

Analytical Optimization of the Base Thickness of a Front-Illuminated ($n^+/p/p^+$) Bifacial Silicon Solar Cell under Combined Effects of Temperature, Frequency Modulation, Irradiation and Damage Coefficient.

Abstract: operate under combined thermal, radiation, and dynamic conditions. In this work, an original analytical approach based on the derivative of the back surface recombination velocity of minority carriers is proposed to determine the optimum base thickness of a front-illuminated bifacial silicon solar cell with an ($n^+/p/p^+$) structure under polychromatic light modulated in frequency. The developed model simultaneously accounts for the effects of temperature, modulation frequency, irradiation energy, and the damage coefficient on minority carrier transport. This approach establishes a relationship between the diffusion, generation, and recombination mechanisms and the evolution of the optimum base thickness under realistic operating conditions.

Key words:-Bifacial silicon solar cell , Optimum base thickness, Back surface recombination velocity derivative, Frequency modulation, Proton irradiation, Damage coefficient, Temperature, Minority carrier transport
OPTIMIZING THE BASE THICKNESS IS A KEY CHALLENGE FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF BIFACIAL SILICON SOLAR CELLS, PARTICULARLY WHEN THEY ARE DESIGNED TO

Introduction :-

Les cellules photovoltaïques au silicium occupent une place majeure dans la production d'énergie solaire grâce à leur stabilité, leur fiabilité et leur rendement élevé. Les progrès réalisés ces dernières décennies ont permis d'améliorer leurs performances en optimisant les propriétés des matériaux et la conception des dispositifs [1]. Parmi ces technologies, les photopiles bifaciales en silicium de structure ($n^+/p/p^+$) présentent un intérêt particulier en raison de leur capacité à convertir le rayonnement reçu sur leurs deux faces, ce qui améliore leur rendement énergétique [2–4]. L'épaisseur de la base constitue un paramètre essentiel influençant l'absorption des photons, la diffusion des porteurs minoritaires et les phénomènes de recombinaison. Une base trop mince réduit la génération des porteurs, tandis qu'une base trop épaisse accroît les pertes par recombinaison. Il existe donc une épaisseur optimale assurant le meilleur compromis entre génération et collecte des charges [5, 8, 11, 13, 16,29]. De même, la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière est largement utilisée pour caractériser les performances des cellules et optimiser leurs paramètres géométriques [7, 9, 10, 12, 14, 15, 37,78–41].

Les conditions de fonctionnement modifient fortement les propriétés électroniques des cellules photovoltaïques. La température agit sur la mobilité, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs [6, 22, 23,28], tandis que la fréquence de modulation influence leur transport dynamique et les mécanismes de recombinaison [10, 24, 25, 26,27]. Par ailleurs, l'irradiation protonique provoque la formation de défauts cristallins qui dégradent les performances des cellules en favorisant la recombinaison des porteurs [17–21, 30, 31, 32,33–35]. Malgré les nombreuses études consacrées à ces différents paramètres, leurs effets sont le plus souvent étudiés séparément. Les travaux intégrant simultanément la température, la fréquence de modulation, l'irradiation protonique et le coefficient de dommage pour déterminer l'épaisseur optimale de la base restent encore limités [16, 29]. De plus, l'utilisation de la dérivée de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière comme critère analytique d'optimisation demeure peu explorée, bien qu'elle permette une description plus rigoureuse des phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison [38,40]. Cette étude propose ainsi un modèle analytique permettant de déterminer l'épaisseur optimale de la base d'une photopile bifaciale au silicium de structure ($n^+/p/p^+$), éclairée par une lumière polychromatique modulée en fréquence, en tenant compte simultanément des effets de la température, de la fréquence de modulation, de l'irradiation protonique et du coefficient de dommage. L'objectif est d'analyser

l'influence combinée de ces paramètres sur l'épaisseur optimale de la base et de contribuer à la conception de cellules photovoltaïques plus performantes et plus résistantes aux environnements radiatifs.

Théorie

a)Présentation de la photopile

La structure étudiée est une photopile bifaciale au silicium de type $(n^+/p/p^+)$ éclairée sur la face avant par une lumière polychromatique modulée en fréquence. La cellule est constituée d'un émetteur fortement dopé de type n^+ , d'une base de type p d'épaisseur (H) et d'une région arrière fortement dopée p^+ assurant le champ de surface arrière (Back Surface Field, BSF), dont le rôle est de limiter la recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière et d'améliorer leur collecte [2–4,10]. Sous l'action du rayonnement incident, des paires électron-trou sont générées dans la base. Les électrons, porteurs minoritaires dans cette région, diffusent vers la jonction $p-n$ où ils sont séparés par le champ électrique interne, tandis qu'une partie d'entre eux se recombine dans le volume de la base ou au niveau des interfaces. Le comportement des porteurs minoritaires dépend ainsi des propriétés électroniques du matériau, de l'épaisseur de la base, des conditions de fonctionnement ainsi que des phénomènes de recombinaison aux surfaces [7, 9, 12,14]. Le fonctionnement de la cellule est étudié en régime harmonique, où l'éclairement est modulé à la pulsation angulaire (ω) . Dans ce régime, les grandeurs électroniques deviennent complexes et dépendent simultanément de la fréquence de modulation, de la température et des paramètres d'irradiation. L'irradiation est caractérisée par l'énergie des particules incidentes (Φ_p) et par le coefficient de dommage (kl) , qui traduit la création de défauts cristallins responsables de la diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires [17–21, 30, 32,34]. Dans ces conditions, les phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison sont fortement couplés. La détermination de l'épaisseur optimale de la base nécessite donc une description simultanée de ces mécanismes afin d'établir les conditions assurant une collecte maximale des porteurs de charges photogénérés.

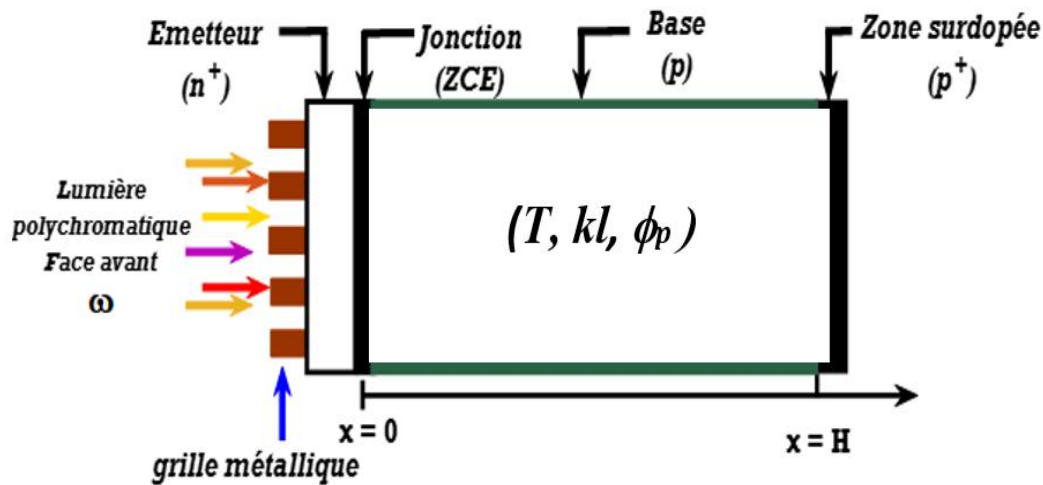


Figure1 : structure de la photopile bifaciale au silicium de type $(n^+/p/p^+)$

b) Equation de continuité

L'évolution de la densité complexe des porteurs minoritaires excédentaires dans la base est décrite par l'équation de continuité, qui traduit l'équilibre entre la diffusion, la recombinaison et la génération optique [10, 25 ,27] :

$\delta(x, t)$: est la densité des porteurs minoritaires en excès dans la base (type p) en fonction de la profondeur (x) et du temps (t)

$G(x, t)$: est le taux de génération global des charges en fonction de la profondeur (x) et du temps (t)

Où $\delta(x)$ et $g(x)$ caractérisent respectivement les parties spatiales de la densité des porteurs de charge et du taux de génération et $e^{i\omega t}$ la partie temporelle.

74

La composante spatiale du taux de génération de porteurs minoritaires est exprimée sous la forme d'une somme exponentielle représentant les différentes composantes spectrales de la lumière incidente [1, 10,25] :

a_i et b_i sont respectivement les coefficients d'intensité et les coefficients d'absorption associés aux différentes composantes spectrales.

En remplaçant chaque grandeur (Eq. 2 et 3) par leurs expressions dans (Eq.1) nous obtenons :

c) Résolution de l'équation de continuité

La résolution de l'équation de continuité conduit à la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base type p donnée par l'expression suivante :

$$\delta(x, \omega, kl, \Phi p, T) = A \cosh\left(\frac{x}{L_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)}\right) + \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot e^{-b_i x} \quad (6)$$

$$\text{Avec } \beta_i = \frac{n a_i L_\omega^{*2}}{D_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T) [b_i^2 L_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)^2 - 1]} \quad (7)$$

Où A et B sont déterminées par les conditions aux limites, tandis que

$$L_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T) = \sqrt{D_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T) \times \tau} \quad (8)$$

- $D_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)$: représente le coefficient de diffusion des électrons générés dans la base soumise à une irradiation $(kl, \Phi p)$ sous température (T) en régime dynamique fréquentiel.
- $L_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)$: représente la longueur de diffusion des électrons générés dans la base soumise à une irradiation $(kl, \Phi p)$ sous température (T) en régime dynamique fréquentiel.

: représente le coefficient de diffusion des électrons générés dans la base soumise à une irradiation $(kl, \Phi p)$ sous température (T) en régime dynamique fréquentiel.

Les conditions aux limites traduisent les phénomènes de recombinaison aux interfaces. À la jonction ($x=0$), le flux diffusif est relié à la vitesse de recombinaison à la jonction (S_f), tandis qu'à la face arrière ($x=H$), il dépend de la vitesse de recombinaison arrière (S_b) :

❖ A la jonction de la photopile : $x = 0$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \omega, kl, \Phi p, T)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{S_f}{D_\omega^*(\omega, kl, \Phi p, T)} \delta(0, \omega, kl, \Phi p, T) \quad (9)$$

❖ A la face arrière de la photopile : $x = H$

$$\left. \frac{\partial \delta(x, \omega, kl, \Phi p, T)}{\partial x} \right|_{x=H} = - \frac{Sb}{D_{\omega}^*(\omega, kl, \Phi p, T)} \delta(H, \omega, kl, \Phi p, T) \quad (10)$$

Ces deux relations permettent de déterminer les constantes d'intégration ainsi que l'expression analytique de la vitesse de recombinaison arrière en fonction de l'épaisseur de la base, de la fréquence de modulation, de la température et des paramètres d'irradiation [12, 14, 37, 38,40]. Dans cette étude, l'épaisseur optimale de la base est déterminée à partir de la méthode de la dérivée de la vitesse de recombinaison arrière. Cette approche repose sur la recherche de la valeur de (H) pour laquelle la variation de (Sb) avec l'épaisseur satisfait le critère d'optimisation donnée par la relation suivante :

$$\frac{\partial Sb(H, \omega, kl, \Phi p, T)}{\partial H} = 0 \quad (9)$$

Cette condition traduit l'équilibre entre les mécanismes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs minoritaires. L'épaisseur correspondante est considérée comme l'épaisseur optimale de la base, car elle maximise l'efficacité de collecte des porteurs photogénérés et minimise les pertes par recombinaison. Afin de faciliter la résolution analytique, cette condition est ensuite reformulée sous la forme de deux fonctions caractéristiques, notées $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$. La première fonction, notée $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$, décrit la contribution du transport diffusif des porteurs minoritaires :

$$G(H, \omega, \phi p, kl, T) = 3 \cdot \tanh\left(\frac{H}{L_{\omega}^*(\omega, kl, \Phi p, T)}\right)$$

La seconde fonction, notée $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$, représente l'effet combiné de la génération optique et de l'absorption spectrale :

$$F(H, \omega, \phi p, kl, T) = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{L_{\omega}^*(\omega, kl, \Phi p, T) \cdot b_i} \left[\frac{1}{e^{-b_i \cdot H} \cosh\left(\frac{H}{L_{\omega}^*(\omega, kl, \Phi p, T)}\right)} - 1 \right]$$

Où :

- $L_{\omega}^*(\omega, kl, \Phi p, T)$ est la longueur de diffusion complexe dépendant de la fréquence, de l'irradiation, du coefficient d'endommagement et de la température,
- b_i sont les coefficients d'absorption optique,
- H est l'épaisseur de la base.

L'épaisseur optimale est obtenue au point d'intersection de ces deux fonctions $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$, ce qui constitue le fondement de la méthode développée dans ce travail.

g) Résultats de détermination de l'épaisseur optimum de la base à partir de $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$.

La méthode graphique basée sur l'intersection des courbes $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$ pour déterminer l'épaisseur optimale de la base.

La figure 2 présente l'évolution des fonctions $G(H, \omega, \phi p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi p, kl, T)$ en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes températures comprises entre 300 K et 380 K, avec $\omega = 10^5$ rad/s, $\phi p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm/MeV.

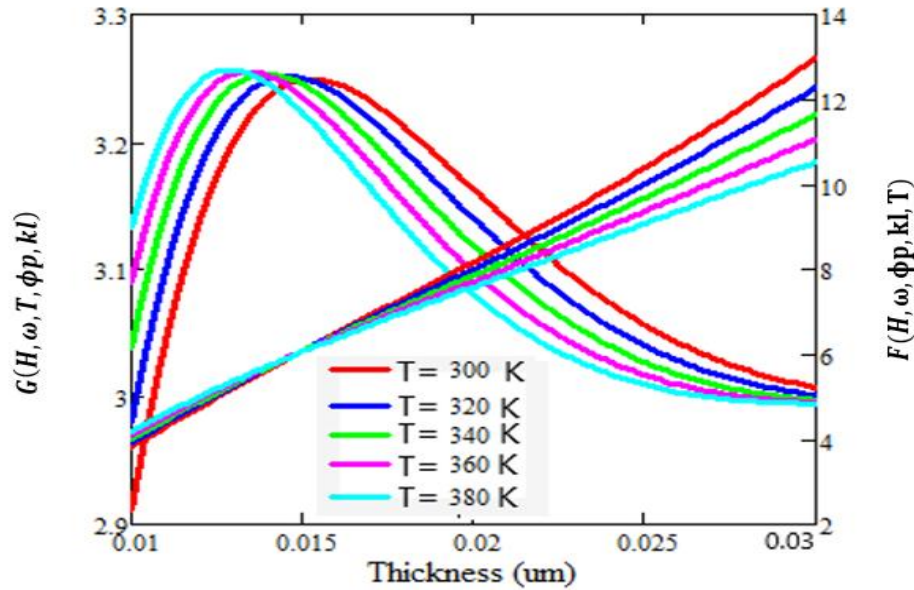


Figure 2 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^5$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV

Dans cette figure, la fonction G augmente d'abord avec l'épaisseur de la base, atteint un maximum correspondant à une épaisseur optimale, puis diminue progressivement. À l'inverse, la fonction F croît presque linéairement avec l'épaisseur. L'augmentation de la température entraîne une diminution des valeurs de F et réduit progressivement G pour les grandes épaisseurs. Ce comportement montre qu'il existe une épaisseur optimale de la base pour laquelle la collecte des porteurs minoritaires est la plus efficace. En dessous de cette valeur, l'augmentation de l'épaisseur favorise la génération et la collecte des porteurs. Au-delà, les recombinaisons deviennent plus importantes, ce qui dégrade les performances. La hausse de la température accentue ces recombinaisons et réduit ainsi l'efficacité du transport des porteurs.

Tableau 1 : Hopt en fonction de la température pour $\omega = 10^5$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV

T (K)	300 K	320 K	340 K	360 K	380 K
G	2,993	2,994	2,995	2,996	2,997
F	8,0	8,2	8,5	8,8	9,2
Hopt (um)	0,0220	0,0210	0,0200	0,0190	0,0180

La figure 3 présente l'évolution des fonctions $G(H, \omega, \phi_p, kl, T)$ et $F(H, \omega, \phi_p, kl, T)$ en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes températures comprises entre 300 K et 380 K, avec $\omega = 10^6$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm/MeV.

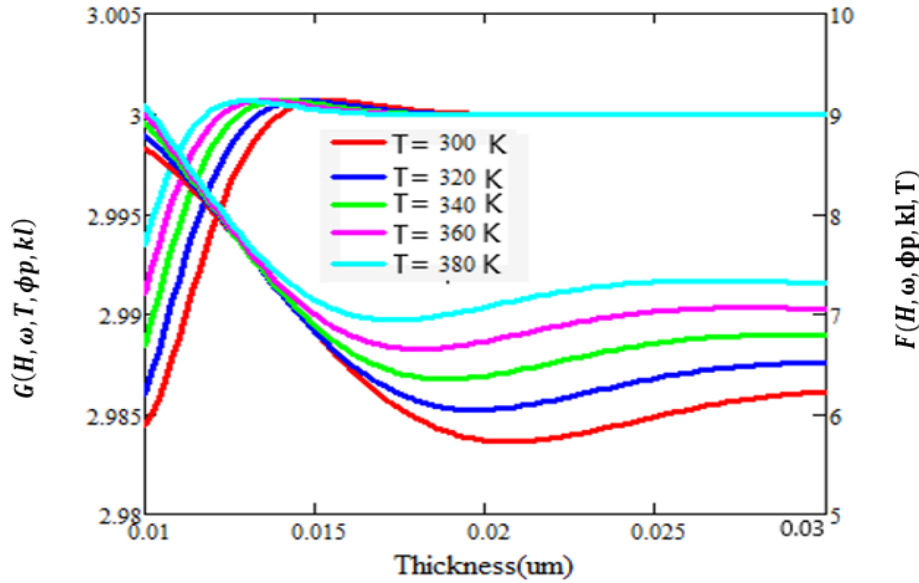


Figure 3 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^6$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV

Dans cette figure, la fonction G augmente rapidement avec l'épaisseur de la base avant de se stabiliser, tandis que la fonction F diminue d'abord, atteint un minimum, puis augmente légèrement jusqu'à devenir presque constante. L'augmentation de la température accélère la stabilisation de G et conduit à des valeurs plus élevées de F. Ce comportement montre qu'à une fréquence de modulation élevée, les porteurs minoritaires ont moins de temps pour diffuser dans la base. Une faible augmentation de l'épaisseur suffit alors pour atteindre un régime stable. La variation de F traduit l'équilibre entre la diffusion des porteurs et leur recombinaison.

Tableau 2 : Hopt en fonction de la température pour $\omega = 10^6$ rad/s, $\phi_p = 100$ MeV, $kl = 5$ cm²/MeV

T (K)	300 K	320 K	340 K	360 K	380 K
G	2,993	2,994	2,995	2,996	2,997
F	8,1	8,4	8,7	8,9	9,1
Hopt (um)	0,0118	0,0112	0,0108	0,0104	0,0101

La figure 4 présente l'évolution des fonctions G (H, ω , ϕ_p , kl, T) et F (H, ω , ϕ_p , kl, T) en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs d'irradiation comprises entre 100 MeV et 220 MeV, avec $\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV, T = 100 K

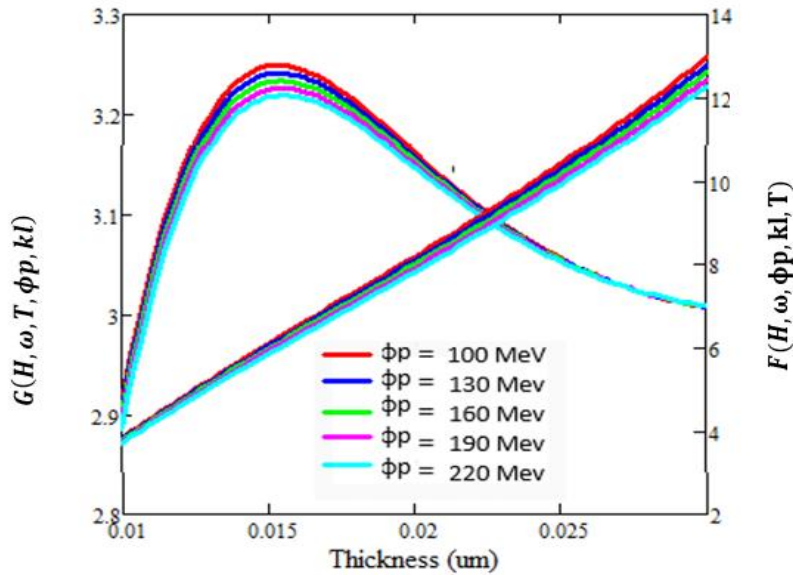


Figure 4 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV, T= 300 K

Dans cette figure, la fonction G augmente avec l'épaisseur de la base jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue progressivement, tandis que la fonction F augmente presque linéairement. Lorsque le flux d'irradiation augmente, les valeurs de G et de F baissent légèrement. Ces résultats montrent qu'il existe une épaisseur optimale de la base où la collecte des porteurs est la plus efficace. Au-delà, les recombinaisons deviennent plus importantes et les performances diminuent. Une irradiation plus intense crée davantage de défauts dans le silicium, ce qui favorise les recombinaisons et réduit l'efficacité du transport des porteurs.

Tableau 3 : Hopt en fonction de l'irradiation pour $\omega = 10^5$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV, T= 300 K

Φ_p (MeV)	100	130	160	190	220
G	3,10	3,09	3,08	3,07	3,06
F	9,2	9,1	9,0	8,9	8,8
Hopt (um)	0,0224	0,0228	0,0232	0,0236	0,0239

La figure 5 présente l'évolution des fonctions G (H, ω , Φ_p , kl, T) et F (H, ω , Φ_p , kl, T) en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs d'irradiation comprises entre 100 MeV et 220 MeV, avec $\omega = 10^6$ rad/s, $kl = 5$ cm/MeV, T = 100 K

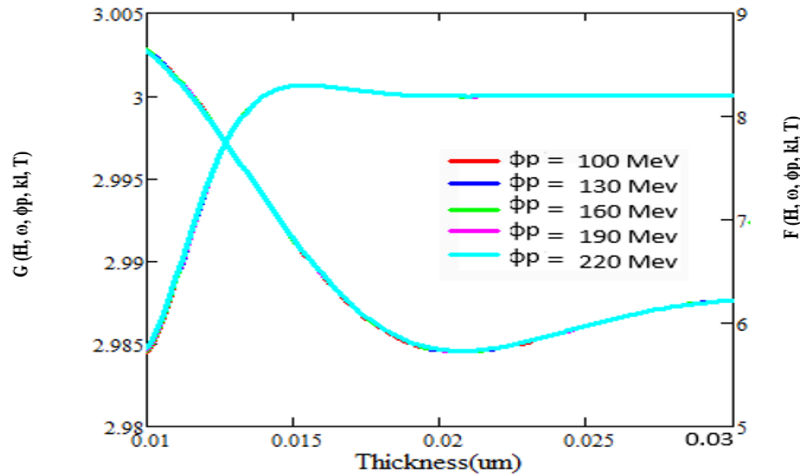


Figure 5 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^6$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV, T= 300 K

Dans cette figure, la fonction G augmente rapidement avec l'épaisseur de la base puis se stabilise, tandis que la fonction F diminue d'abord, atteint un minimum, puis augmente légèrement avant de devenir presque constante. Les courbes correspondant aux différents flux d'irradiation sont pratiquement confondues, ce qui montre que l'irradiation a une influence très faible dans ces conditions. Ces résultats indiquent qu'à une fréquence élevée, les performances de la photopile sont principalement déterminées par l'épaisseur de la base. Une épaisseur située dans la zone de stabilisation de G permet d'obtenir un fonctionnement optimal, tandis que les variations du flux d'irradiation n'affectent que très peu le comportement global du dispositif.

Tableau 4 : Hopt en fonction de l'irradiation pour $\omega = 10^6$ rad/s, $kl = 5$ cm²/MeV, T= 300 K

Φ_p (MeV)	100	130	160	190	220
G	2,998	2,998	2,998	2,998	2,998
F	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
Hopt (um)	0,130	0,0130	0,0130	0,0130	0,0130

La figure 6 présente l'évolution des fonctions G (H, ω , Φ_p , kl, T) et F (H, ω , Φ_p , kl, T) en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient de dommage comprises entre 5cm²/MeV et 11cm²/MeV, avec $\omega = 10^5$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, T= 300 K

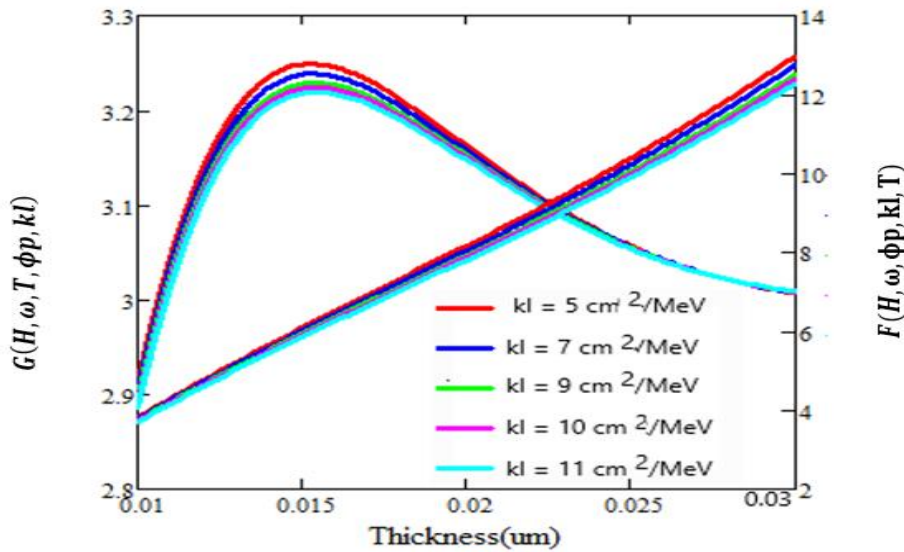


Figure 6 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^5$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, $T = 300$ K

La figure montre que le taux de génération G augmente rapidement lorsque l'épaisseur de la base croît, puis atteint un maximum avant de diminuer progressivement. Cette évolution traduit l'existence d'une épaisseur optimale où la génération et la collecte des porteurs sont les plus efficaces. En parallèle, la fonction F augmente presque linéairement avec l'épaisseur sur tout le domaine étudié. L'augmentation du coefficient de dommage kl provoque une légère baisse des deux grandeurs, en raison de l'apparition de défauts qui favorisent la recombinaison des porteurs. Néanmoins, cet effet reste relativement faible et ne modifie pas le comportement général de la photopile dans les conditions considérées.

Tableau 5 : Hopt en fonction de l'irradiation pour $\omega = 10^5$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, $T = 300$ K

kl (cm ² /MeV)	5	7	9	10	11
G	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
F	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
Hopt (um)	0,0225	0,0223	0,0221	0,0220	0,0218

La figure 7 présente l'évolution des fonctions G (H, ω , ϕ_p , kl, T) et F (H, ω , ϕ_p , kl, T) en fonction de l'épaisseur de la base pour différentes valeurs du coefficient de dommage comprises entre 5cm²/MeV et 11cm²/MeV, avec $\omega = 10^6$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, $T = 300$ K

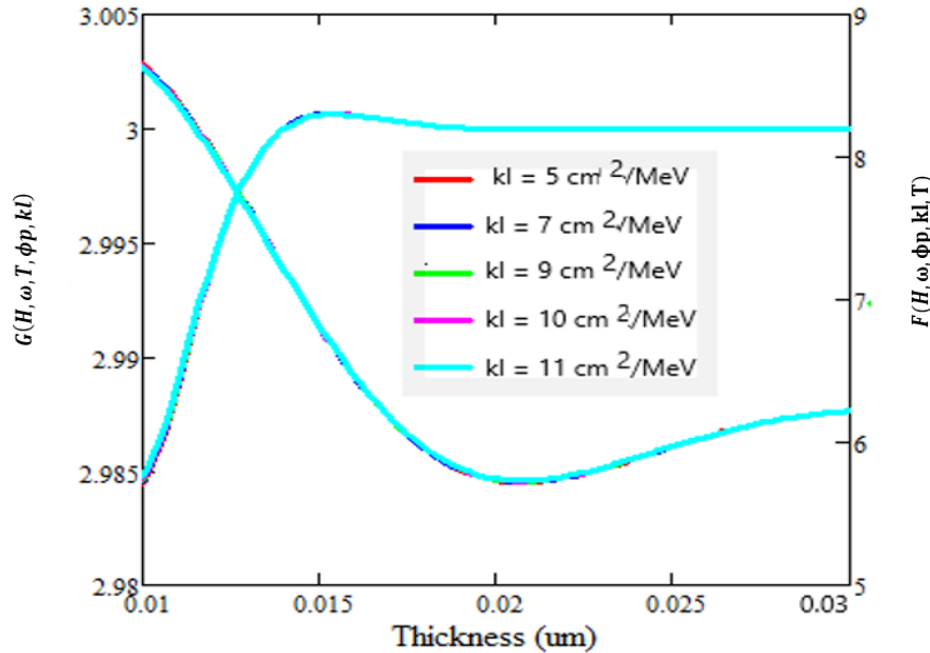


Figure 7 : G et F en fonction de l'épaisseur pour $\omega = 10^6$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, T= 300 K

La figure montre qu'à une fréquence de modulation, le taux de génération G varie très peu avec l'épaisseur de la base. Il diminue légèrement puis augmente faiblement avant de se stabiliser. De son côté, la fonction F augmente rapidement aux faibles épaisseurs, puis atteint rapidement un plateau, signe qu'une augmentation supplémentaire de l'épaisseur n'améliore plus significativement les performances de la photopile. Les courbes correspondant aux différentes valeurs du coefficient de dommage sont presque confondues, ce qui montre que, dans ces conditions de fonctionnement, l'effet de l'irradiation reste faible devant l'influence de la fréquence élevée. La photopile présente ainsi un comportement globalement stable, caractérisé par une faible sensibilité à l'épaisseur et au coefficient de dommage.

Tableau 6 : Hopt en fonction de l'irradiation pour $\omega = 10^6$ rad/s, $\Phi_p = 100$ MeV, T= 300 K

kl (cm ² /MeV)	5	7	9	10	11
G	2,9975	2,9975	2,9975	2,9975	2,9975
F	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
Hopt (um)	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125

g) Discussion

Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur optimale de la base d'une photopile bifaciale au silicium dépend fortement des conditions de fonctionnement. La température, la fréquence de modulation, l'énergie d'irradiation et le coefficient de dommage agissent simultanément sur les mécanismes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs minoritaires, influençant directement les performances globales de la cellule. L'augmentation de la température entraîne une diminution progressive de l'épaisseur optimale. Ce comportement est attribué à l'intensification des phénomènes de recombinaison thermique ainsi qu'à la réduction de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires, ce qui limite leur collecte par la jonction. Cette évolution est en accord avec les résultats rapportés dans les références [6, 22, 23,28]. La fréquence de modulation exerce également une influence importante sur l'épaisseur optimale. Lorsque la fréquence augmente, les porteurs disposent de moins de temps pour diffuser dans la base avant l'inversion du signal lumineux. La collecte des charges devient alors principalement localisée à proximité de la jonction, conduisant à une réduction de l'épaisseur optimale. Ce comportement est conforme aux observations présentées dans les références [10, 24, 25, 26, 27,36]. L'irradiation modifie les propriétés électroniques du silicium en générant des défauts cristallins qui favorisent la recombinaison des porteurs minoritaires. À faible fréquence, cette dégradation se traduit par une légère augmentation de l'épaisseur optimale, tandis qu'à haute

fréquence son influence devient nettement plus faible. De même, l'effet du coefficient de dommage est significatif aux faibles fréquences mais devient pratiquement négligeable lorsque la fréquence de modulation est élevée, indiquant que le comportement dynamique de la cellule prédomine alors sur les effets induits par l'irradiation. Ces résultats sont cohérents avec les études présentées dans les références [17, 20, 30, 32,34]. Enfin, l'approche fondée sur la dérivée de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière permet de déterminer avec précision l'épaisseur optimale de la base en identifiant le point d'équilibre entre les phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison. Cette méthode complète les travaux antérieurs consacrés à l'optimisation géométrique des photopiles bifaciales [12, 14, 16, 29, 37,38–41], tout en intégrant simultanément les effets de la température, de la fréquence de modulation, de l'irradiation protonique et du coefficient de dommage. Elle constitue ainsi une approche analytique pertinente pour la conception et l'optimisation de cellules photovoltaïques bifaciales destinées à fonctionner dans des environnements sévères.

Conclusion

Cette étude a permis de proposer une approche analytique pour déterminer l'épaisseur optimale de la base d'une photopile bifaciale au silicium de structure ($n^+/p/p^+$) éclairée sur la face avant par une lumière polychromatique modulée en fréquence. La méthode repose sur la dérivée de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires en face arrière, qui constitue un critère pertinent pour optimiser la collecte des charges photogénérées. Les résultats montrent que l'épaisseur optimale de la base est fortement influencée par la température, la fréquence de modulation, l'irradiation protonique et le coefficient de dommage. Une élévation de la température ou de la fréquence conduit à une diminution de cette épaisseur, en raison de l'augmentation des phénomènes de recombinaison et de la réduction de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. À l'inverse, l'irradiation protonique modifie les propriétés électroniques du silicium en créant des défauts cristallins dont l'effet est surtout perceptible aux faibles fréquences de modulation. La méthode développée met en évidence l'équilibre entre les mécanismes de génération, de diffusion et de recombinaison des porteurs, permettant ainsi d'identifier avec précision l'épaisseur de base la plus favorable au fonctionnement de la cellule. L'originalité de ce travail réside dans la prise en compte simultanée des effets de la température, de la fréquence de modulation, de l'irradiation protonique et du coefficient de dommage au sein d'un même modèle analytique. Ces résultats apportent une meilleure compréhension du comportement des photopiles bifaciales dans des conditions de fonctionnement réalistes et constituent une base utile pour la conception de cellules photovoltaïques plus performantes et plus robustes. Des travaux futurs pourront compléter cette étude par une validation expérimentale et par l'intégration d'autres paramètres, tels que le dopage, les résistances parasites ou les architectures photovoltaïques avancées.

References:-

1. M.A. Green, (March 1995). Silicon Solar cells advanced principles & practice Printed by Bridge printer Pty. Ltd. 29-35 Dunning Avenue, Roseberry, Center for photovoltaic Devices and systems; pp.29-35.
2. A. Cuevas, A. luque, and J. M. Ruiz, A, (1980). $n^+/p/n^+$ double-sided solar cell for optimal static concentration, in Proc. 14th IEEE Ptovov. Spec. Conf., San Diego, pp.76-81.
3. Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J. and Agost, M.G. (1997) Double Side Solar Cells to Improve Static Concentrator. Photovoltaic Solar Energy Conference, Luxembourg, 269-277. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9840-7_25
4. Hüber, A., Aberle, A.G. and Hezel, R. (2001) 20% Efficient Bifacial Silicon Solar Cells. Munich 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1796-1798.
5. R.VanSteenwinkel, M.C. Carotta, G. Martinelli, M. Mercli, L. Passari and D. Palmeri (1990). Lifetime Measurement in Solar Cell of Various Thickness and Related Silicon Wafer. Solar Cells, 28, 287-292. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(90\)90063-BG](https://doi.org/10.1016/0379-6787(90)90063-BG).
6. KonstantinosMisiakos and DimitrisTsamakis, Electron and HoleMobilities in Lightly Doped Silicon. Appl. Phys. Lett.1994, 64(15),2007-2009. <https://doi.org/10.1063/1.111721>
7. O. Diasse, R. S. Sam, H. L. Diallo, M. Ndiaye, N. Thiam, S. Mbodji and G. Sissoko, Solar cell's classification by the determination of the specific values of the back surface recombination velocities in open circuit and short-circuit operating conditions. International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS), 2012, 2278/6856:18-23)
8. Demesmaeker, E., Symons, J., Nijs, J. and Mertens, R. (1991) The Influence of Surface Recombination on the Limiting Efficiency and Optimum Thickness of Silicon Solar Cells. 10th European Photovoltaic Solar Energy

- Conference, Lisbon, 8-12 April 1991, 66-67.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_17
9. E.Gaubas and J. Vanhellemont (1996). A simple Technique for the Separation of Bulk and Surface Recombination Parameters in Silicon. *Journal of Applied Physics*, 80, 6293-6297.
<https://doi.org/10.1063/1.363705M>
 10. H.L.Diallo, A. Seïdou. Maïga, A.Wereme and G.Sissoko, New Approach of Both Junction and Back Surface Recombination Velocities in a 3D Modelling Study of a Polycrystalline Silicon Solar Cell. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2008, 42, 203-211. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008085>
 11. Lin, Y., et al. (2025). The effect of thickness and surface recombination velocity on silicon solar cells. *Universe*, 6(3), 33.
 12. Masse Samba Diop , Hamet Yoro Ba , Ndeye Thiam , Ibrahima Diatta , Youssou Traore , Mamadou Lamine Ba , El Hadji Sow , Oulymata Mballo , Grégoire Sissoko, Surface Recombination Concept as Applied to Determinate Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2019, 9, 102-111 <https://www.scirp.org/journal/wjcmp>
 13. Abdouli, N., et al. (2023). Numerical and experimental study of surface recombination velocities and base width effect in multicrystalline silicon solar cells. *Crystals*, 13(3), 425. <https://doi.org/10.3390/cryst13030425>
 14. M.M.S.Dede, M.L. Ba, M.A. Ba, M. Ndiaye, S. Gueye, E.H. Sow, I. Diatta, M.S. Diop, M. Wade and G. Sissoko, Back Surface Recombination Velocity Dependent of Absorption Coefficient as Applied to Determine Base Optimum Thickness of an n+/p/p+ Silicon Solar Cell. *Energy and Power Engineering*, 2020, 12, 445-458.
 15. IliasFagnaneDiouf, Ousmane Sow, Gora Diop, Malick Ndiaye, IbrahimaDiatta, KhadyLoum, MoustaphaThiame, Mamadou Wade, GregoireSissoko. Optimization of the base thickness of a silicon solar cell with multi-vertical junctions connected in series, through dynamic expressions of the recombination velocity on the back side. *Journal of Scientific and Engineering Research (JSERBR)*. [http:// www.jsaer.com](http://www.jsaer.com), Volume 9, Issue 10pp: 10-20, 2022.
 16. Ba. M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. and Sissoko, G. (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, 173-185.
<https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
 17. Ohshima, T., T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, K. Shimazaki, S. Kuwajima, A. Ohi, And H. Itoh (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*: 806
 18. Kraner, H. W., Radiation damage in silicon detectors, 2nd Pisa Meeting on Advanced Detectors, Grosseto, Italy, June 3-7 1983.
 19. Goo-Hwan Shin and KwangsunRyu and Hyung-Myung Kim and Kyung-wook Min (2008). Radiation effect test for single-crystalline and polycrystalline silicon solar cells. *Journal of the Korean Physical Society*. Vol. 52, Pp. 843-847. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120466620>
 20. M. A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiam, I. F. Barro and G. Sissoko (2012). Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, Vol. 23, Issue 4, pp.5068-5073, 2012.
 21. Van Dyk, E. E., & Meyer, E. L. (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344. doi :10.1016/s09601481(03)00250-7
 22. Kabou, F., et al. (2020). AC back surface recombination in N⁺-P-P⁺ silicon solar cell: Effect of temperature. *International Journal of Advanced Research*, 8(10), 105–113. <https://doi.org/10.21474/ijar01/11273>
 23. Y. Traore, N. Thiam, M. Thiame, M. L. Ba, M. S. Diouf et G. Sissoko, AC Recombination Velocity in the Back Surface of a Lamella Silicon Solar Cell under Temperature. *Journal of Modern Physics*, 2019, 10, 1235-1246. <https://doi.org/10.4236/jmp.2019.1010082>
 24. 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>
 25. Ly Diallo, H., Wade, M., Ly, I., NDiaye, M., Dieng, B., Lemrabott, O.H., Maïga, A.S. and Sissoko. G. (2012). 1D Modeling of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation, Monochromatic Illumination: Determination of the Equivalent Electrical Circuit Related to the Surface Recombination Velocity. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 1672-1676. <http://www.maxwell.org>.

26. Thiam, N., Diao, A., Ndiaye, M., Dieng, A., Thiam, A., Sarr, M., Maiga, A.S. and Sissoko, G. (2012). Electric Equivalent Models of Intrinsic Recombination Velocities of a Bifacial Silicon Solar Cell under Frequency Modulation and Magnetic Field Effect. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4, 4646-4655.
27. 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. doi: [10.4236/wjcmp.2014.42013](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013).
28. Fall, M., Gaye, I., Diarisso, D., Diop, G., Loum, K., Diop, N., Sy, K., Ndiaye, M. and Sissoko, G. (2021). AC Back Surface Recombination Velocity in $n^+ - p - p^+$ Silicon Solar Cell under Monochromatic Light and Temperature. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13, 67-81. doi: [10.4236/jemaa.2021.135005](https://doi.org/10.4236/jemaa.2021.135005).
29. Ba, M.L., Thiam, N., Thiame, M., Traore, Y., Diop, M.S., Ba, M., Sarr, C.T., Wade, M. and Sissoko, G. (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, 173-185. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2019.1110012>
30. M. A. Ould El Moujtaba, M. Ndiaye, A. Diao, M. Thiam, I. F. Barro and G. Sissoko (2012). Theoretical Study of Influence of Irradiation on a Silicon Solar Cell Under Multispectral Illumination. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, Vol. 23, Issue 4, pp.5068-5073, 2012.
31. Oumar DIA, Mamadou Lamine BA, Gora DIOP, Ibrahima DIATTA, Mor SARR, Mamadou WADE and Gregoire SISSOKO (2021). Effet De L'energie D'irradiation Sur La Resistance Serie Dans Une Photopile ($N^+/P/P^+$) Au Silicium A Jonctions Verticales Series. *International Journal of Advanced Research*, 9(11), 985-997. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/13832>
32. Gaye, R. Sam, A. D. Seré, I. F. Barro, M. A. Ould El Moujtaba, R. Mané, G. Sissoko (2012). Effect of irradiation on the transient response of a silicon solar cell; *International journal of emerging trends and technologies in computer science (IJETTCS)* Volume 1, Issue 3, September-October 2012, ISSN 2278-6856.
33. Ndeye Madeleine Diop, Boureima Seibou, Mamadou Wade, Marcel Sitor Diouf, Ibrahima Ly, Hawa Ly Diallo, Gregoire Sissoko (2016). Theoretical Study of Vertical Parallel Junction Silicon Solar Cell Capacitance under Modulated Polychromatic Illumination: Influence of Irradiation. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN:2278-3075, Volume-6 Issue-3, August 2016).
34. Mouhamadou Mousliou Diallo, Seni Tamba, Boureima Seibou, Mohamed Lemine Ould Cheikh, Ibrahima Diatta, El Hadji Ndiaye, Youssou Traore, Cheikh Tidiane Sarr, Gregoire Sissoko (2017). Impact of irradiation on the surface recombination velocity of a back side monochromatic illuminated bifacial silicon solar cell under frequency modulation, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2017, 4(1): 29-40
35. Ba, M.L., Diallo, H.L., Ba, H.Y., Traore, Y., Diatta, I., Diouf, M.S., Wade, M. and Sissoko, G. (2018). Irradiation Energy Effect on a Silicon Solar Cell: Maximum Power Point Determination. *Journal of Modern Physics*, 9, 2141-2155. <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.912135>
36. 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. doi: [10.4236/wjcmp.2014.42013](https://doi.org/10.4236/wjcmp.2014.42013).
37. M. Diop, H. Ba, N. Thiam, I. Diatta, Y. Traore, M. Ba, E. Sow, O. Mballo and G. Sissoko, Surface Recombination Concept as Applied to Determine Silicon Solar Cell Base Optimum Thickness with Doping Level Effect. *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2019, 9, 102-111.
38. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Youssou Traore, Segha Gueye, Ousmane Sow, Gregoire Sissoko. Derivative of AC recombination velocity of minority carriers as applied to the determination of the optimum base thickness of an $(n^+ / p / p^+)$ silicon solar cell. *Journal of Scientific and Engineering Research (JSERBR)*. [http:// www.jsaer.com](http://www.jsaer.com), Volume 10, Issue 3 pp: 1-10, 2023.
39. Matar Niane, Richard Mane, Ibrahima Diatta, Gora Diop, Moussa Ibra Ngom, Mamadou Yacine Ba, Khady Loum, Segha Gueye, Youssou Traore, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. AC back surface recombination, as applied to determine (p) base thickness of both conventional and vertical series junction $(n^+ / p / p^+)$ silicon solar cells under white illumination. *Journal of chemical, biological and physical sciences*, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 152 – 163, 2023.
40. Khady Loum, Gora Diop, Ibrahima Diatta, Richard Mane, Malick Ndiaye, Youssou Traore, Segha Gueye, Moustapha Thiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, Gregoire Sissoko. Derivative of AC back surface recombination velocity as applied to $n^+ / p / p^+$ silicon solar cell optimum base thickness determination: Effect of both temperature and frequency. *Journal of chemical, biological and physical sciences*, www.jcbcs.org, Volume 13, Issue 2, pp: 139 – 151, 2023.

41. KhadyLoum, Gora Diop, IbrahimaDiatta, Richard Mane, MoussaIbraNgom, Youssou Traore , Sega Gueye, MoustaphaThiame, Ousmane Sow, Mamadou Wade, GrégoireSissoko. Optimization of the base thickness of the (N + /P/P +) silicon solar cell in steady state under polychromatic illumination: Influence of temperature and doping rate. Journal of chemical, biological and physical sciences, www.jcbssc.org, Volume 13, Issue 2, pp: 164 – 175, 2023.

UNDER PEER REVIEW IN IJAR