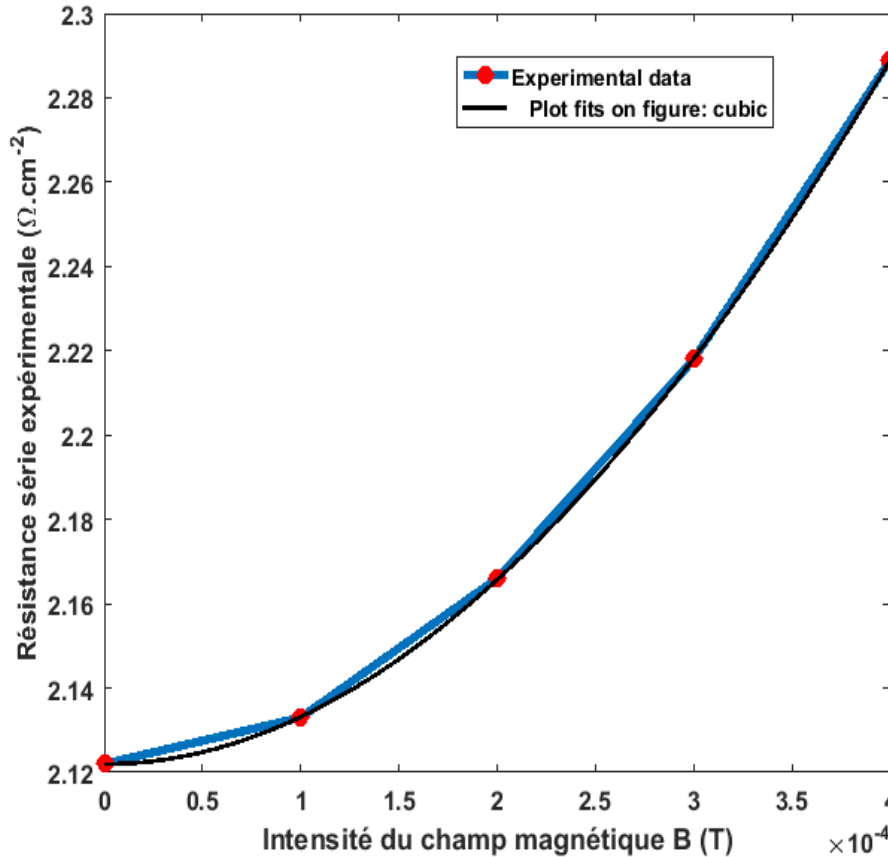


Figure 12:- Profil de la résistance série expérimentale en fonction du champ magnétique.

Cette figure 12 montre que la résistance série expérimentale augmente avec le champ magnétique. Tout comme la résistivité du matériau semiconducteur.

Cette figure 12 a permis d'établir une corrélation mathématique entre la résistance série expérimentale et le champ magnétique par l'expression.

$$R_{s \text{ exp}} (\Omega \cdot \text{cm}^{-2}) = \psi \cdot B^3 + \theta \cdot B^2 + \gamma \cdot B(T) + \chi \quad (14)$$

Avec $\psi = 2,5 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot T^{-3}$; $\theta = 1,1 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot T^{-2}$; $\gamma = 0,36 \Omega \cdot \text{cm}^{-2} \cdot T^{-1}$; $\chi = 2,1 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$

Cette technique produit des résultats intéressants pour le contrôle de qualité de la photopile [46] au silicium, en tenant compte des paramètres phénoménologiques et de l'environnement extérieur de champ magnétique.

Conclusion:-

Dans ce travail, une étude théorique d'une photopile au silicium à jonctions verticales séries en régime statique, sous éclairage monochromatique et sous champ magnétique est présentée. Une étude théorique sur la densité des porteurs minoritaires des porteurs de charge en excès dans la base de la photopile à jonctions verticales séries est effectuée, à partir de la résolution de l'équation de magneto transport, munie des conditions aux limites, impliquant les vitesses surfaciques de recombinaison à la jonction et en face arrière

A partir des expressions du photocourant et de la phototension, la caractéristique courant-tension (I-V) de la photopile sous champ magnétique et sous éclairage est obtenue. De la situation de circuit ouvert de la photopile, la résistance série dans le circuit électrique équivalent est obtenue, par sa courbe de calibration en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, à l'ordonnée de l'abscisse correspondant à la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert, pour chaque valeur du champ magnétique. L'expression de la modélisation mathématique de la résistance série est ainsi établie en fonction du champ magnétique appliquée, à partir des paramètres phénoménologiques.

References:-

- [1] 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.
- [2] 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/>)
- [3] I. LY, O.H. Lemrabott, B. Dieng, I. Gaye, S. Gueye, M.S. Diouf and G. Sissoko, 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 (2012) 187-206.
- [4] Marcel Sitor Diouf, Gohan Sahin, Amary Thiam, Khady Faye, Moussa Ibrahim Ngom, Doudou Gaye, Grégoire Sissoko (2015). Determination of the junction surface recombination velocity limiting the open circuit (sfc) for a bifacial. *IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 9, September 2015, ISSN 2348 – 7968.
- [5] S. Mbodji, I. Ly, H.L. Diallo, M.M. Dione, O. Diasse and G. Sissoko (2012). Modeling Study of N⁺/P Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (S_f) Research *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(1):1-7.
- [6] G. Sissoko, B. Dieng, A. Correa, M. Adj and D. Azilinin (1998). Silicon solar cell space charge region width determination by modeling study. *Proceeding of the World Renewable Energy Conference and Exhibition*, pp. 1852-1855.
- [7] H. Ly Diallo, B. Dieng, I. Ly, M.M. Dione, M. Ndiaye, O.H. Lemrabott, Z.N. Bako, A. Wereme And G. Sissoko (2012). Determinations of the Recombination and Electrical Parameters of a Vertical Multijunction Silicon Solar Cell. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(16): 2626-2631. ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization, 2012 <http://www.maxwell.org>
- [8] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Volume 91, Issue 18, 6 November 2007, Pages 1647-165. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
- [9] C. H. Wang and A. Neugroschel, (1991), Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. *IEEE transactions on electron devices*, vol.38, n° 9, Pp. 2169-2180.
- [10] T. W. Jung, F. A. Lindholm, and A. Neugroschel, (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*, Vol.31, N°5, pp.588-595.
- [11] 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)
- [12] 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.
- [13] G. Sissoko, S. Sivothythanam, M. Rodot and P. Mialhe, (1992), Constant Illumination-Induced Open Circuit Voltage Decay (CIOCVD) Method, as Applied to High Efficiency Si Solar Cells for Bulk and Back Surface Characterization. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Montreux, pp.352-354.
- [14] 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.
- [15] 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)
- [16] Rose, B.H. and Weaver, H.T. (1983) Determination of Effective Surface Recombination Velocity and Minority Carrier Lifetime in High-Efficiency Si Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 54, pp.238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>.
- [17] 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>

- [18] Lindholm, F.A., Liou, J.J., Neugroschel, A. and Jung, T.W. (1987) Determination of Lifetime and Surface Recombination Velocity of p-n Junction Solar Cells and Diodes by Observing Transients. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34, 277-283.
- [19] Fossum, J.G. (1977) Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2, pp.322-325. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18735>
- [20] Gupta, S., Ahmed, F. and Garg, S. (1988) A Method for the Determination of the Material Parameters D, L, S and τ 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)
- [21] Diallo, H.L., Seidou, A., Maiga, Wereme, A. 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, 203-211. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008085>
- [22] Noriaki Honna and Chusuke Munakata (1987). Sample thickness dependence of minority carrier lifetimes measured using an ac photovoltaic method. *Japanese journal of applied physics*, Vol. 26, Pp. 2033-2036.
- [23] 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, 6293-6974. <https://doi.org/10.1063/1.363705>
- [24] E. Demesmaeker, J. Symons, J. Nijs, R. Mertens (1991). The Influence Of Surface Recombination On The Limiting Efficiency And Optimum Thickness Of Silicon Solar Cells. 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference Lisbon, Portugal-Pp.66-67
- [25] Wise, J.F. (1970) Vertical Junction Hardened Solar Cell. US Patent 3, 690-953.
- [26] A. Gover and P. Stella, (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>
- [27] Terheiden, B., Hahn, G., Fath, P. and Bucher, E. (2000). The Lamella Silicon Solar Cell. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, pp.1377-1380.
- [28] Ayvazian, G.E., Kirakosyan, G.H. and Minasyan, G.A. (2004) Characteristics of Solar Cells with Vertical p-n Junction. *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 7-11 June 2004*, 117-119.
- [29] Gora Diop, Hamet Yoro Ba, Ndeye Thiam, Youssou Traore, Babou Dione, Mamour Amadou Ba, Pape Diop, Masse Samba Diop, Oulimata Mballo and Gregoire Sissoko. 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, décembre 2019.
- [30] Dibor Faye, Sega Gueye, Mor Ndiaye, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Masse Samba Diop, Gora Diop, Amadou Diao, Gregoire Sissoko (2020). Lamella silicon solar cell under both temperature and magnetic field: width optimum determination. <https://www.scirp.org/journal/jemaa>
- [31] Y. Betser, 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 », *Applied Physics Letters* 67, 1883-1884, <http://dx.doi.org/10.1063/1.114364>.
- [32] R. R. Vardanyan, U. Kerst, P. Wawer, M. E. Nell, H. G. Wagemann, (Vienna 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, pp. 191-193.
- [33] 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>
- [34] Marcel Sitor Diouf, Gohan Sahin, Amary Thiam, Moussa Bra Ngom, Khady Faye, Doudou Gaye, Grégoire Sissoko (September 2015). Determination of the junction surface recombination velocity limiting the open circuit (sfoc) for a bifacial silicon solar cell under external electric field. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 9, p 931-938, <http://www.ijiset.com>
- [35] 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 Determine 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>
- [36] Sidi Dede, M., Lamine Ba, M., Amadou Ba, M., Ndiaye, M., Gueye, S., Sow, E., et al. (2020). 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*, 12, 445-458. <http://www.scirp.org/journal/epe> <https://doi.org/10.4236/epe.2020.127027>

- [37] CheikhThiaw, MamadouLamine Ba, MamourAmadou Ba, Gora Diop, IbrahimaDiatta, MorNdiaye, GregoireSissoko (2020). $n^+ - p - p^+$ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. Journal of Electromagnetic Analysis and Application. <https://www.scirp.org/journal/jemaa>
- [38] Francois Michel Ndiaye, MamadouLamine Ba, MamourAmadou Ba, Gora Diop, IbrahimaDiatta, El Hadji Sow, OulimataMballo and GregoireSissoko (2020). Lamella silicon optimum width determination under temperature. International journal of advanced research (IJAR). <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/xxx>
- [39] 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. International journal of advanced research (IJAR). <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10967>
- [40] A. S. Gning, M. L. Ba, M. A. Ba, G. Diop, I. Diatta, E. H. Sow, O. Mballo and G. Sissoko, (2020), Optimum base thickness determination of a back illumination silicon solar cell : Irradiation effect. », International Journal of Advanced Research (IJAR) 8(07), 100-109, <https://www.journalijar.com>.
- [41] 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 eclairage monochromatique. International Journal of Advanced Research. 9(03), 127-135. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12565>
- [42] Daniel L. MEIER, member IEEE, Jeong-Mo HWANG, member IEEE and Robert B. CAMPBELL (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, Vol. ED-35, No. I, January 1988.
- [43] 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>
- [44] G. Sissoko, E. Nanéma, A. Corréa, P. M. Biteye, M. Adj, A. L. Ndiaye, Silicon Solar cell recombination parameters determination using the illuminated I-V characteristic. Renewable Energy, vol-3, pp.1848-51-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98.
- [45] Y. L. B. Bocande, A. Correa, I. Gaye, M. L. Sow and G. Sissoko (1994). Bulk and surfaces parameters determination in high efficiency Si solar cells. Renewable Energy, vol 5, part III, pp. 1698-1700, Pergamon, 0960-1481 / 94\$ 700 +0.00.
- [46] 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>.