



Journal Homepage: - www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/17127

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/17127>



RESEARCH ARTICLE

DETERMINATION DE LA RESISTANCE SHUNT D'UNE PHOTOPILE IRRADIEE ($N^+/P/P^+$) AU SILICIUM PLACEE SOUS CHAMP MAGNETIQUE ET SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN MODULATION DE FREQUENCE

Mor SARR¹, Mohamed Lemine CHEIKH¹, Sega GUEYE¹, M.Yacine BA¹, Khady LOUM^{1,2}, Malick NDIAYE¹, A. Mamour BA¹, Ousmane SOW^{1,2}, Senghane MBODJI^{1,3} and Gregoire SISSOKO¹

1. Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER). BP. 15003, Dakar, Sénégal.
2. Institut Universitaire de Technologie. Université Iba Der THIAM de Thiès-Senegal.
3. Université Alioune DIOP, Bambey, Senegal.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 20 April 2023

Final Accepted: 24 May 2023

Published: June 2023

Key words:-

Photopile au Silicium, Irradiation, Champ Magnétique, Fréquence, Vitesse De Recombinaison, Resistance Shunt

Abstract

L'objet de cette étude est de présenter une application de la technique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit d'une photopile monofaciale au silicium, sous éclairage polychromatique, sous irradiation et sous champ magnétique, en régime dynamique fréquentiel. Après la résolution de l'équation de magnéto-diffusion des porteurs minoritaires de charges en régime dynamique, les expressions de la densité des porteurs minoritaires de charge et de la densité de photocourant ont été établies. La densité des porteurs minoritaires de charge est étudiée en fonction de la profondeur dans la base de la photopile pour différentes valeurs de la fréquence de modulation. La densité de photocourant est étudiée en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes fréquences de modulation. A partir du profil de variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction, une technique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit est présentée. Les influences de la fréquence de modulation, de l'irradiation et du champ magnétique sur la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, sur le photocourant de court-circuit et sur la résistance shunt ont été également étudiées.

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

Introduction:-

Dans ce présent article, il s'agit d'étendre la technique de détermination de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction (S_{fcc}), initiant la situation de court-circuit [1-5], au cas d'une photopile monofaciale au silicium monocristallin [6-9], préalablement irradiée par des particules électriques chargées [10-17] et placée dans un champ magnétique [18-23], sous éclairage polychromatique [24-28], en modulation de fréquence [29-33]. A l'aide de la courbe de calibration de la résistance shunt (R_{sh}) exprimée en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f), la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires de charge à la jonction (S_{fcc}), initiant la situation de court-circuit, permet d'obtenir la valeur exacte de la résistance shunt (R_{sh}).

Corresponding Author:- Gregoire SISSOKO

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

Pour ce faire, l'équation de continuité relative à la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile monofaciale préalablement irradiée ($kl, \phi p$), sous champ magnétique (B) et sous éclairage polychromatique en modulation de fréquence (ω) est résolue, à l'aide des conditions aux limites, que sont les vitesses de recombinaison (S_f) à la jonction et (S_b) en face arrière. Elle permet ensuite de déduire l'expression de la densité de photocourant à partir de laquelle le concept de vitesse de recombinaison initiant le photocourant de court-circuit est appliqué.

Théorie

Généralités

La figure 1 ci-dessous présente le schéma de la photopile monofaciale au silicium à étudier, avec ses différentes régions, dans le modèle à une dimension [6, 7]

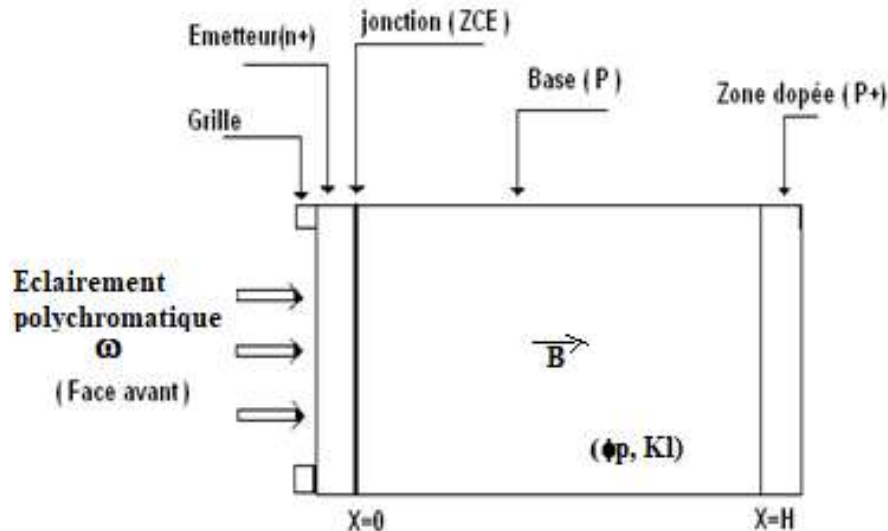


Fig. 1:- Photopile monofaciale irradiée ($kl, \phi p$) sous champ magnétique (B) et sous éclairage polychromatique en modulation de fréquence (ω).

Densité des porteurs minoritaires de charges en excès en fonction de l'épaisseur dans la base de la photopile

Dans ces conditions, l'équation de continuité en régime dynamique relative à la densité des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base de la photopile, pour le modèle à une dimension est donnée par la relation suivante :

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

$\delta(x,t)$ est la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dépendant de x , de la fréquence de modulation (ω) et du temps (t).

$$\delta(x,t) = \delta(x) \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot t) \quad (2)$$

Où $\delta(x)$ est la densité des porteurs minoritaires de charges en excès dépendant de la profondeur (x) dans la base.

$G(x,t)$ est le taux de génération global des porteurs minoritaires de charge en excès à la profondeur (x) dans la base de la photopile dépendant de (t) et de la fréquence de modulation (ω) de la lumière polychromatique incidente. Il est donné par la relation suivante :

$$G(x,t) = G(x) \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot t) \quad (3)$$

j est tel que $j^2 = -1$. $G(x)$ est le taux de génération des porteurs minoritaires de charge en excès à la profondeur (x) dans la base de la photopile. Il est exprimé par l'équation suivante [33] :

$$G(x) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot \exp(-b_i \cdot x) \quad (4)$$

Les quantités (a_i et b_i) sont des coefficients tabulés du rayonnement solaire, sous les conditions A.M1.5.

Le coefficient de diffusion et la longueur de diffusion [34-37] sont dépendantes des conditions d'irradiation, et d'application du champ magnétique et de la modulation de fréquence de la lumière incidente

L^* est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base, elle dépend du coefficient de dommage (kl), du flux d'irradiation (ϕp) et de (ω). Elle est donnée par

$$L^* = L(\omega, kl, \phi p) \quad \text{ou encore :} \quad L^* = L(kl, \phi p) \cdot \sqrt{\frac{1 - j \cdot \omega \cdot \tau}{1 + (\omega \cdot \tau)^2}} \quad (5)$$

τ désigne la durée de vie des porteurs minoritaires de charges en excès ($\tau = 10^{-5}$ s). Le coefficient et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges en excès dans la base de la photopile sous irradiation [11, 12, 15], sont donnés respectivement par :

$$D(kl, \phi p) = \frac{L(kl, \phi p)^2}{\tau} \quad (6)$$

et

$$L(kl, \phi p) = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{L_0^2} + kl \cdot \phi p}} \quad (7)$$

L_0 est la longueur de diffusion des porteurs minoritaires de charges en excès en absence d'irradiation. D_0 est le coefficient de diffusion d'une photopile monocristalline ($D_0 = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$) en absence d'irradiation, de modulation de fréquence et de champ magnétique. La relation d'Einstein s'écrit :

$$L_0 = \sqrt{D_0 \cdot \tau} \quad (8)$$

D^* est le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires de charge en excès dans la base préalablement irradiée, ($kl, \phi p$), placée sous champ magnétique (B), sous éclaircissement en modulation de fréquence (ω) et s'exprime [13, 15, 36, 37, 42, 46] par :

$$D^* = D(\omega, B, kl, \phi p) \quad (9)$$

$$D^* = D(kl, \phi p) \cdot \left[\frac{1 + \tau^2(\omega c(B)^2 + \omega^2) + j \cdot \omega \cdot \tau [\tau^2(\omega(B)^2 - \omega^2 - 1)]}{1 + \tau^2(\omega c(B)^2 - \omega^2) + 4 \cdot \omega^2 \cdot \tau^2} \right] \quad (10)$$

Où $\omega c(B)$ est la fréquence du cyclotron, dépendant du champ magnétique, m_n est la masse effective de l'électron supposé au repos et q est sa charge. Elle est donnée par :

$$\omega c(B) = \frac{q \cdot B}{m_n} \quad (11)$$

La solution de l'équation de diffusion (1) est présentée sous la forme suivante :

$$\delta(x, \omega, B, kl, \phi p) = A \cdot \cosh\left(\frac{x}{L^*}\right) + C \cdot \sinh\left(\frac{x}{L^*}\right) - \frac{L^{*2}}{D^*} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{b_i^2 \cdot L^{*2} - 1} e^{-b_i \cdot x} \quad (12)$$

Les coefficients A et C sont déterminés à partir des conditions aux limites à la jonction et à la face arrière sont donnés par les conditions aux limites:

a) A la jonction émetteur-base (pour $x = 0$) :

$$D^* \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, \omega, B, kl, \phi p)}{\partial x} \right|_{x=0} = S_f \cdot \delta(x, \omega, B, kl, \phi p) \Big|_{x=0} \quad (13)$$

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

$$D^* \cdot \left. \frac{\partial \delta(x, \omega, B, kl, \phi p)}{\partial x} \right|_{x=H} = -S_b \cdot \delta(x, \omega, B, kl, \phi p) \Big|_{x=H} \quad (14)$$

S_f et S_b sont respectivement les vitesses de recombinaison [38-45] des porteurs minoritaires de charge à la jonction et à la face arrière.

En introduisant respectivement les valeurs des coefficients A et C dans la relation (12), on obtient l'expression complète de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès.

Le profil de la densité des porteurs minoritaires de charges en excès en fonction de l'épaisseur dans la base pour différentes valeurs de la fréquence de modulation est représenté à la **figure 2**.

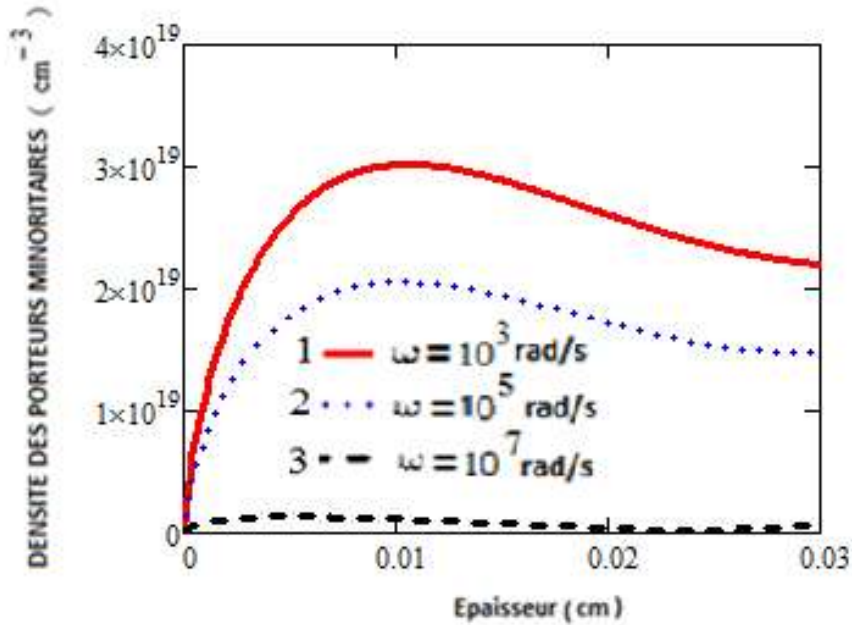


Fig 2:- Densité des porteurs minoritaires de charge en excès en fonction de l'épaisseur dans la base x pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction($kl = 15 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}$; $\phi_p = 100 \text{ MeV}$; $B = 10^{-5} \text{ T}$; 1. $S_b = 4.10^4 \text{ cm/s}$; 2. $S_b = 3.10^3 \text{ cm/s}$; 3. $S_b = 2.10^2 \text{ cm/s}$

La densité des porteurs minoritaires de charge en excès augmente jusqu'à atteindre un maximum près de la jonction et diminue jusqu'à atteindre un minimum dans la face arrière[39]. En effet, l'éclairement de la photopile par la face avant entraîne une forte génération de porteurs au voisinage de la jonction, et en profondeur, à cause des recombinaisons en surface arrière, la densité des porteurs diminue. Lorsque la fréquence de modulation augmente, la densité des porteurs minoritaires de charge diminue. Cette diminution est due au fait que lorsque la fréquence de modulation est élevée, le temps de relaxation des porteurs minoritaires de charge [52-56] est faible, d'où le nombre de porteurs qui traversent la jonction diminue.

Concept de vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit :

De l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charge en excès, celle de la densité de photocourant est déduite, et son profil en fonction de Sf pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ω est représenté. Latechnique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit et son domaine de validité [3, 13, 42] en est déduite.

L'expression de la densité de photocourant est donnée par la relation suivante :

$$J_{ph}(\omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb) = q \cdot D * \left. \frac{\partial \delta(x, \omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb)}{\partial x} \right|_{x=0} \tag{15}$$

A partir de la relation (15), le profil de la densité de photocourant Jph en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la fréquence de modulation ω , est représenté.

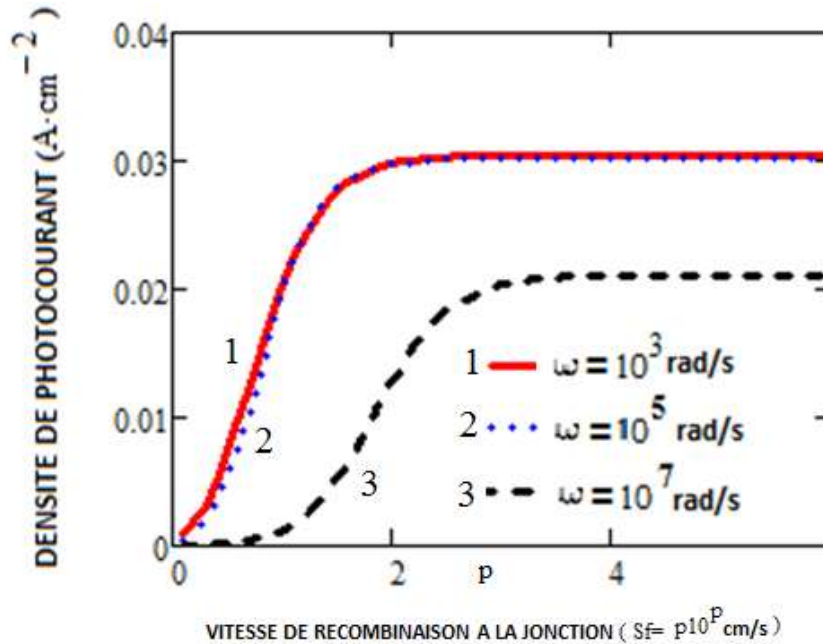


Fig 3:- Densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction S_f pour différentes valeurs de la fréquence de modulation: $kl = 15 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}$; $\phi_p = 100 \text{ MeV}$; $B = 10^{-5} \text{ T}$; 1. $S_b = 4 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$; 2. $S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s}$; 3. $S_b = 2 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$. Où p est un entier naturel.

Les courbes présentent toutes, deux parties. On note que, quelle que soit la valeur de la fréquence de modulation, la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction jusqu'à atteindre un maximum à partir duquel, elle reste constante. La valeur à partir de laquelle le photocourant est constant est appelée photocourant de court-circuit. On observe également que pour les mêmes raisons que précédemment, l'augmentation de la fréquence de modulation entraîne la diminution de la densité de photocourant.

Vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit S_{fcc} pour différentes valeurs de la fréquence de modulation :

Le court-circuit est une situation caractéristique du passage du maximum d'électrons photogénérés de l'émetteur à la base en traversant la jonction. Les profils de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction montrent que la situation de court-circuit est initiée à partir d'une valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction (S_{fcc}). Dans cette situation, aucun porteur minoritaire de charge n'est stocké à la jonction. D'où un élargissement de la zone de charge d'espace (ZCE) [46-51], qui caractérise une capacité très faible

L'expression générale du photocourant de court-circuit est donnée par la relation suivante :

$$J_{phcc}(\omega, B, kl, \phi_p, H, S_{fcc}, S_b) = \lim_{S_f \rightarrow S_{fcc}} J_{ph}(\omega, B, kl, \phi_p, H, S_f, S_b) \tag{16}$$

La figure 4 suivante présente la technique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit S_{fcc} [6, 13, 42] dans la photopile.

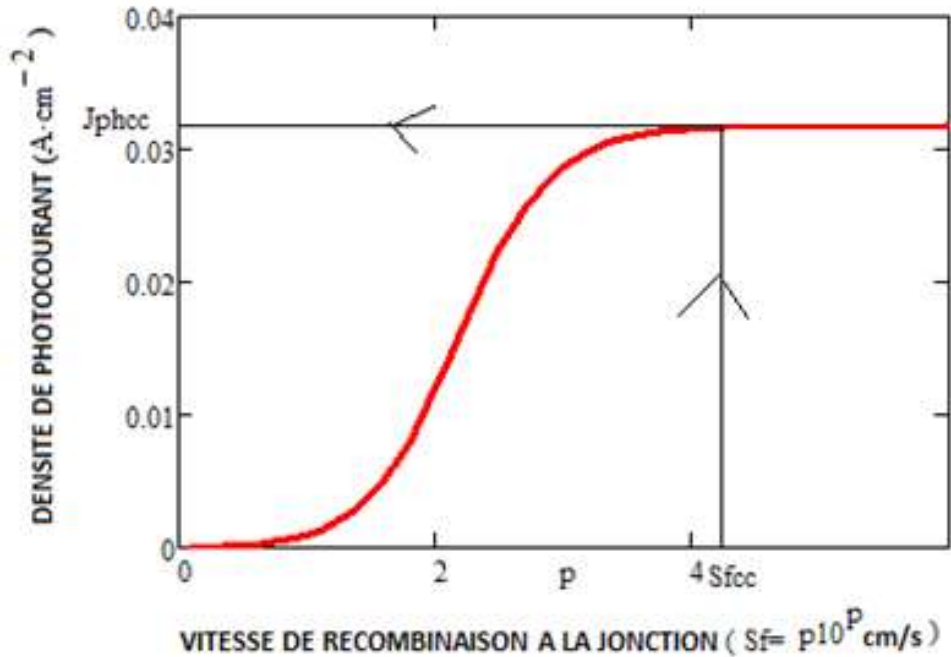


Fig 4:- Technique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit
 $S_{fcc} : \omega = 10^5 \text{ rad/s} ; k_l = 15 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1} ; \phi_p = 100 \text{ MeV} ; B = 10^{-5} \text{ T} ; L_o = 0.019 \text{ cm} ; S_b = 3 \cdot 10^3 \text{ cm/s}.$

Il s'agit de déterminer une vitesse de recombinaison particulière. C'est celle initiant la situation de court-circuit. 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, donne le courant de court-circuit J_{phcc} et sa projection sur l'axe des abscisses donne la vitesse de recombinaison à la jonction initiant le courant de court-circuit S_{fcc} qui dans cette étude, elle est égale à $4,3 \cdot 10^{4,3} \text{ cm/s}$.

Néanmoins, cette technique de détermination du photocourant de court-circuit a des limites. Particulièrement, pour des vitesses de recombinaison à la jonction inférieures à celle initiant la situation de court-circuit, cette technique n'est pas utilisable, car hors du domaine de validité. La situation de court-circuit ne peut être initiée qu'au moment où la totalité des porteurs photogénérés traversent la jonction pour participer au photocourant. Le domaine de validité de cette technique est donc défini lorsque la vitesse maximale de recombinaison à la jonction est supérieure ou égale à S_{fcc} . La détermination de S_{fcc} permet d'obtenir la valeur exacte de la résistance shunt en déterminant la valeur de J_{phcc} selon la technique présentée ci-dessus.

La résistance shunt [52-60] est déterminée à partir de la caractéristique courant-tension où le profil de la densité de photocourant est tracé en fonction de la phototension.

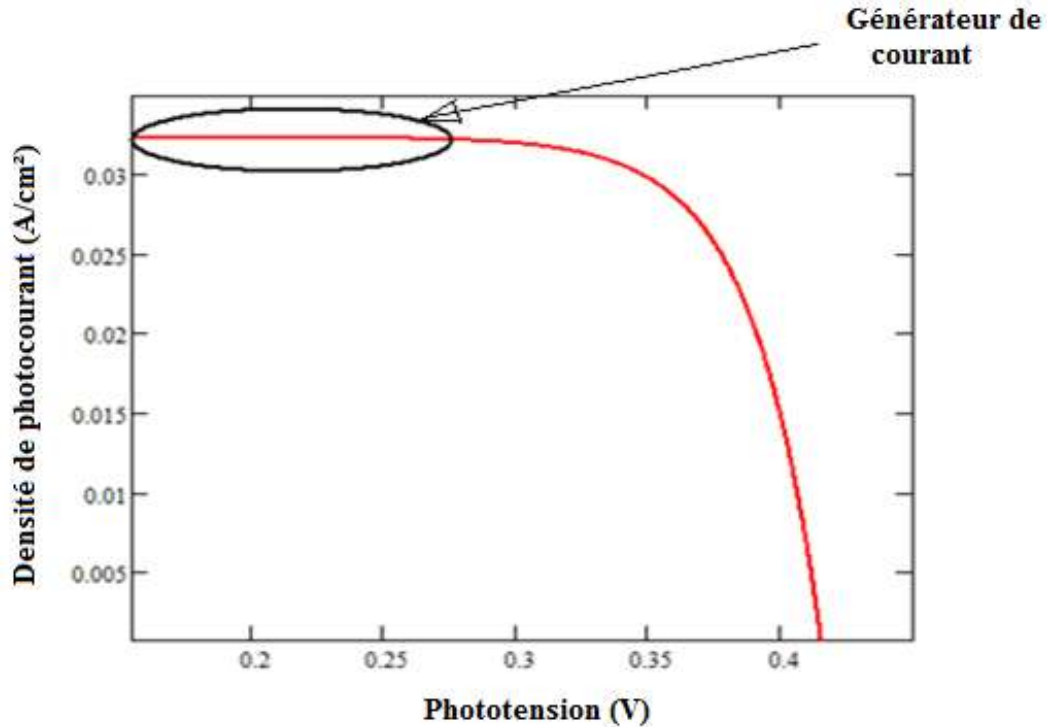


Fig 5:- Caractéristique I-V: $\omega = 10^5$ rad/s; $k_l = 15 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}$; $\phi_p = 100 \text{ MeV}$; $B = 10^{-5} \text{ T}$; $L_o = 0.019 \text{ cm}$; $S_b = 3.10^3 \text{ cm/s}$.

La partie de la courbe qui est presque horizontale est indépendante de la phototension. Les caractéristiques de la photopile dans ces conditions sont assimilables à celles d’une source de courant, qui débite une intensité de courant électrique constante quelle que soit la valeur de la tension. Puisqu’une photopile n’est pas idéale, elle présentera donc des fuites de courant (ce qui fait que la courbe n’est pas rigoureusement horizontale). Ce courant de fuite généralement faible pour les photopiles de bonne qualité, se caractérise par la présence d’une résistance dans la photopile qu’on appelle résistance de fuite ou résistance shunt.

La résistance shunt provient des recombinaisons des porteurs de charge en volume, en surface et aux interfaces d’une photopile. Elle modélise les courants parasites qui traversent la cellule et 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.

Pour déterminer la résistance shunt, on considère le fonctionnement de la photopile en situation de court-circuit où le photocourant est égal au courant de court-circuit. La photopile fonctionne en générateur de courant en parallèle avec la résistance shunt et le tout en série avec une résistance de charge R_{ch} .

A la figure 6, un circuit électrique équivalent qui correspond à ce mode de fonctionnement est représenté :

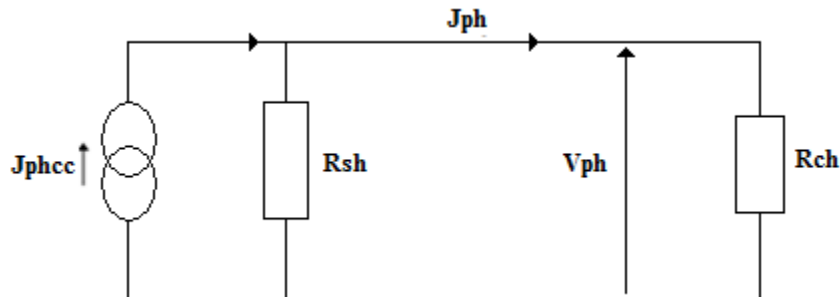


Fig 6:- Circuit électrique équivalent de la photopile sous éclairage en fonctionnement de court-circuit.

En appliquant la loi aux nœuds ou le théorème de Norton au circuit de la figure 6, on détermine l'expression de la résistance shunt[52, 56-60].

$$R_{sh} = \frac{V_{ph}(\omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb)}{J_{phcc} - J_{ph}(\omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb)} \tag{17}$$

Avec $V_{ph}(\omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb) = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{N_b}{n_0} \cdot \delta(x, \omega, B, kl, \phi_p, H, Sf, Sb) \Big|_{x=0} \right)$ (18)

Où V_{ph} est la phototension et V_T , la tension thermique :

$$V_T = \frac{Kb.T}{q} \tag{19}$$

Avec V_T est la tension thermique, Kb est la constante de Boltzmann ($Kb = 1,38.10^{-23}$), T est la tension thermique N_b est le taux de dopage dans la base, n_0 est la concentration intrinsèque du matériau.

Les **tableaux 1, 2, 3,** et **4** suivants présentent respectivement les effets de la fréquence de modulation, du coefficient de dommage, du flux d'irradiation et du champ magnétique sur la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, sur le photocourant de court-circuit et sur la résistance shunt.

Tableau 1:- Variations de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, du photocourant de court-circuit et de la résistance shunt en fonction de la fréquence de modulation.

| | | | |
|---|----------------|----------------|-----------|
| ω (rad/s) | 10^3 | 10^5 | 10^7 |
| kl (cm ⁻² .MeV ⁻¹) | 15 | 15 | 15 |
| ϕ_p (MeV) | 150 | 150 | 150 |
| B (T) | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} |
| S_{fcc} (cm/s) | $3,7.10^{3,7}$ | $3,5.10^{3,5}$ | 3.10^3 |
| J_{phcc} (A/cm ²) | 0,0302 | 0,0209 | 0,0206 |
| R_{sh} (Ω.cm ²) | $2,243.10^3$ | $1,379.10^3$ | 875,203 |
| S_b (cm/s) | 4.10^4 | 3.10^3 | 2.10^2 |

Le **tableau. 1** montre que l'augmentation de la fréquence de modulation entraîne la diminution de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, celle du photocourant de court-circuit et celle de la résistance shunt. Cela est dû à la modification du temps de relaxation des porteurs minoritaires, réduisant ainsi la distance parcourue dans la base [61-65].

Tableau 2:- Variations de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, du photocourant de court-circuit et de la résistance shunt en fonction du coefficient de dommage.

| | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|
| kl (cm ⁻² .MeV ⁻¹) | 10 | 15 | 20 |
| ω (rad/s) | 10^5 | 10^5 | 10^5 |
| ϕ_p (MeV) | 150 | 150 | 150 |
| B (T) | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} |
| S_{fcc} (cm/s) | $2,7.10^{2,7}$ | $2,5.10^{2,5}$ | $2,3.10^{2,3}$ |
| J_{phcc} (A/cm ²) | 0,0301 | 0,0209 | 0,0207 |
| R_{sh} (Ω.cm ²) | $3,051.10^3$ | $1,379.10^3$ | 775,072 |
| S_b (cm/s) | $2,5.10^{2,5}$ | 2.10^2 | $1,5.10^{1,5}$ |

Le **tableau.2** révèle que l'augmentation du coefficient de dommage entraîne la diminution de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, celle du photocourant de court-circuit et celle de la résistance shunt. Le coefficient de dommage modélise les dégradations causées par l'irradiation sur la photopile et modifie la distance à parcourir par les porteurs minoritaires dans la base [61-65].

Tableau. 3:- Variations de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, du photocourant de court-circuit et de la résistance shunt en fonction du flux d'irradiation.

| | | | |
|------------------|--------|--------|--------|
| ϕ_p (MeV) | 100 | 150 | 200 |
| ω (rad/s) | 10^5 | 10^5 | 10^5 |

| | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| $kl \text{ (cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}\text{)}$ | 15 | 15 | 15 |
| B (T) | 10^{-5} | 10^{-5} | 10^{-5} |
| Sfcc (cm/s) | $3,4 \cdot 10^{3,4}$ | $2,8 \cdot 10^{2,8}$ | $2,7 \cdot 10^{2,7}$ |
| Jphcc (A/cm ²) | 0,0302 | 0,0299 | 0,0297 |
| Rsh ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) | $3,237 \cdot 10^3$ | 136,525 | 57,529 |
| Sb (cm/s) | $3 \cdot 10^3$ | $2,3 \cdot 10^{2,3}$ | $1,7 \cdot 10^{1,7}$ |

Le **tableau.3** montre que le flux d'irradiation a les mêmes effets que le coefficient de dommage sur la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, sur le photocourant de court-circuit et sur la résistance shunt. En effet, l'irradiation diminue la mobilité des porteurs donc la performance de la photopile.

Tableau. 4:- Variations de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, du photocourant de court-circuit et de la résistance shunt en fonction du champ magnétique.

| | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| B (T) | 10^{-3} | 10^{-5} | 10^{-7} |
| ω (rad/s) | 10^5 | 10^5 | 10^5 |
| $kl \text{ (cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}\text{)}$ | 15 | 15 | 15 |
| ϕ_p (MeV) | 150 | 150 | 150 |
| Sfcc (cm/s) | $4,9 \cdot 10^{4,9}$ | $4,6 \cdot 10^{4,6}$ | $4,4 \cdot 10^{4,4}$ |
| Jphcc (A/cm ²) | 0,03 | 0,0298 | 0,0297 |
| Rsh ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) | $5,39 \cdot 10^5$ | 139,283 | 70,969 |
| Sb (cm/s) | $4 \cdot 10^4$ | $3,5 \cdot 10^{3,5}$ | $3 \cdot 10^3$ |

Le **tableau.4** montre que l'augmentation du champ magnétique entraîne la diminution de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, celle du photocourant de court-circuit et celle de la résistance shunt. Le champ magnétique dévie les porteurs de leurs trajectoires initiales diminuant ainsi leurs probabilités de traverser la jonction pour participer au photocourant.

Conclusion:-

Cette étude a permis de montrer la dépendance de la densité de photocourant à la fréquence de modulation. Quelle que soit la valeur de la fréquence, on note que la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction jusqu'à une valeur maximale à partir de laquelle elle devient constante. Ensuite, la situation de court-circuit correspondant à Sfcc où la densité de photocourant tend asymptotiquement vers une valeur constante qui est le photocourant de court-circuit Jphcc. Cette situation de court-circuit caractéristique d'une vitesse de recombinaison élevée transforme la photopile en un générateur de courant. Une technique de détermination de la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit et son domaine de validité ont également été mis en exergue dans cette étude. De même que les effets de la fréquence de modulation, de l'irradiation et du champ magnétique sur la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, sur le photocourant de court-circuit et sur la résistance shunt ont été étudiés. De cette étude on déduit que la fréquence de modulation, l'irradiation et le champ magnétique diminuent la vitesse de recombinaison à la jonction initiant la situation de court-circuit, le photocourant de court-circuit et la résistance shunt et par conséquent, la performance de la photopile.

References:-

- [1] Ly, I., Ndiaye, M., Wade, M., Thiam, N., Segal, Gueye. And Sissoko, G. (2013). Concept of Recombination Velocity Sfcc at the Junction of a Bifacial Silicon Solar Cell, in Steady State, Initiating the Short-Circuit Condition. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5, 203-208. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5105>
- [2] Sylla, B. , Ly, I. , Sow, O. , Dione, B. , Traore, Y. and Sissoko, G. (2018) Junction Surface Recombination Concept as Applied to Silicon Solar Cell Maximum Power Point Determination Using Matlab/Simulink: Effect of Temperature. Journal of Modern Physics, 9, 172-188. doi: 10.4236/jmp.2018.92011
- [3] I.Ly , O.H. Lemrabott , B. Dieng , I. Gaye , S. Gueye , M.S. Diouf And G. Sissoko(2012). Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairage multi spectral constant en régime statique. Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 (2012) 187 – 206 (<http://www.cder.dz>)
- [4] Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Ibrahima Diatta, Youssou Traore, Mor Ndiaye, Grégoire Sissoko (2016). The Temperature Effect on the Recombination Velocity at the junction initiating the Short-

- Circuit Condition (SFCC) of a Silicon Solar Cell under External Electric Field. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(6):410-420 <https://jsaer.com/archive/volume-3-issue-6-2016/>
- [5] Ly, I., Zerbo, I., Wade, M., Ndiaye, M., Dieng, A., Diao, A., Thiam, N., Thiam, A., Dione, M.M., Barro, F.I., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011). Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Monochromatic Illumination: Recombination Velocities and Associated Equivalent Electrical Circuits. *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5-9 September 2011*, 298-301.
- [6] Le Quang Nam, M. Rodot, M. Ghannam, J. Cppye, P. de Schepper, J. Nijs, (1992) Solar Cells with 15.6% efficiency on multicrystalline silicone, using impurity gettering, back surface field and emitter passivation. *Int. J. Solar Energy*. Vol. 11, pp.273-279.
- [7] 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>
- [8] Wu, C.Y. (1980) The Open-Circuit Voltage of Back-Surface-Field (BSF) p-n Junction Solar Cells in Concentrated Sunlight. *Solid-State Electronics*, 23, 209-216. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(80\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(80)90004-0)
- [9] 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>
- [10] Goo-Hwan Shin, Kwang-Sun Ryu, Hyung-Myung Kim, Kyung-Wook Min (2008). Radiation effect test for single crystalline and polycrystalline silicon solar cells. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 52, No. 3, pp. 843-847.
- [11] Rosenzweig, W. (1962) Diffusion Length Measurement by Mean of Ionization Radiation. *The Bell System Technical Journal*, 41, 1573-1588. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1962.tb03995.x>
- [12] 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, 238-247. <https://doi.org/10.1063/1.331693>
- [13] Ly, I., Wade, M., Ly Diallo, H., El Moujtaba, M.A.O., Lemtabott, O.H., Mbodji, S., Diasse, O., Ndiaye, A., Gaye, I., Barro, F.I., Wereme, A. and Sissoko, G. (2011) Irradiation Effect on the Electrical Parameters of a Bifacial Silicon Solar Cell under Multispectral Illumination. *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 785-788.
- [14] Ohshima, T., Sumita, T., Imaizumi, M., Kawakita, S., Shimazaki, K., Kuwajima, S., Ohi, A. and Itoh, H. (2005) Evaluation of the Electrical Characteristics of III-V Compounds Solar Cells Irradiated with Protons at Low Temperatures. *Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, FL, 3-7 January 2005*, 806.
- [15] Ould El Moujtaba, M.A., Ndiaye, M., Diao, A., Thiam, M., Barro, I.F. and Sissoko, G. (2012) Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell under Multispectral Illumination. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, 23, 5068-5073.
- [16] Fatemi, N.S., Sharps, P.R., Stan, M.A., Aiken, D.J., Clevenger, B. and Hou, H.Q. (2001) Radiation-Hard High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells for Commercial Space Applications. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2155-2158.
- [17] Martin, J.E. (2006) *Physics for Radiation Protection: A Handbook*. 2nd Edition, Wiley-VCH, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/9783527618798>
- [18] Betsler, 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>
- [19] 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..
- [20] 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.
- [21] Thiaw, C. , Ba, M. , Amadou Ba, M. , Diop, G. , Diatta, I. , Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2020) n⁺-p-p⁺ Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness Determination under Magnetic Field. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **12**, 103-113. doi: 10.4236/jemaa.2020.127009.
- [22] Diop, G., Ba, H.Y., Thiam, N., Traore, Y., Dione, B., Ba, M.A., Diop, P., Diop, M.S., Mballo, O. and Sissoko, G. (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*, 14, 4078-4085

- [23] Madougou, S., Made, F., Boukary, M.S. and Sissoko, G. (2007) I-V Characteristics for Bifacial Silicon Solar Cell Studied under a Magnetic Field. *Advanced Materials Research*, 18-19, 303-312. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.18-19.303>
- [24] 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)
- [25] 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://ljsacademicdirect.org/>).
- [26] Sissoko, G., Nanéma, E., Corr ea, 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.
- [27] M Chegaar, Z Ouennoughi, A Hoffmann (2001). A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-State Electronics* Vol. 45, issue 2, Pp. 293-296. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1101\(00\)00277-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1101(00)00277-x)
- [28] Babou Dione, Ousmane Sow, Mamadou Wade, L. Y. Ibrahima, Senghane Mbodji, Gregoire Sissoko (2016). Experimental Processus for Acquisition Automatic Features of I-V Properties and Temperature of the Solar Panel by Changing the Operating Point. *Circuits and Systems*, 7, 3984-4000 <http://www.scirp.org/journal/cs> ISSN Online: 2153-1293 ISSN Print: 2153-1285.
- [29] Cardona M (1970). Modulation Spectroscopy of semiconductors. *Advances in Solid State Physics*. Volume 10, Pp. 125-173. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-2427-8.50007-3>
- [30] Luc, B., Shahriar, M., Dean, H., Marco, S., Manuela, A. and Claudio, N. (1994) Investigation of Carrier Transport through Silicon Wafers by Photocurrent Measurement. *Journal of Applied Physics*, 75, 4000-4008. <https://doi.org/10.1063/1.356022>
- [31] Sudha, G., Feroz, A. and Suresh, G. (1988) A Method for the Determination of the Material Parameters, D , L_0 , S and α 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)
- [32] Chih Hsin Wang and Arnost Neugroschel (1991). Minority-carrier lifetime and surface recombination velocity measurement by frequency-domain photoluminescence. *IEEE transactions on electron devices*, vol.38, no. 9, pp2169-2180.
- [33] N.Honma and C. Munakata (1987). Sample Thickness Dependence of Minority Carrier Lifetimes Measured Using an ac Photovoltaic Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 26, 2033-2036. <https://doi.org/10.1143/JJAP.26.2033>
- [34] Diao, A., Thiam, N., Zoungrana, M., Sahin, G., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2014) Diffusion Coefficient in Silicon Solar Cell with Applied Magnetic Field and under Frequency: Electric Equivalent Circuits. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 4, 84-92. <https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013>
- [35] Dieng, A., Zerbo, I., Wade, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2011). Three-Dimensional Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell: The Influence of the Applied Magnetic Field on the Electrical Parameters. *Semiconductor Science and Technology*, 26, Article ID: 095023. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095023>
- [36] Richard Mane, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Ibrahima Datta, Marcel S. Douf, Youssou Traore, Mor Ndiaye, Seni Tamba, Grégoire Sissoko (2017). Minority Carrier Diffusion Coefficient $D^*(B, T)$: Study in Temperature on a Silicon Solar Cell under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 9, pp.1-10 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- [37] Seydina Diouf , Mor Ndiaye, Ndeye THIAM, Youssou Traore, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Marcel Sitor diouf, Oulimata Mballo, Amary Thiam and Grégoire Sissoko (2019). Influence of Temperature and Frequency on Minority Carrier Diffusion Coefficient in a Silicon Solar Cell Under Magnetic Field. *Energy and Power Engineering*, 11, 355-361 <http://www.scirp.org/journal/epe>
- [38] G.Sissoko, S. Sivothythanam, M. Rodot and P. Mialhe, 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, 12-16 October 1992, 352-354.
- [39] Sissoko, G., Museruka, C., Corr ea, 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.

- [40] Traore, Y. , Thiam, N. , Thiame, M. , Thiam, A. , Ba, M. , Diouf, M. , Diatta, I. , Mballo, O. , Sow, E. , Wade, M. and Sissoko, G. (2019). AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, **10**, 1235-1246. doi: 10.4236/jmp.2019.1010082
- [41] 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.
- [42] 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>
- [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] 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>
- [45] Fredrik A. Lindholm, Juin J. Liou, Arnost Neugroschel, 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
- [46] Mohamadou Samassa Ndoeye, Boureima Seibou, Ibrahima Ly, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Senghane Mbodji, Grégoire Sissoko(2016). Irradiation Effect on Silicon Solar Cell Capacitance in Frequency Modulation. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: Volume-6 Issue-3, pp. 2278-3075.
- [47] 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>
- [48] Massamba Dieng, Boureima Seibou, Ibrahima Ly, Marcel Sitor Diouf, Mamadou Wade, Grégoire Sissoko (2017). Silicon Solar Cell Emitter Extended Space Charge Region Determination under Modulated Monochromatic Illumination by using Gauss's Law. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* Vol. 6, issue 2, pp: 17-20.
- [49] Balde, F., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G (2018). External Electric Field as Applied to Determine Silicon Solar Cell Space Charge Region Width. *Journal of Scientific and Engineering Research*, **5**, 252- 259. <https://jsaer.com/>
- [50] G. Sissoko, B. Dieng, A. Corr ea, M.Adj, D. Azilnon (1998). Silicon Solar cell space charge region width determination by a study in modelling. *Renewable Energy*, vol-3, pp.1852-55-Elsevier Science Ltd, 0960-1481/98/#
- [51] Ibrahima Diatta, Ibrahima Ly, Mamadou Wade, Marcel Sitor Diouf, Senghane Mbodji, Grégoire Sissoko (2016). Temperature Effect on Capacitance of a Silicon Solar Cell under Constant White Biased Light. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2016, **6**, 261-268 www.scirp.org/journal/wjcmp
- [52] 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)
- [53] 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, D c. 2003, Pp. 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.06.011>
- [54] Ly Rjaset
- [55] Modji(2008)S. Mbodji, I. Ly, A. Dioum, H. Ly Diallo, I.F. Barro, G. Sissoko (2006). Equivalent electric circuit of a bifacial solar cell in transient state under magnetic field. *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition -Dresden, Germany*, pp.447-450.
- [56] F.I. Barro, S. Gaye, M. Deme, H.L. Diallo, M.L. Samb, A.M. Samoura, S.Mbodji, G. Sissoko (2008). Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the series and shunt resistances of a polycrystalline silicon solar cell. *Proceedings of the 23rd European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Valencia, Spain (sept 2008)*, p.612-615
- [57] M. M. Dione, H. Ly Diallo, M. Wade, I. Ly, M. Thiame, F. Toure, A. Gueye Camara, N. Dieme, Z. Nouhou Bako, S. Mbodji, F. I. Barro, G. Sissoko (2011). Determination of the shunt and series resistance of a vertical

- multijunction solar cell under constant multispectral light. Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 1CV.3.6 (2011), pp250-254; <http://www.eupvsec-proceedings.com> (40)
- [58] Grégoire Sissoko and Senghane Mbodji (2015). A method to determine the solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (sf). *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 6(2) (2011), pp.103-114-ISSN 2229 – 6107
- [59] F.K.DIA, O. Diasse, R. S. Sam, H. L. Diallo, B.DIENG, N. Thiam, S. Mbodji and G. Sissoko. 1D modeling study of series and shunt resistances of silicon solar cell in steady state operating condition and under polychromatic illumination. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*, 2012, 2250/3536: (pp. 18-23).
- [60] Sow, O. , Ba, M. , Ba, H. , El Moujtaba, M. , Traore, Y. , Diop, M. , Lemrabott, H. , Wade, M. and Sissoko, G. (2019) Shunt Resistance Determination in a Silicon Solar Cell: Effect of Flow Irradiation Energy and Base Thickness. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **11**, 203-216. doi: 10.4236/jemaa.2019.1112014.
- [61] Malick Ndiaye, Ousmane Sow, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Dibor Faye, KhadyLoum, YoussouTraore, Moustapha Thiame, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko (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^o 4, 266-280. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.12.4.26680>
- [62] Mamadou Sall, Mame Faty Mbaye Fall, Ousmane Diasse, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Oumar Dia, Khady Loum, Mamadou Wade And Gregoire Sissoko (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^o 4, 064-077. <https://doi.org/10.24214/jcbps.C.11.4.06477>
- [63] Ousmane SOW, Sega GUEYE, Richard MANE, Gora Diop, Ibrahima DIATTA, Khady LOUM, Moustapha THIAME, Mamadou WADE and Gregoire SISSOKO (2022) n⁺/p/p⁺ silicon solar cell base thickness under modulated short wavelength illumination, at resonances in both frequency and temperature of minority carriers' diffusion coefficient. *International Journal of Engineering Research Updates*, 03(02), 040-052. <https://doi.org/10.53430/ijeru.2022.3.2.0059>
- [64] Loum, K. , Sow, O. , Diop, G. , Mane, R. , Diatta, I. , Ndiaye, M. , Gueye, S. , Thiame, M. , Wade, M. and Sissoko, G. (2023) AC Back Surface Recombination Velocity as Applied to Optimize the Base Thickness under Temperature of an (n⁺-p-p⁺) Bifacial Silicon Solar Cell, Back Illuminated by a Light with Long Wavelength. *World Journal of Condensed Matter Physics*, **13**, 40-56. doi: 10.4236/wjcmp.2023.131003
- [65] Diop, G. , Sow, O. , Thiame, M. , Mane, R. , Diatta, I. , Loum, K. , Gueye, S. , Wade, M. and Sissoko, G. (2022) Diffusion Coefficient at Double Resonances in Frequency and Temperature, Applied to (n⁺/p/p⁺) Silicon Solar Cell Base Thickness Optimization under Long Wavelength Illumination. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, **14**, 89-103. doi: 10.4236/jemaa.2022.148008.
- [66] Amadou Sarr Gning, Mamadou Lamine Ba, Mamour Amadou Ba, Gora Diop, Ibrahima Diatta, El Hadji Sow, Oulimata Mballo and Gregoire Sissoko (2020). Optimum base thickness 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>
- [67] Omar Dia, Mohamed Abderrahim Ould El Moujtaba, Sega Gueye, Mamadou Lamine Ba, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Marcel Sitor Diouf and G. Sissoko (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*, 8(05), 616-626. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/10967>.