# 

## UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



### ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE, CHIMIE, SCIENCES DE LA TERRE, DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR (ED-PCSTUI)

#### FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

#### **DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

Année académique : 2015-2016

N° d'ordre : 37

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : ENERGIE SOLAIRE

Présentée par :

Mlle Oulimata MBALLO Maître ès sciences

THEME: ETUDE DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTION VERTICALE PARALLELE SOUS POLARISATION ELECTRIQUE ET SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN REGIME STATIQUE

| Président    | Grégoire SISSOKO    | Professeur Titulaire           | FST/UCAD  |
|--------------|---------------------|--------------------------------|-----------|
| Rapporteurs  | Mamadou Lamine SAMB | Professeur Assimilé            | UT/THIES  |
|              | Moustapha DIENG     | Professeur Titulaire           | FST/UCAD  |
| Examinateurs | Mamadou WADE        | Professeur Assimilé            | EPT/THIES |
|              | Ibrahima LY         | Professeur Assimilé            | EPT/THIES |
|              | Mor NDIAYE          | Maître de Conférences Assimilé | FST/UCAD  |
| Directeur    | Séni TAMBA          | Professeur Assimilé            | EPT/THIES |



Je dédie ce travail

A mon père

A ma mère

A mes frères et sœurs

A mes oncles et tantes

A mes cousins et cousines

A mes beaux frères

A mes níèces et neveux

A mes collègues

A mes amís (es)

A feue ma mère FANTA BALDE et à feu Mamadou Seydou MBALLO.

Tous les deux vous avez laissé un grand vide dans ma vie.

Que la Terre vous soit légère.

A tous ceux qui m'ont enseignée de l'élémentaire à l'Université

A tous les membres du LASES et du GIRER

A tous ceux quí me sont chers

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

Ce travaíl a été réalisé :

Sous la direction de Monsieur SENI TAMBA, Professeur Assimilé à

l'Ecole Polytechnique de Thiès (EPT/THIES)

Au Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire (LASES) du

département physique de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de

L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).



Je rends grâce à Dieu et prie sur le prophète Muhammad (PSL). Je remercie mes parents et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à M. Grégoire SISSOKO Professeur Titulaire des Universités de classe exceptionnelle. Chevalier dans l'ordre national du lion. Les mots ne sont pas assez forts pour vous exprimer toute ma gratitude. Vous m'avez accueillie dès ma première année à l'université. Depuis, vous m'avez guidée pas à pas dans les études et vous m'avez initiée aux activités de recherche. Vous avez inculqué à tous les étudiants et professeurs que vous avez encadré la rigueur dans le travail et surtout la générosité de partager le savoir. Qu'Allah (SWT) vous accorde longue vie et vous rétribue pour tout ce travail abattu. Je vous serai toujours reconnaissante pour votre disponibilité et votre patience sans lesquelles ce travail n'aurait pu arriver à terme. Merci de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

J'exprime mes remerciements à M. Mamadou Lamine Samb Professeur Assimilé à l'UT/THIES pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury.

Mes remerciements à M. Moustapha Dieng Professeur Titulaire à FST/UCAD. Vous faites parti de ces professeurs à qui j'ai beaucoup d'estime. Vous êtes une

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

personne sérieuse dans le travail et qui est toujours à la disposition des étudiants. Votre participation à ce jury est un grand honneur pour moi.

Mes remerciements à M. Mamadou Wade Professeur Assimilé à EPT/THIES d'avoir accepté de participer à ce jury. Je ne vous remercierai jamais assez pour tous vos encouragements.

Je remercie M. Ibrahima Ly Professeur Assimilé à EPT/THIES d'avoir accepté de participer à ce jury. Merci pour tous vos encouragements.

A M. Mor Ndiaye Maître de Conférences Assimilé à FST/UCAD je témoigne ma profonde gratitude. Vous avez été toujours très disponible à mes nombreuses sollicitations. Vous êtes un exemple pour nous jeunes chercheurs et vous nous avez toujours épaulés comme un grand frère. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury.

Mes sincères remerciements à M. Séni Tamba Professeur Assimilé à EPT/THIES d'avoir accepté de diriger ce travail. Je ne trouve pas les mots pour vous témoigner toute ma reconnaissance. Que le tout puissant vous honore.

Ma reconnaissance va à l'endroit de Dr Marcel Sitor Diouf qui m'a initiée et m'a constamment épaulée dans les activités de recherche. Tes précieux conseils m'ont toujours encouragée à se battre et à persévérer dans les études. Tu es une personne d'une grande générosité à qui j'ai beaucoup d'estime. Que Dieu

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

veille sur toi et sur ta famille et qu'Il t'ouvre encore et encore les portes de la réussite.

Je ne remercierai jamais assez Pr. Saliou Kane Formateur à la FASTEF et Inspecteur Général de l'Education Nationale. Vous avez des qualités humaines et sociales très appréciables. Vos précieux conseils et vos encouragements m'ont beaucoup aidée dans mes études et dans ma vie professionnelle. Qu'Allah vous rétribue !

Je remercie tous les membres du Groupe International de Recherche en Energie Renouvelable (GIRER) en particulier Dr Issa Diagne, Dr Diao, Ibrahima Diatta, Youssou Traoré.

Mes remerciements à tous mes camarades chercheurs du LASES pour votre collaboration et vos encouragements. Mention spéciale à mes camarades de promotion Mme Baldé, M. Gueye, M. Mané et M. Gaye. Bon courage !

Je ne saurai terminer sans remercier du fond du cœur tous les membres de ma famille. Vous m'avez tous beaucoup soutenue. Mes sœurs Amie, Mariama, Kadidiatou et Fanta, mes frères, mon oncle Samba Bortou et ma tante Sounkarou, ma maman chérie et mon bien aimé papa.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

| Sommain  | <b>P</b> |
|----------|----------|
| Juillian | е        |

| Liste des figures et tableaux   | 8          |
|---|------------|
| Nomenclature  | 14         |
| Introduction générale   | 16         |
| Chapitre I : Etude bibliographique  | 20         |
| Introduction  | 21         |
| I.1 Les photopiles à jonction verticale   | 21         |
| I.2 Techniques de caractérisation des photopiles en régime statique   | 26         |
| Conclusion  | 38         |
| Chapitre II: Influence de la profondeur z de la base sur les paramètres électriques d'une photo<br>au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique          | pile<br>42 |
| Introduction  | 43         |
| II.1 Présentation de la photopile a jonction verticale parallèle  | 43         |
| ii.2 Résolution de l'équation de continuité   | 45         |
| II.3 Densité des porteurs minoritaires  | 47         |
| II.4 Densité de photocourant  | 48         |
| II.5 La phototension  | 51         |
| II.6 Caractéristique I-V  | 52         |
| II.7 La résistance série  | 53         |
| II.8 La résistance shunt  | 55         |
| II.9 Capacité   | 57         |
| II.10 Courant de diode  | 60         |
| II.11 Puissance électrique  | 62         |
| II.12 Rendement de conversion électrique  | 63         |
| Conclusion  | 64         |
| Chapitre III: Influence d'un champ électrique de polarisation sur les paramètres électriques d'un photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique | une<br>68  |
| Introduction  | 69         |
| III.1 Présentation de la photopile a jonction verticale parallèle sous polarisation électrique  | 69         |
| III.2 Equation de continuité  | 70         |
| II.2.1 Solution de l'équation de continuité   | 70         |
| II.2.2 Conditions aux limites   | 71         |
| III.3 Densité des porteurs minoritaires   | 71         |
| III.3.1 Effet du champ électrique de polarisation   | 71         |

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MIle OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

| III.3.2 Effet de la profondeur z de la base        | 74 |
|--|----|
| III.4 Densité de photocourant                      | 76 |
| III.4.1 Effet du champ électrique de polarisation  | 76 |
| III.4.2 Effet de la profondeur z de la base        | 79 |
| III.5 Phototension                                 | 80 |
| III.5.1 Effet du champ électrique de polarisation  | 81 |
| III.5.2 Effet de la profondeur z de la base        |    |
| III.6 Caractéristique I-V                          |    |
| III.7 Résistance série                             | 85 |
| III.7.1 Effet du champ électrique de polarisation  |    |
| III.7.2 Effet de la profondeur z de la base        |    |
| III.8 Résistance shunt                             |    |
| III.8.1 Effet du champ électrique de polarisation  | 90 |
| III.8.2 Effet de la profondeur z de la base        |    |
| III.9 La capacité                                  |    |
| III.9.1 Effet du champ électrique de polarisation  | 94 |
| III.9.2 Effet de la profondeur z de la base        | 96 |
| III.10 Le courant de diode                         |    |
| III.10.1 Effet du champ électrique de polarisation |    |
| III.10.2 Effet de la profondeur z de la base       |    |
| III.11 La Puissance électrique                     |    |
| III.11.1 Effet du champ électrique de polarisation |    |
| III.11.2 Effet de la profondeur z de la base       |    |
| Conclusion   |    |
| Conclusion et perspectives                         |    |
| Annexes mathématiques                              |    |

## Liste des figures et tableaux

#### Listes des figures

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MIle OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

| Figure II.9 : Caractéristique I-V de la photopile pour différentes valeurs de la profondeur z                          |
|--|
| $(D=26 \ cm^2.s-1; \ L=0,01 \ cm)$   |
| Figure II.10 : Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement de circuit-ouvert                                   |
| Figure II.11 : Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la                           |
| Jonction Sf pour différentes valeurs de la profondeur $z (D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}; L=0,01 \text{ cm})55$       |
| <i>Figure II.12 : Profil de la résistance série en fonction de la profondeur z</i> ( $Sf = 2.10^2$ cm/s ;              |
| $D=26 \ cm^2.s^{-1}$ ; $L=0,01 \ cm$ )   |
| Figure II.13: Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement de court-circuit                                     |
| Figure II.14 : Profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la                           |
| jonction Sf pour différentes valeurs de la profondeur $z$ (D=26 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ; L=0,01 cm)57        |
| <i>Figure II.15 :</i> profil de la résistance shunt en fonction de la profondeur ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; |
| L=0,01 cm)   |
| Figure II.16 : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour                     |
| différentes valeurs de z ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01\text{ cm}$ )                                       |
| Figure II.17 : Profil de la capacité de la photopile fonctionnant en court-circuit en fonction de la                   |
| profondeur Z ( $D=26cm^2.s^{-1}$ ; $L=0,01cm$ )  |
| Figure II.18 : Profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la                              |
| jonction pour différentes valeurs de z ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01\text{cm}$ )                          |
| Figure II.19 : Profil du courant de diode en fonction de la profondeur Z $(D=26cm^2.s^{-1};$                           |
| L=0,01cm)  |
| Figure II.20 : Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction                         |
| pour différentes valeurs de z ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01\text{ cm}$ )                                  |
| Figure II.21 : Profil du courant de diode en fonction de la profondeur Z $(D=26cm^2.s^{-1};$                           |
| L=0,01cm)  |
| <i>Figure II.22</i> : <i>Profil du rendement de conversion en fonction de la profondeur Z</i> ( $D=26cm^2.s^{-1}$ ;    |
| L=0,01cm)  |
| Figure III.1 : Structure d'une photopile à jonction verticale parallèle sous polarisation                              |
| électrique   |

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

| Figure III.2 : Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la   |
|--|
| base pour différentes valeurs du champ électrique (Sf=7.10 <sup>7</sup> cm .s <sup>-1</sup> ; D=26 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ; L=0,01 cm; |
| Z=0,04 cm)   |
| Figure III.3 : Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du champ électrique  |
| $(Sf=7.10^7 cm . s^{-1}; D=26 cm^2 . s^{-1}; L=0,01 cm; x=0,03 cm; Z=0,04 cm)$   |
| Figure III.4 : Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur z de la   |
| base pour différentes valeurs du champ électrique ( $Sf=7.10^7$ cm $.s^{-1}$ ; $D=26$ cm <sup>2</sup> $.s^{-1}$ ; $L=0,01$ cm;                   |
| x=0,03cm)  |
| Figure III.5 : Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du champ électrique pour   |
| différentes valeurs de la profondeur z de la base (Sf=7.10 <sup>7</sup> cm .s <sup>-1</sup> ; D=26 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ; L=0,01 cm; |
| x=0,03cm)  |
| Figure III.6 : Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à   |
| la jonction pour différentes valeurs du champ électrique (D=26 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ; L=0,01 cm ;                                    |
| Z=0,04 cm)   |
| Figure III.7 : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ  |
| électrique (D=26 cm2.s-1 ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)  |
| Figure III.8 : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur  |
| z de la base pour différentes valeurs du champ électrique (D=26 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ; L=0,01 cm ;                                   |
| Z=0,04 cm)   |
| Figure III.9 : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ  |
| électrique pour différentes valeurs de la profondeur z ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ )                               |
| Figure III.10 : Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction   |
| pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ ; $Z=0,04 \text{ cm}$ )82                    |
| Figure III.11 : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ électrique  |
| $(D=26 \ cm^2.s^{-1}; \ L=0.01 \ cm; \ Z=0.04 \ cm)$   |
| Figure III.12 : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de la profondeur z de la   |
| base pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ )84                                     |
| Figure III.13 : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ électrique pour   |
| différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ )                                    |

| Figure III.14: Caractéristique I-V de la photopile pour différentes valeurs du champ électrique   |
|---|
| $(D=26 \ cm^2.s-1; \ L=0,01 \ cm, \ z=0,04 \ cm)$   |
| Figure III.15: Schéma électrique équivalent de la photopile en circuit ouvert   |
| Figure III.16 : Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la   |
| jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ ; $Z=0,04 \text{ cm}$ )88 |
| Figure III.17 : Profil de la résistance série en fonction du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ;                       |
| L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)  |
| Figure III.18 : Profil de la résistance série en fonction du champ électrique pour différentes  |
| valeurs de la profondeur z de la base ( $Sf = 2.10^2 cm/s$ ; $D=26 cm^2.s^{-1}$ ; $L=0,01 cm$ )   |
| Figure III.19: Schéma électrique équivalent de la photopile en court-circuit  |
| Figure III.20 : Profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la   |
| jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ ; $Z=0,04 \text{ cm}$ )92 |
| Figure III.21 : Profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ;                       |
| L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)  |
| Figure III.22 : Profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique pour différentes  |
| valeurs de la profondeur z de la base ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ )   |
| Figure III.23 : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction  |
| pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ ; $Z=0,04 \text{ cm}$ )               |
| Figure III.24 : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction du champ   |
| électrique $(D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}; L=0,01 \text{ cm}; Z=0,04 \text{ cm})$   |
| Figure III.25 : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la profondeur                                       |
| <i>z</i> de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; $L=0,01 \text{ cm}$ )97            |
| Figure III.26 : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction du champ   |
| électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base (D=26 cm <sup>2</sup> .s-1; L=0,01 cm)98                                |
| Figure III.27 : Profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la  |
| jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26~cm^2.s^{-1}$ ; $L=0,01~cm$ ;  |
| Z=0,04cm)   |
| <b>Figure III.28</b> : Profil du courant de diode en fonction du champ électrique $(D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1};$                        |
| L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)  |

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

#### Liste des tableaux

| <b>Tableau II.1 :</b> Les différentes valeurs des coefficients tabulés $a_i$ et $b_i$ | du rayonnement solaire |
|---|------------------------|
| sous AM=1.5   |                        |
| Tableau II.2 : Valeurs de la capacité de la photopile fonctionnant                    | en court-circuit pour  |
| différentes valeurs de Z  |                        |

## Nomenclature

| Svm   | bole | Ņ |
|-------|------|---|
| o y m | DOIG | - |

| x (cm)   | Epaisseur de la base  |
|--|---|
| z (cm)   | Profondeur de la base   |
| L (cm)   | Longueur de diffusion des porteurs de charges                           |
| $D (cm^2/s)$   | Coefficient de diffusion des porteurs de charges                        |
| τ (s)  | Durée de vie moyenne des porteurs                                       |
| $\mu$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) | Mobilité des porteurs   |
| $L_{eff}(cm)$  | Longueur de diffusion effective des porteurs                            |
| $G(cm^{-3}.s^{-1})$  | Taux de génération des porteurs   |
| $a_i (cm^{-3}.s^{-1})$                                     | Coefficient tabulé du rayonnement solaire                               |
| $b_i (cm^{-1})$  | Coefficient tabulé du rayonnement solaire                               |
| $\delta$ (cm <sup>-3</sup> )                               | Densité des porteurs minoritaires en excès dans la base de la photopile |
| Sf (cm/s)  | Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la jonction        |
| Sf <sub>0</sub> (cm/s)                                     | Vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction                      |
| Sb (cm/s)  | Vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière    |
| q(C)   | Charge de l'électron  |
| Jph (A/cm <sup>2</sup> )                                   | Densité de photocourant   |
| Jcc (A/cm <sup>2</sup> )                                   | Densité de photocourant de court-cicuit                                 |
| $J_{T} (A/cm^{2})$   | Densité de photocourant total photogénéré                               |
| Id $(A/cm^2)$  | Courant de diode  |
| Vph (V)  | Phototension  |
| Vco (V)  | Tension de circuit ouvert   |
| $V_{T}(V)$   | Tension thermique   |
| $N_{\rm B} ({\rm cm}^{-3})$                                | Taux de dopage de la base en atomes d'impureté                          |
| $n_i (cm^{-3})$  | Concentration intrinsèque des porteurs dans la base                     |
| K (J/°K)   | Constante de Boltzmann  |
| T (K)  | Température   |

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MIle OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

| Rsh (Ω)                       | Résistance shunt                          |
|-------------------------------|---|
| Rs (Ω)                        | Résistance série                          |
| $C (F/cm^2)$                  | Capacité de la zone de charge d'espace    |
| $C_{cc}$ (F/cm <sup>2</sup> ) | Capacité de la photopile en court-circuit |
| $C_0 (F/cm^2)$                | Capacité sous obscurité de la photopile   |
| E (V/cm)                      | Champ électrique                          |
| $P(W/cm^2)$                   | Puissance électrique                      |
| Pmax (W/cm <sup>2</sup> )     | Puissance maximale                        |
| Pinc (W/cm <sup>2</sup> )     | Puissance incidente                       |
| η (%)                         | Rendement de conversion électrique        |

#### **Introduction générale**

L'Homme moderne est un grand consommateur d'énergie. Il utilise l'énergie dans différents domaines de la vie comme le transport, la télécommunication, la technologie,... Suite aux crises pétrolières des années 1973 et 1978, il a été contraint de trouver d'autres sources d'énergies comme le vent (énergie éolienne), l'eau (énergie hydroélectrique) et le soleil (énergie solaire).

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui produit de l'électricité par absorption de photon dans un matériau semi-conducteur. C'est une énergie propre car elle ne produit pas de gaz à effet de serre, de rejets polluants et n'engendre pas de déchets. Elle constitue donc une énergie favorable pour la protection de l'environnement.

L'effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel [1] mais son explication par Albert Einstein date de 1905 [2]. Ce n'est qu'en 1954 qu'apparaît la première cellule photovoltaïque créée par les laboratoires Bell obtenue par tirage Czochralski [3] avec un rendement de 4%.

Depuis lors, les technologies photovoltaïques se sont développées pour augmenter l'efficacité des cellules. Malgré cela l'usage du photovoltaïque à grande échelle est limitée par son coût excessif et par le faible rendement des cellules solaires.

Pour pallier à cela des recherches ont été menées pour améliorer les étapes de fabrication dans le but de diminuer le coût et aussi pour connaître et contrôler les causes des faibles rendements des cellules.

Ainsi de nouvelles variétés de photopiles ont été conçues : les photopiles à jonction horizontale, les photopiles à jonction verticale, les photopiles à concentration de lumière, etc.

Le rendement d'une cellule est lié à sa performance de convertir l'énergie solaire en électricité. Lorsqu'une cellule solaire absorbe un photon, il y'a création de paires électron-trou qui sont des porteurs de charges. Ces porteurs de charges diffusent vers les zones de collecte pour générer un courant électrique. Mais au cours de cette diffusion certains d'entre eux sont perdus par recombinaisons au sein de la cellule. Ces recombinaisons sont évalués par les paramètres électroniques à savoir la durée de vie des porteurs, la longueur de diffusion et les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière et par les paramètres électriques tels que les résistances série et shunt [4, 5, 6].

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

Les techniques de caractérisation de ces paramètres sont étudiées en régime statique [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], en régime dynamique fréquentielle [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] ou en régime dynamique transitoire [22, 23, 24, 25, 26, 27].

Le fonctionnement d'une cellule solaire dépend fortement des paramètres internes liés à la technique d'élaboration du dispositif et au dispositif lui-même mais aussi aux paramètres externes liés à l'entourage du lieu de fonctionnement de la cellule comme le champ électrique ou le champ magnétique.

C'est pour cela que nous tenons compte dans cette étude l'effet d'un champ électrique de polarisation.

Dans ce travail nous étudions pour une cellule solaire au silicium à jonction verticale parallèle le comportement en profondeur et sous l'effet d'un champ électrique des paramètres électriques. Le travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous ferons une étude bibliographique qui portera essentiellement sur la structure et l'avantage des photopiles à jonction verticale et sur les techniques de caractérisation des photopiles en régime statique.

Le deuxième chapitre traite le comportement de la densité des porteurs minoritaires et des paramètres électriques lorsque l'épaisseur de couche z de la base augmente. Cette étude nous permettra de déterminer la valeur optimale de l'épaisseur de couche z de la photopile considérée.

Le troisième chapitre tient compte de l'application d'un champ électrique extérieur sur la photopile à jonction verticale parallèle.

Cette étude se terminera par une conclusion générale où on fera une synthèse des résultats obtenus puis on dégagera des perspectives pour la suite du travail.

#### **Références bibliographiques**

- [1] Becquerel E., "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires", *Comptes Rendus, 9, pp. 561–567, 1839.*
- [2] Einstein A., "Über einen die erzeugung und verwandlung des lichtes betreenden heuristischen gesichtspunkt", *Annalen der Physik, pp. 322, 132–148, 1905.*
- [3] Ricaud A., "Photopiles solaires", Presses Polytechniques et Universitaires romandes. Lausannes, Suisse, 1997.
- [4] "Energie Solaire Photovoltaïque", volume1, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, sous la direction de Bernard Equer, (Ellipses, Unesco, 1993).
- [5] Bowden S. and Rohatgi A., "Rapid and Accrute Determination of Series Resistance and Fill Factor Losses in Industrial Silicon Solar Celles", Proc. 17th European PVSEC, (Munich, 2001), pp. 1802-1806.
- [6] Miller H.J., "Semiconductors for solar cells", Artech house 1993.
- [7] Dhariwal S.R and Mehrotra D.R., "Solar Cells", 25, pp. 223-23, 1988.
- [8] Sharma S.K., Singh S.N., Chakravarty B.C. and Das B.K., J.Appl.Phys.60 (10), pp. 3550-3552, 1986.
- [9] Jain G.C., Singh S.N.and kotnala R.K., "Solar Cells", 8, pp. 239-248, 1983.
- [10] Meier D. L., Hwang Jeong-Mo, Campbell R. B., I.E.E.E Transactions on Electron Devices, 35(1), pp. 70-78, 198.,
- [11] 'Modélisation d'une photopile bifaciale au silicium :Méthodes de détermination des paramètres de recombinaison', E.NANEMA, Thèse de 3ème Cycle, Faculté des sciences et Techniques, UCAD-SENEGAL, 1996.
- [12] Romanowsky A.and Wittry D.B., J.Appl.Phys.60 (8), pp. 1569-1579, 1987.
- [13] Park J-S., Lindholm F.A. and Neugroschel A., J.Appl.Phys.62 (3), pp. 948-953, 1987.
- [14] Donolato C., kittler M., J.Appl. Phys. 63 (5), pp. 1569-1579, 1988.
- [15] Reinhard kuhnert., J.Appl.Phys. 70 (1), pp. 476-484, 1991.
- [16] Paseman L., J.Appl.Phys. 69 (9), pp. 6387-6393, 1991.
- [17] Keung L.Luke, J.Appl. Phys. 76 (2), pp. 1081-1090, 1994.
- [18] Jean-Marc Bonard and Jean-Daniel Ganière. J.Appl.Phys. 79 (9), pp. 6987-6994, 1996.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

- [19] Gaye I., Corréa A., Ndiaye A. L., Nanema E., Ba A. B. B., Adj M. and Sissoko G.,
  "Impedance Parameters Determination of Silicon Solar Cell using the One Diode Model in Transient Study", *World Renewable Energy Congress, pp. 1598-1601, 1996.*
- [20] Sissoko G., Museruka C., Corréa A., Gaye I., Ndiaye A. L., 'Light Spectral Effect on Recombination Parameters of Silicon Solar Cell', World Renewable Energy Congress, pp. 1487-1490, 1996.
- [21] Barro I. F., Zerbo I., Lemrabott O. H., Zougmore F., Sissoko G., "Bulk and Surface Recombination Parameters Measurement in Silicon Double Sided Surface Field Solar Cell under Constant White Bias Light", Proc. 17th European PVSEC, (Munich, 2001), pp. 368-371.
- [22] Caputo D., Cerare G.De, Irrera F., Palma F. and Tucci M., J.Appl.Phys.76 (6), pp. 3524-3541, 1994.
- [23] Roos Macdonald J., J.Appl.Phys. 75 (2), pp 1059-1069, 1994.
- [24] Sissoko G., Corréa A., Nanéma E., Diarra M. N., Ndiaye A. L., Adj M., "Recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell", *World Renewable Energy Congress, pp. 1856-1859, 1998.*
- [25] Sissoko G., "Caractérisation par phénomènes transitoires de photopiles au silicium polycristallin", Thèse d'Etat, U.C.A.D, Dakar, Sénégal, 1993.
- [26] Sissoko G., Nanema E., Bocande Y. L. B, Ndiaye A. L., Adj M., "Minority Carrier Diffusion Length Measurement in Silicon Solar Cell under Constant White Bias Light", *World Renewable Energy Congress, pp. 1594-1597, 1996.*
- [27] Sissoko G., ''Etude des Phénomènes Transitoires dans les Cellules Photovoltaiques : Détermination de la Durée de Vie des Porteurs Minoritaires'', Thèse de 3ème Cycle, U.C.A.D, Dakar, Sénégal, 1986.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

#### Introduction

Pour améliorer la performance des cellules solaires, il est nécessaire de contrôler les différents processus de recombinaisons des porteurs de charges photocréés. Ces recombinaisons sont essentiellement les recombinaisons en volume [1,2] Shockey-Read-Hall, les recombinaisons en surface liées aux imperfections du réseau cristallin et les recombinaisons Auger [3,4] radiatives.

Ainsi pour avoir de bonnes caractéristiques des cellules solaires il faut non seulement miser sur l'amélioration des techniques de fabrication des cellules solaires mais aussi sur le contrôle et la maîtrise des paramètres de recombinaison. C'est pour cela que beaucoup de recherches se sont intéressées aux différentes méthodes de détermination des ces paramètres.

Dans ce premier chapitre nous passons en revue quelques travaux portant sur les photopiles à jonction verticale et sur les techniques de caractérisation des photopiles en régime statique.

#### I.1 Les photopiles à jonction verticale

#### Photopile à jonction verticale durcie (Vertical junction hardened solar cell) [5]

Dans cet article les auteurs ont fait la description d'une invention de cellule solaire pour une utilisation dans l'espace. Cette cellule solaire a été conçue de telle sorte que tous les porteurs de charges soient formés pratiquement près d'une jonction ce qui conduit à un rendement de 15% par rapport à 11% pour les cellules solaires classiques.

Ces cellules solaires résistent mieux au rayonnement solaire et ont été fabriquées de façon à ce que le rayonnement arrive parallèlement au plan de la jonction. C'est des cellules solaires à jonction verticale. Ces cellules peuvent être connectées soit en série, soit en parallèle ou soit en série-parallèle.

Une connexion des cellules en parallèle a été proposée comme l'indique la figure ci-après.



#### Figure I.1 : connexion en parallèle de trois cellules solaires à jonction verticale.

31, 32 et 33 représentent des cellules solaires reliées entre elles par soudure ultrasonore de l'aluminium. 34 est une bande d'aluminium reliant les cellules 31 et 32.

35 et 36 constituent les bornes de polarisation du dispositif.

# Analyse à une dimension des cellules solaires à jonction verticale (Vertical multijunction solar-cell one dimensional analysis) [6].

Cet article présente une étude à une dimension du courant de court-circuit, du courant de saturation, de la tension de circuit ouvert et de la puissance maximale d'une cellule solaire à jonction verticale.

Les auteurs de cet article ont souligné l'avantage des cellules solaires à jonction verticale par rapport aux cellules classiques ou conventionnelles. En effet avec les cellules à jonction verticale on peut augmenter le rendement en dopant fortement l'émetteur et la base sans diminuer les porteurs de charges photocréés.

Les pertes de porteurs dues aux recombinaisons diminuent lorsqu'on réduit la distance entre les jonctions de telle sorte qu'elle soit plus petite à la longueur de diffusion. Ce qui est possible avec une photopile à jonction verticale dont une représentation est donné ci-après.



<u>Figure I.2</u>: (A) structure d'une cellule solaire à jonction verticale; (B) configuration en parallèle; (C) configuration en série

La différence notée entre les configurations (B) et (C) est que pour la première les paires électron-trous arrivant à la jonction se séparent pour participer à la génération du courant tandis que pour la dernière les paires électron-trous arrivant au niveau du contact ohmique se recombinent.

Aussi le courant collecté avec la configuration en parallèle est double de celui collecté avec la configuration en série.

Cette étude a été faite en faisant les hypothèses suivantes :

- Pas de recombinaisons à la face avant et à la face arrière ;
- Pas de recombinaisons à la zone de charge d'espace ;
- Pas de réflexions sur les surfaces.

En tenant compte des hypothèses posées, cette étude a montré que le rendement de conversion d'une cellule solaire à jonction verticale est supérieur de 40% au rendement de conversion d'une cellule conventionnelle. D'où l'intérêt de s'intéresser à ces nouvelles types de cellules solaires.

#### Photopiles à jonction verticale (Vertical junction cells) [7].

L'auteur de cet article expose une méthode de fabrication d'une cellule solaire à jonction verticale. Il a présenté une structure de base d'une cellule solaire à jonction verticale. L'avantage

de ces types de cellules est que même avec de petites longueurs de diffusion, les porteurs peuvent être générés à travers toute la section transversale de la cellule.

Les deux types de connexion des cellules ont été représentées suivant les schémas (a) et (b) cidessous.



<u>Figure I.3 :</u> (a) connexion en série de cellules solaires à jonction verticale ; (b) connexion en parallèle de cellules solaires à jonction verticale

Toutefois lorsque l'éclairement est non-uniforme la connexion en série présente des difficultés qui peuvent être surmonté avec la connexion en parallèle.

#### La photopile solaire au silicium de Lamelle (The Lamella Silicon Solar Cell) [8] .

Un nouveau concept de photopile à jonction verticale constituée de lamelles a été développé dans cet article. L'objectif de cette étude est d'améliorer le rendement de la photopile en réduisant la distance qui sépare l'émetteur et l'endroit où les porteurs sont photocréés dans la base.

Pour ces photopiles les lamelles de 250  $\mu$ m de profondeur sont obtenues mécaniquement à l'aide d'une scie découpante munie d'une lame mince large de 15  $\mu$ m qui crée dans la partie antérieure de la photopile des fentes de profondeur 170  $\mu$ m. La largeur de ces lamelles varie de 50 à 100  $\mu$ m selon que la photopile est monocristalline ou polycrystalline.

Selon la structure des lamelles on distingue deux types de conceptions de photopile de lamelles:

- La photopile de lamelles dont les grilles en forme de doigts se trouvent sur des plateaux (figure I.4)
- La photopile de lamelles dont les grilles en forme de doigts se trouvent sur le long d'un côté particulier au niveau des bouts affilés de lamelles (figure I.5).

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016



<u>Figure I.4 :</u> photo montrant les doigts d'une grille de cellule de lamelles se trouvant sur des plateaux.



<u>Figure 1.5</u>: photo montrant les doigts d'une grille de cellule de lamelles se trouvant sur un côté particulier de chaque deuxième bout marquée par des flèches.

Pour affiler les lamelles, on peut le faire mécaniquement avec une lame sciante biseautée (comme aux figures I.4 et I.5) ou faire une gravure par passage à l'acide fort (figure I.6). L'inconvénient de cette dernière option est l'amincissement extrême des lamelles et de la largeur élevée des fentes.



<u>Figure I.6 :</u> photo montrant les doigts d'une grille de cellule de lamelles se trouvant sur un côté de chaque deuxième bout de lamelle après une longue gravure à l'acide fort.

On couvre les cellules d'oxyde en les exposants à la lumière suivant un angle par rapport à l'ombre d'une lamelle (traitement par photolithographie superficielle SAP). Voir images ci-après.



<u>Figure I.7 :</u> image d'une cellule de lamelles exposée en une durée courte à la lumière qui vient de la gauche.



*Figure I.8 : image d'une cellule de lamelles exposée en des durées différentes à la lumière qui vient de la gauche.* 

Selon la largeur des lamelles et la nature du matériau de base les cellules de lamelles sont réparties en trois groupes:

- Cellules de lamelles monocristallines
- Cellules de lamelles polycristallines
- Cellules de lamelles de Bayer RGS

Les auteurs ont obtenu avec les cellules de lamelles monocristallines un rendement de 15,9% pour un grain de 4 cm<sup>2</sup> avec une simple couche antireflet ARC.

#### I.2 Techniques de caractérisation des photopiles en régime statique

# External Electric Field Influence on Charge Carriers and Electrical Parameters of Polycrystalline Silicon Solar Cell [9].

Cet article étudie l'effet d'un champ électrique de polarisation sur une photopile au silicium à jonction horizontale sous illumination polychromatique en régime statique.

La polarisation électrique est obtenue en appliquant une différence de potentiel à la photopile (voir figure).



# <u>Figure I.9</u>: photopile solaire au silicium de type n-p-p<sup>+</sup> sous polarisation électrique externe. La polarisation externe crée un champ électrique interne qui influence sur le mouvement total des porteurs. Le champ $\vec{E}$ est la somme du champ électrique externe résultant de la polarisation et du champ électrique interne de la photopile. Donc $\vec{E} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{int}$

En tenant compte du champ électrique de polarisation une nouvelle relation de l'équation de continuité a été donnée.

$$\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} + \frac{L_E}{L_n^2} \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} - \frac{\partial(x)}{L_n^2} + \frac{G(x)}{D_n} = 0$$
 (I-1)

Avec  $L_E = \mu \cdot E \cdot \frac{L_n^2}{D_n}$  où  $L_n$  est la longueur de diffusion,  $D_n$  est le coefficient de diffusion,  $\mu$  la mobilité des porteurs et E le champ électrique.

G(x) représente le taux de génération des porteurs à la position x :  $G(x) = \sum_{i=1}^{3} a_i e^{-b_i \cdot x}$  et  $\delta(x)$  la

densité des porteurs minoritaires.

L'expression de la densité des porteurs minoritaires, du photocourant, de la phototension et de la vitesse de recombinaison à la face arrière toutes dépendantes du champ électrique ont été déterminées. L'effet du champ électrique de polarisation sur ces paramètres a été analysé.

Il ressort de cette étude que le champ électrique de polarisation augmente la mobilité des porteurs près de la jonction. Ainsi les porteurs acquièrent une énergie suffisante pour traverser la jonction et participer au photocourant. Cela entraîne un élargissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace qui conduit à l'augmentation du courant de court-circuit.

On note une diminution de la tension de circuit ouvert, de la vitesse de recombinaison en face arrière ainsi que les recombinaisons en volume lorsque le champ électrique de polarisation augmente.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multi spectral constant en régime statique [10].

Dans cet article, les auteurs ont proposé des techniques de détermination des paramètres de recombinaison et leur domaine de validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multispectral.

Après une étude théorique, les auteurs ont fait une étude expérimentale pour déterminer les paramètres tels que la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  et les vitesses de recombinaison intrinsèque à la jonction  $S_{f\alpha}$  et en face arrière  $S_{b\alpha}$ .

Pour déterminer la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  deux méthodes ont été élaborées. Il s'agit de la technique de l'intersection des courbes expérimentale et théorique des courants de courtcircuit (T.I.C.C.C) et de la technique de l'intersection du rapport des courants de court-circuit (T.I.R.C.C.C).

En effet en faisant tendre la dérivée de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction vers zéro, on obtient l'expression du courant de court-circuit qui dépend uniquement de la longueur de diffusion.

$$\frac{\partial J_{ph\alpha}}{\partial S_{f\alpha}} = 0 \tag{I-2}$$

A partir des relations mathématiques de la densité du courant de court-circuit obtenues les courbes théoriques des courants de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion pour les trois modes d'éclairement ont été représentées.

Aussi les auteurs ont tracé le profil du rapport de densité de photocourant de court-circuit  $\varepsilon(L) = \frac{J_{CC1}(L)}{J_{CC2}(L)}$  en fonction de la longueur de diffusion.

Les courbes expérimentales des courants de court-circuit sont obtenues par mesure à partir du dispositif suivant.



#### Figure I.10 : dispositif expérimental.

Ce dispositif expérimental est constitué:

- d'une photopile bifaciale au silicium de 27 cm<sup>2</sup>;
- d'un voltmètre numérique de type métrix ;
- d'une résistance R faible de 1 Ω ;
- d'un interrupteur K et
- de deux sources lumineuses multi spectrales (deux lampes de 100 W).

Lorsque l'interrupteur K est ouvert, la photopile est en parallèle avec le voltmètre qui mesure la tension du circuit ouvert (Vco).

Quand l'interrupteur K est fermé, la photopile et le voltmètre sont shuntés par la résistance R. Dans ce cas, le voltmètre mesure la tension de court-circuit (Vcc) qui donne directement la valeur du courant de court-circuit suivant la loi d'Ohm  $V_{CC} = R \cdot I_{CC}$  avec  $R = 1 \Omega$ .

Les auteurs ont tracé sur le même repère les courbes expérimentale et théorique des densités de courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion. Avec la technique T.I.C.C.C la longueur de diffusion effective L<sub>eff</sub> est déterminée en projetant le point d'intersection des courbes expérimentale et théorique de la densité des courants de court-circuit sur l'axe des abscisses.



<u>Figures 1.11</u>: Densité de photo courant de court-circuit en fonction de la longueur de diffusion L pour différents niveaux d'éclairement  $n : D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}, H = 0.03 \text{cm} : (a)$  éclairement face avant ; (b) éclairement face arrière.



<u>Figure I.12</u>: Détermination de la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  à partir de la densité de courant de court-circuit pour un éclairement simultané sur les deux faces : n =0.312, D=26 cm<sup>2</sup>/s, H =0.03 cm.

En utilisant la technique T.I.R.C.C.C la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  est obtenue en projetant le point d'intersection des courbes expérimentale et théorique du rapport des densités des courants de court-circuit sur l'axe des abscisses.



<u>Figure I.13</u>: Technique de détermination de la longueur de diffusion effective en fonction du rapport des courants de court-circuit :  $D = 26 \text{ cm}^2/\text{s}$ , H = 0.03 cm, n = 0.375.

Pour la détermination de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction  $S_{f\alpha}$  les auteurs ont utilisé la technique de l'intersection des courbes de tension de circuit ouvert (T.I.C.T.C.O).

Cette technique consiste à représenter sur le même repère les courbes expérimentale et théorique de la tension de circuit ouvert. Le point d'intersection de ces courbes projeté sur l'axe des abscisses donne la valeur de la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction  $S_{f0}$  pour chaque mode d'éclairement.

Quant à la vitesse de recombinaison intrinsèque en face arrière  $S_{b\alpha}$  on l'obtient en remplaçant la valeur de la longueur de diffusion effective correspondante dans l'expression de la vitesse de recombinaison en face arrière  $S_b$  suivant chaque mode d'éclairement.

Dans cet article les auteurs ont également fait l'étude des incertitudes sur la détermination de la longueur de diffusion effective pour mettre en évidence la fiabilité des techniques étudiées.

Il en résulte que l'incertitude sur la longueur de diffusion effective  $L_{eff}$  est intimement liée à la qualité de mesure des courants de court-circuit. Aussi ces techniques présentent des limites d'applicabilité pour les grandes longueurs de diffusion des photopiles.

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 [11].

Les auteurs de cet article ont fait une classification des cellules solaires en déterminant des valeurs spécifiques de la vitesse de recombinaison à la face arrière lorsque la cellule fonctionne en court-circuit et en circuit ouvert. Ils ont montré que lorsque la vitesse de recombinaison à la

face arrière de la photopile est égale à ces valeurs spécifiques, l'épaisseur H n'a pas d'effet sur la réponse de la cellule. Cela permet de réduire l'épaisseur sans pour autant diminuer le rendement de la cellule solaire.

Cette étude a été menée sur une photopile au silicium polycristallin de type  $n^+-p-p^+$  éclairée par la face avant comme le montre la figure ci-dessous :

Space charge region (SCR)



#### Figure I.14 : photopile solaire éclairée par sa face avant.

Les auteurs ont travaillé sur la base des hypothèses suivantes :

- La contribution de l'émetteur est négligée ;
- Le champ électrique à la surface arrière est pris en compte tout en négligeant le champ cristallin de la base.

En partant de l'équation de continuité, l'expression de la densité des porteurs minoritaires, celle de la densité de photocourant et celle de la phototension ont été déterminées.

L'expression de la densité de photocourant de court-circuit a été déduite de celle de la densité de

photocourant par la relation  $J_{sc}(Sb, H) = \lim_{Sf \to \infty} (J_{ph}(Sf, Sb, H))$  où Sf représente la vitesse de

recombinaison à la jonction ; Sb la vitesse de recombinaison en face arrière et H l'épaisseur de la base.

Le profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière pour différentes valeurs de l'épaisseur H a été représenté.



<u>Figure I.15</u>: densité de photocourant de court-circuit en fonction de la vitesse de recombinaison en face arrière Sb (L=0,01 cm ; D= 26 cm<sup>2</sup>/s)

Les auteurs remarquent sur cette figure qu'il existe une valeur particulière de la vitesse de recombinaison en face arrière à laquelle l'épaisseur de la cellule n'a pas d'effet sur la densité de photocourant de court-circuit mais aussi sur la densité de photocourant comme l'illustre la figure ci-dessous.



<u>Figure I.16</u>: densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf (Sb=Sbi= 1002 cm/s ; L=0,01 cm ; D= 26 cm<sup>2</sup>/s)

La vitesse de recombinaison en face arrière correspondante à cette valeur particulière nommée Sbi permet de classifier les cellules solaires selon la réponse obtenue.

La densité de photocourant de court-circuit diminue avec l'augmentation de l'épaisseur H si Sb < Sbi, elle augmente avec l'épaisseur H si Sb > Sbi.

L'expression de la tension de circuit ouvert donnée par  $V_{oc}(Sb) = \lim_{Sf \to 0} (V_{ph}(Sf, Sb,))$  a permis

de représenter le profil de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison à la face arrière Sb pour différentes valeurs de l'épaisseur de la base.



<u>Figure I.17</u>: phototension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison en face arrière Sb (L=0,01 cm ; D= 26 cm<sup>2</sup>/s)

Sur cette figure les auteurs ont déterminé la valeur particulière Sba de la vitesse de recombinaison en face arrière pour laquelle la phototension de circuit ouvert est la même quelque soit l'épaisseur H de la base.

Lorsque la vitesse de recombinaison en face arrière est égale à Sba, l'épaisseur de la base n'influence pas sur la réponse de la photopile comme le confirme la figure I.18.



<u>Figure I.18</u>: phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf  $(Sb=Sba=2508 \text{ cm/s}; L=0,01 \text{ cm}; D=26 \text{ cm}^2/\text{s})$ 

Dans cet article également la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction a été déterminée

en appliquant la condition  $\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_b} = 0$ . Ce qui donne :

$$S_{f0} = \frac{D \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} (K \cdot \alpha)) - \frac{D}{L} \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot e^{-\alpha \cdot x}) \cdot \cosh(\frac{H}{L}) - D \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha_{\lambda} \cdot x}) \cdot \sinh(\frac{H}{L})}{L \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot x}) \cdot \cosh(\frac{H}{L}) - (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot e^{-\alpha \cdot x}) \cdot \sinh(\frac{H}{L}) - \sum_{\lambda=1}^{45} K}$$
(I-3)

Quant à la vitesse de recombinaison en face arrière elle est obtenue en appliquant la condition

$$\frac{\partial J_{ph}}{\partial S_f} = 0. \tag{I-4}$$

Cela implique que

$$S_{b} = \frac{D \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} (K \cdot \alpha)) \cdot \sinh(\frac{H}{L}) - \frac{D}{L} \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K) \cdot \cosh(\frac{H}{L}) - D \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha_{\lambda} \cdot x})}{(\sum_{\lambda=1}^{45} K) \cdot \sinh(\frac{H}{L}) - L \cdot (\sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot \alpha) \cdot \cosh(\frac{H}{L}) - \sum_{\lambda=1}^{45} K \cdot e^{-\alpha \cdot x}}$$
(I-5)

Ces deux vitesses Sf0 et Sb ont été représentées en fonction de la longueur de diffusion.


<u>Figure I.19</u>: vitesse de recombinaison <u>Figure I.20</u>: vitesse de recombinaison à la intrinsèque à la jonction Sf0 en fonction de la face arrière Sb en fonction de la longueur de longueur de diffusion (H=0,03 cm; D= 26 diffusion (H=0,03 cm; D= 26 cm<sup>2</sup>/s)  $cm^{2}/s$ )

Ces deux figures montrent que  $Sf_0$  et Sb sont des fonctions décroissantes de la longueur de diffusion. Ces deux paramètres traduisent les pertes de porteurs par recombinaison à la jonction et à la face arrière.

Pour les faibles longueurs de diffusion, la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction  $Sf_0$  est très élevée. Ce qui implique une valeur importante de la résistance shunt qui caractérise les fuites de courant.

La figure I.20 ci-dessus a permis aux auteurs de distinguer trois types de cellules solaires :

- Les cellules solaires ohmiques où la vitesse de recombinaison à la face arrière est très élevée et la longueur de diffusion faible. Ces types de cellules conduisent à une recombinaison importante des porteurs à la face arrière.
- Les cellules solaires à champ arrière BSF (Back Surface Field) où la vitesse de recombinaison à la face arrière est faible et la longueur de diffusion élevée. Ces types de cellules réduisent les recombinaisons des porteurs à la face arrière.
- Les cellules solaires de longueur de diffusion moyenne qui ne sont ni ohmiques ni à champ arrière.

## Determination Of The Junction Surface Recombination Velocity Limiting The Open Circuit (Sfoc) For A Bifacial Silicon Solar Cell Under External Electric Field [12].

Cet article analyse l'effet d'un champ électrique de polarisation sur la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert et sur la phototension de circuit ouvert. Dans ce travail les

auteurs ont exposé une technique de détermination de la valeur du champ électrique de polarisation limitant le circuit ouvert d'une photopile bifaciale sous polarisation électrique.

En effet après avoir déterminé les expressions de la densité des porteurs minoritaires dans la base et de la phototension, la phototension de circuit ouvert a été donnée suivant la relation :

$$V_{oc} = \lim_{Sf \to Sfoc} V_{ph}(Sj) \tag{I-6}$$

avec Sf la vitesse de recombinaison à la jonction et Sfoc la vitesse de recombinaison à la jonction

limitant le circuit ouvert. 
$$S_{foc} = \frac{(D \cdot \beta \cdot E - F)(D \cdot b_i \cdot E \cdot e^{-b_i \cdot H} + G) - (G - D \cdot b_i \cdot E)(D \cdot \beta \cdot E - F)}{E(D \cdot \beta \cdot E - F)e^{-b_i \cdot H} + E(D \cdot b_i \cdot E \cdot e^{b_i \cdot H} + G)}$$
(I-7)  
Avec  $E = (D \cdot \beta + Sb) \cdot sh(\phi \cdot H) + D \cdot \phi \cdot ch(\phi \cdot H)$   
 $F = [D \cdot \phi \cdot sh(\phi \cdot H) + (D \cdot \beta + Sb) \cdot ch(\phi \cdot H)] \cdot \phi \cdot D$   
 $G = D \cdot \phi \cdot (Sb + D \cdot b_i) \cdot e^{-H \cdot (\beta + b_i)}$   
 $Sb = \frac{\mu \cdot E \cdot D \cdot \phi \cdot ch(\phi \cdot H) - [D^2 \cdot \alpha^2 - (\mu \cdot E + D \cdot \beta)D \cdot \beta]sh(\phi \cdot H)}{D \cdot \phi \cdot ch(\phi \cdot H) - (\mu \cdot E + D)sh(\phi \cdot H)}$ 

Les profils des valeurs relatives de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert et de la phototension de circuit ouvert ont été représentés sur le même graphe en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure I.21</u>: Valeurs relatives de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert Sfoc et de la phototension de circuit ouvert Voc en fonction du champ électrique  $(D=26 \text{ cm}^2/\text{s}; \mu=10^3 \text{ cm}^2.V^1.\text{s}^{-1}; \tau=10^{-5}\text{s})$ 

On remarque que lorsque le champ électrique augmente les valeurs relatives de la phototension de circuit ouvert diminuent alors que celles de la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert augmentent.

En effet le champ électrique augmente le flux de porteurs de charges qui traverse la jonction. Cela augmente la vitesse de recombinaison à la jonction limitant le circuit ouvert et diminue le nombre de porteurs stockés à la jonction ce qui réduit la phototension de circuit ouvert.

La projection sur l'axe des abscisses du point d'intersection de ces deux courbes permet de trouver la valeur du champ électrique limitant le circuit ouvert. Les auteurs ont trouvé une valeur égale à 9,3 V/cm. Cette étude a également montré que les valeurs de la phototension de circuit ouvert sont plus importantes avec un éclairement simultané que lorsqu'on éclaire seulement par la face avant.

#### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude bibliographique sur la technologie de fabrication des nouveaux types de photopiles : les photopiles à jonction verticale et sur quelques techniques de caractérisation des photopiles en régime statique.

Il ressort de cette étude que les photopiles à jonction verticale présentent un avantage par rapport aux photopiles conventionnelles. En effet pour ces nouveaux types de photopiles, la lumière qui arrive parallèlement à la jonction permet de générer des porteurs de charges près de la jonction ce qui augmente la quantité de porteurs qui participent au photocourant.

Pour la caractérisation des photopiles la plupart des travaux s'intéressent à la détermination des paramètres phénoménologiques comme la longueur de diffusion, la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction et la vitesse de recombinaison en face arrière. Ces études sont faites sur des photopiles à jonction horizontale.

Toutefois la caractérisation des paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale n'a pas été abordée. Aussi la lumière incidente qui illumine une photopile s'atténue en profondeur d'où l'intérêt d'étudier l'effet de la profondeur de pénétration de la lumière sur les porteurs de charges et les paramètres électriques d'une photopile. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est aussi influencé par les facteurs externes comme un champ électrique qui règne à son voisinage. Donc il est important de prendre en compte ce paramètre pour une bonne caractérisation de la photopile.

C'est dans ce cadre que nous étudions dans cette thèse l'effet de la profondeur de la base et d'un champ électrique de polarisation sur les paramètres d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique et en régime statique.

On va étudier l'effet de la profondeur de la base au chapitre II et celui du champ électrique au dernier chapitre.

#### **Références bibliographiques**

- [1] Ricaud A., "Photopiles solaires", Presses Polytechniques et Universitaires romandes. Lausanne, Suisse, 1997.
- [2] Solar Energy 24 Hours a day, Business Week, 6/17/96, p.91
- [3] Moller H. J, "Semiconductors for solar cells", Artech house, 1993.
- [4] Equer B., 'Energie Solaire Photovoltaïque', volume1, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, sous la direction de (Ellipses, Unesco, 1993)
- [5] Wise J. F., "Vertical junction hardened solar cell," U.S patent 3690953, 1970.
- [6] Gover A. and Stella P., "Vertical multijunction solar-cell one dimensional analysis," IEEE Transactions on electron devices, 21(6), pp. 351-356, 1974.
- [7] Green M. A., "Silicon solar cells: Advanced principles & practice," Center for photovoltaic devices and systems university of new south wales, pp. 259-26, 1995.
- [8] Terheiden B., Hahn G., Fath P., Bucher E., "The Lamella Silicon Solar Cell", 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference Glasgow, part II, pp.1377-1380, 2000.
- [9] Zoungrana M., Dieng B., Lemrabott O.H., Touré F., Ould El Moujtaba M.A., Sow M.L. and Sissoko G., "External Electric Field Influence on Charge Carriers and Electrical Parameters of Polycrystalline Silicon Solar Cell", *Research Journal of applied sciences, Engineering and technology*, 4(17), 2967-2972, 2012.
- [10] Ly I., Lemrabott O.H., Dieng B., Gaye I., Gueye S., Diouf M.S. and Sissoko G., "Techniques de détermination des paramètres de recombinaison et le domaine de leur validité d'une photopile bifaciale au silicium polycristallin sous éclairement multi spectral constant en régime statique", *International Journal of Emerging Trends Technology in Computer Science* (*IJETTCS*), 1(3), pp. 2278-6856, 2012.
- [11] Diassé O., Same R.S, Diallo H.L, Ndiaye M., Thiam Nd., Mbodji S. and Sissoko G. '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), ISSN: 2278-6856 1(3), pp. 55-59, 2012.*
- [12] Diouf M.S., Sahin G., Thiam A., Faye Kh., Ngom M.I., Gaye D. and Sissoko G.,"Determination Of The Junction Surface Recombination Velocity Limiting The Open Circuit

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

(Sfoc) For A Bifacial Silicon Solar Cell Under External Electric Field" *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJISET), ISSN: 2348-7968 2(9), pp. 931-938, 2015.* 

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

Chapitre II: Influence de la profondeur z de la base sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique.

### Introduction

Dans le souci d'améliorer le rendement des photopiles, une nouvelle génération de cellules solaires appelées photopiles à jonction verticale a été inventée [1]. Ces photopiles sont de deux types : les photopiles à jonction verticale série et celles à jonction verticale parallèle [1] - [3]. Pour la caractérisation des cellules solaires beaucoup de recherches ont porté sur l'étude du comportement des porteurs photocréés au sein d'une photopile à jonction horizontale [4] et d'une photopile à jonction verticale [5]. Ces études ont été faites en présence d'un champ électrique [6, 7], d'un champ magnétique [8, 9] ou sous l'effet simultané d'un champ électrique et

magnétique [10].

Pour l'ensemble des travaux en ce qui concerne les photopiles à jonction verticale parallèle en régime statique l'effet de la profondeur de pénétration de la lumière incidente n'a pas été suffisamment traité. C'est dans ce contexte que nous étudions dans ce chapitre, le comportement des porteurs minoritaires et des paramètres électriques en fonction de la profondeur z d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle. L'intérêt de ce type de photopile réside du fait que la base dans laquelle se fait l'essentiel de notre étude est au milieu de deux jonctions à travers lesquelles les porteurs traversent pour participer à la collecte.

Ainsi, après la résolution de l'équation de continuité nous ferons une analyse de l'effet de la profondeur Z sur la densité des porteurs de charges minoritaires dans la base. Nous étudierons également l'influence de la profondeur sur les paramètres électriques et sur le rendement de conversion de la photopile.

### **II.1 PRESENTATION DE LA PHOTOPILE A JONCTION VERTICALE PARALLELE**

On considère à la figure II.1 une série de photopiles à jonction verticale connectées en parallèle et à la figure II.2 une photopile au silicium de type n-p-n à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique.



Figure II.1 : Série de photopiles à jonction verticale connectées en parallèle.



## <u>Figure II.2</u> : structure d'une photopile au silicium de type n-p-n à jonction verticale sous éclairement polychromatique constant

Une série de photopiles à jonction verticale parallèle est constituée d'un ensemble de cellules dont les bases sont connectées entre elles et les émetteurs entre eux (figure II.1). L'ensemble est éclairé par une lumière dont les rayons arrivent parallèlement à la jonction.

Dans le cas de notre étude, les cellules connectées sont de type n-p-n et chacune d'elle est constituée essentiellement de trois zones :

- L'émetteur dopé de type n de faible épaisseur (de l'ordre de 1 µm) mais fortement dopé en atomes donneurs (de l'ordre de 10<sup>17</sup> à 10<sup>19</sup> atomes/cm<sup>3</sup>). Dans cette zone les porteurs de charges minoritaires sont les trous.
- La base dopée de type p d'épaisseur assez importante (de l'ordre de 200 à 400 μm) mais peu dopée en atomes accepteurs (de l'ordre de 10<sup>15</sup> à 10<sup>17</sup> atomes/cm<sup>3</sup>). Ici, les porteurs de charges minoritaires sont les électrons.
- L'interface base-émetteur appelée jonction ou zone de charge d'espace (ZCE) où règne un champ électrique intense qui sépare les paires électrons-trous arrivant à la jonction.

#### HYPOTHESES

Dans ce travail nous tenons compte des hypothèses suivantes :

- La contribution de l'émetteur est négligée par conséquent toute l'étude sera faite dans la base d'épaisseur x et de profondeur z.
- Le taux de dopage de la base est uniforme donc le champ cristallin est quasi-nul (théorie de la base quasi-neutre QNB) [11].
- L'éclairement est considéré uniforme sur le plan z = 0 de la photopile ce qui fait que le taux de génération ne dépendra que de la profondeur z de la base.
- Nous travaillons à une dimension (1D) ainsi nous associons à la base un repère d'axe
   (x, z) dont l'origine x = 0 est prise à la zone de charge d'espace et l'épaisseur x = H = 300 µm.
- Pour étudier l'effet de la profondeur sur les paramètres de la photopile, nous travaillerons avec une profondeur z comprise entre 20 et 50 µm. En effet pour une bonne caractérisation de la photopile il est important d'avoir une faible valeur de la résistance série dont l'effet se traduit sur le facteur de forme et une grande valeur de la densité de photocourant [12], [13]. Mais l'augmentation de la profondeur z entraîne une augmentation de la résistance série et une diminution du photocourant. D'où l'intérêt de travailler avec de faibles valeurs de la profondeur z.

Lorsqu'une photopile est éclairée par une lumière d'énergie supérieure ou égale à l'énergie du gap du matériau semi-conducteur (le silicium) il y'a création de paires électron-trou. Ces porteurs de charges une fois séparés diffusent dans la base. Les électrons qui sont majoritaires dans la base diffusent vers la jonction pour participer à la production du courant.

La répartition des électrons dans la base de la photopile est régie par l'équation de continuité que nous étudions au paragraphe suivant.

## **II.2 RESOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUITE**

Les porteurs de charges photogénérés dans une photopile diffusent ou se recombinent soit en surface ou en volume. Ces phénomènes de génération, de diffusion et de recombinaison sont régis par l'équation de continuité. Cette équation en régime statique est donnée par :

$$G(z) + D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - R(x) = 0$$
 (II-1)

• Avec G(z) le taux de génération des porteurs à la profondeur z [14] :

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

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

où  $a_i$  et  $b_i$  sont les coefficients tabulés du rayonnement sous A.M = 1,5 [15].

## <u>Tableau II.1</u>: Les différentes valeurs des coefficients tabulés a<sub>i</sub> et b<sub>i</sub> du rayonnement solaire sous AM=1.5

| $a_i (cm^{-3}.s^{-1})$ | $b_i (cm^{-1})$      |
|------------------------|----------------------|
| $a_1 = 6, 13.10^{20}$  | b <sub>1</sub> =6630 |
| $a_2=0,54.10^{20}$     | b <sub>2</sub> =1000 |
| $a_3=0,0991.10^{20}$   | b <sub>3</sub> =130  |

•  $D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2}$  est le terme de diffusion où D représente le coefficient de diffusion des

porteurs de charges ;

• R(x) est le taux de recombinaison des porteurs à la positon x [16] :

$$R(x) = \frac{\delta(x)}{\tau}$$
(II-3)

•  $\delta(x)$  la densité des porteurs minoritaires photocréés à la position x de la base.

La solution de l'équation de continuité est donnée par l'équation (II-4) ci-dessous

$$\delta(x,z) = Ach(\frac{x}{L}) + Bsh(\frac{x}{L}) + \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z}$$
(II-4)

Avec  $C_i = a_i \cdot \frac{L^2}{D}$  où L es la longueur de diffusion.

Les conditions appliquées à l'interface émetteur-base et au milieu de la base nous permettent de déterminer les constantes A et B de l'équation (II-4) [15], [17] :

- A la jonction émetteur-base (en x=0)  $D \cdot \frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x,z)\Big|_{x=0}$  (II-5)
- Au milieu de la base (en x=H/2)  $\frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=\frac{H}{2}} = 0$  (II-6)

Dans l'équation (II-5) Sf représente la vitesse de recombinaison à la jonction. Elle est égale à la somme de la vitesse de recombinaison intrinsèque notée Sfo (induite par la résistance shunt et ne dépendant que des paramètres intrinsèques de la photopile) et de la vitesse de recombinaison

Sfj qui traduit le courant de fuite induite par la charge externe et qui définit le point de fonctionnement de la photopile. Sf = Sfo + Sfj [18], [19].

La densité des porteurs minoritaires de charges dans la base de la photopile déterminée à l'équation (II-4) est étudiée dans le paragraphe qui suit.

### II.3 Densité des porteurs minoritaires

La figure II.3 représente les différentes courbes de variation de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la base pour quatre valeurs de la profondeur z.





Sur cette figure, nous notons une symétrie des différentes courbes de la densité au milieu de la base(en x = H/2). En effet notre modèle de photopile est en jonction verticale parallèle, donc la base dans laquelle se fait notre étude est entre deux jonctions qui contribuent de la même façon. Ainsi pour une courbe donnée, on observe trois zones :

- x < H/2, le gradient des porteurs est positif : les électrons situés dans cette zone peuvent traverser la jonction 1 pour participer à la collecte des porteurs.
- x=H/2, le gradient des porteurs est nul correspondant au maximum de la densité des porteurs minoritaires: les électrons photogénérés en ce point s'écoulent à travers les deux jonctions de part et d'autre de la base.

x > H/2, le gradient des porteurs est également positif par rapport à l'émetteur 2, les électrons photocréés sur cette zone peuvent traverser la jonction 2 pour participer au photocourant.

Par ailleurs, pour des valeurs de Z croissantes, la densité des porteurs de charge décroît. Cela s'explique par le fait qu'il y'a une faible génération de porteurs en profondeur. En effet, la lumière incidente s'atténue en profondeur. Cela entraîne une diminution du taux de génération d'où la diminution de la densité des porteurs lorsque Z augmente.

L'étude de la densité des porteurs minoritaires dans la base nous amène à étudier dans le paragraphe suivant la densité de photocourant générée au sein de la photopile.

## II.4 Densité de photocourant

Les électrons photocréés au sein de la base et ayant parvenus à traverser la jonction sont collecter dans un circuit extérieur pour générer un courant. L'expression de la densité de photocourant d'une photopile est exprimée en fonction du gradient de la densité des porteurs minoritaires par la relation :

$$J_{ph} = 2 \cdot q \times D \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \bigg|_{x=0}$$
(II-7)

avec q la charge de l'électron.

On représente à la figure II.4 la variation de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur et à la figure II.5 le photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur.



<u>Figure II.4</u> : Profil du photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)



## <u>Figure II.5</u>: Profil du photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur ( $D=26 \text{ cm}^2/\text{s}$ ; L=0,01 cm)

On note à la figure II.4 une augmentation du photocourant lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente. En effet la vitesse de recombinaison à la jonction traduit le flux de porteurs qui traverse les jonctions pour participer au photocourant. Plus elle augmente, plus les porteurs sont balayés vers les jonctions augmentant ainsi la densité de photocourant.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

Aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant est presque nulle traduisant le fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. Les porteurs photocréés sont ainsi bloqués à la jonction.

Aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, la densité de photocourant est maximale et correspond au photocourant de court-circuit. La photopile fonctionne en situation de court-circuit où le maximum de porteurs traverse les jonctions pour participer au photocourant.

Cette figure nous montre également la diminution de la densité de photocourant de court-circuit lorsque la profondeur z de la base augmente, ce qu'illustre en effet la figure II.5. L'intensité de la lumière incidente diminue en profondeur. Dans ce cas il y'a moins de porteurs photogénérés, en conséquence la densité de photocourant diminue.

Pour chaque épaisseur de couche z de la photopile la densité de courant collectée est

$$J_{ph} = 2 \cdot q \times D \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \bigg|_{x=0}$$

Le courant total photogénéré dans une photopile d'épaisseur de couche  $z = z_{max}$  = h est obtenu en intégrant sur z la densité de photocourant  $J_{ph}$ .

$$J_T = \int_0^h J_{ph} \cdot dz \qquad (II-8)$$

Ci-dessous est représenté le profil du courant total photogénéré au sein d'une photopile d'épaisseur de couche  $z = z_{max} = h$ .



THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

## <u>Figure II.6</u> : Profil du photocourant total en fonction de l'épaisseur de couche z = h de la photopile (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)

On remarque l'augmentation de la densité de photocourant totale collectée avec l'épaisseur de couche z = h. De plus on note que la densité de photocourant est maximale et constante à partir d'une épaisseur de couche z = h = 0,04 cm.

Dans le paragraphe suivant, nous avons étudié la phototension qui caractérise la barrière de potentiel de la photopile.

#### **II.5 La phototension**

Les électrons qui ont diffusé vers la jonction et n'ayant pas suffisamment d'énergie pour traverser celle-ci s'accumule au voisinage de la zone de charge d'espace. Cette accumulation de charges au niveau de la jonction crée une différence de potentiel définie par la phototension. La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann :

$$V_{ph} = V_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{N_B}{n_i^2} \cdot \delta(0, z) \right) + 1 \right]$$
(II-9)

avec V<sub>T</sub> la tension thermique :  $V_T = \frac{k.T}{q}$ ; N<sub>B</sub> le taux de dopage dans la base ; n<sub>i</sub> la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires ; k la constante de Boltzmann ; T la température absolue et q la charge de l'électron.

Les figures II.7 et II.8 représentent respectivement la variation de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur et celle de la phototension de circuit ouvert en fonction de la profondeur.



THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

<u>Figure II.7</u>: Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm)



<u>Figure II.8</u> : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de la profondeur (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm)

On remarque à la figure II.7 que la phototension est maximale et égale à la phototension de circuit ouvert pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf) puis elle diminue jusqu'à tendre à une valeur presque nulle aux grandes valeurs de Sf (au voisinage du court-circuit). En effet pour de faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, les porteurs de charges n'acquièrent pas une énergie suffisante pour traverser la jonction. Ainsi, ces porteurs se trouvent bloqués à la jonction augmentant dès lors la phototension. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison, les porteurs de la vitesse de recombinaison. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison, les porteurs arrivent à traverser la jonction entraînant par la suite la baisse considérable de la phototension.

Lorsque la profondeur augmente, le nombre de porteurs photocréés diminue. Cela entraîne aussi la diminution de la phototension de circuit ouvert ce qui confirme d'ailleurs la figure II.8.

A présent nous étudions dans le paragraphe qui suit la caractéristique I-V de la photopile.

## II.6 Caractéristique I-V

La figure II.8 ci-après représente le profil du photocourant en fonction de la phototension.



<u>Figure II.9</u> : Caractéristique I-V de la photopile pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm)

On constate sur cette figure que la densité de photocourant est maximale aux faibles valeurs de la phototension correspondant au photocourant de court-circuit puis elle diminue pour les grandes valeurs de la phototension correspondant au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert. On note également la diminution de la densité de photocourant et celle de la phototension lorsque la profondeur z augmente.

A partir de la caractéristique courant-tension de la photopile, des études ont montré que la photopile se comporte comme [12], [20] :

- un générateur de tension réel au voisinage du circuit ouvert,
- un générateur de courant réel au voisinage du court-circuit.

Dans chaque cas de fonctionnement, un schéma équivalent de la photopile a été proposé. Ces schémas permettent de déterminer les résistances série et shunt.

## II.7 La résistance série

La résitance série caractérise les chutes ohmiques et les effets résistifs du matériau et du dispositif de contact. Elle est l'un des paramètres électriques qui diminue la performance d'une cellule solaire. Il est donc important de déterminer ce paramètre pour une bonne caractérisation de la cellule solaire. Il existe plusieurs méthodes de détermination de la résistance série [12], [13], [20], [21].

Dans ce chapitre, nous faisons sa détermination en considérant le fonctionnement de la photopile en situation de circuit ouvert. La figure II.10 ci-dessous représente le schéma équivalent de la photopile au voisinage du circuit ouvert [19], [20] : où Jph et Vph sont respectivement la densité de photocourant et la phototension ; Rs la résistance série ; Rch la résistance de charge et Vco la phototension en circuit ouvert.



#### Figure II.10 : Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement de circuit-ouvert

L'expression littérale de la résistance série ci-dessous est obtenue en appliquant la loi des mailles à ce circuit électrique.

$$R_{s}(Sf) = \frac{V_{co} - V_{ph}(Sf)}{J_{ph}(Sf)}$$
(II-10)

Les figures II.11 et II.12 suivantes illustrent respectivement le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur et celui de la résistance série en fonction de la profondeur.



Vitesse de recombinaison à la jonction  $Sf(m.10^{m}cm/s)$ 

<u>Figure II.11</u>: Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)



<u>Figure II.12</u>: Profil de la résistance série en fonction de la profondeur z ( $Sf = 2.10^2$  cm/s; D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)

Sur la figure II.11, on note l'augmentation de la résistance série lorsque la profondeur Z augmente (figure II.12). En effet comme souligné précédemment, lorsque la profondeur augmente, le taux de génération des porteurs diminue. Ainsi, les effets résistifs du matériau augmentent et donc la résistance série aussi.

### II.8 La résistance shunt

La résistance shunt caractérise les fuites de courant au sein de la photopile. Il existe plusieurs méthodes de détermination de la résistance shunt [20], [21]. Dans notre étude pour déterminer la résistance shunt, on considère le fonctionnement de la photopile en court-circuit. Ainsi, la photopile est considérée comme un générateur de courant réel en parallèle avec une résistance shunt dont le schéma est représenté à la figure II.13 ci-dessous [17], [22] où Jph et Vph sont respectivement la densité de photocourant et la phototension ; Rsh la résistance shunt ; Rch la résistance de charge ; Jsh la densité de photocourant passant dans la branche de la résistance shunt et Jcc la densité de photocourant en court-circuit.



Figure II.13: Schéma équivalent de la photopile en fonctionnement de court-circuit

En appliquant la loi des nœuds, on en déduit l'expression de la résistance shunt qui est la suivante :

$$R_{Sh}(Sf) = \frac{V_{ph}(Sf)}{J_{CC} - J_{ph}(Sf)}$$
(II-11)

On représente à la figure II.14 la variation de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur et à la figure II.15 celle de la résistance shunt en fonction de la profondeur.



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf (m.10<sup>m</sup> cm/s)

Figure II.14 : Profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction Sf pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm).



<u>Figure II.15</u>: profil de la résistance shunt en fonction de la profondeur ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm).

A la figure II.14, on note une augmentation considérable de la résistance shunt avec la vitesse de recombinaison à la jonction car plus le mouvement des porteurs dans la base est accéléré, plus les fuites de courant au sein de la photopile diminuent ce qui augmente la résistance shunt.

En outre, on note aussi l'augmentation de la résistance shunt avec la profondeur comme l'illustre la figure II.15. En effet, lorsque la profondeur augmente, les recombinaisons des porteurs en volume deviennent plus importantes ce qui augmente la résistance shunt. On remarque à la figure II.15 que la résistance shunt est constante à partir d'une certaine valeur de la profondeur z de la base. Cette valeur de la profondeur correspond à la valeur optimale ( $Z_{opt}$ = 0,04 cm) de la profondeur de notre photopile.

## II.9 Capacité

La capacité de la photopile sous éclairement est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{q \cdot n_o}{V_T} + q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T}$$
(II-12)

La figure II.16 illustre le profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de la profondeur et la figure II.17 celui de la capacité de la photopile en fonctionnement de court-circuit en fonction de la profondeur.



<u>Figure II.16</u> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de z ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; L=0,01cm)



<u>Figure II.17</u> : Profil de la capacité de la photopile fonctionnant en court-circuit en fonction de la profondeur Z ( $D=26cm^2.s^{-1}$ ; L=0,01cm)

Sur ces différentes courbes, la capacité est maximale au voisinage du circuit ouvert (pour les faibles valeurs de *Sf*). Ceci est dû au blocage des porteurs à la jonction lorsque les valeurs de la vitesse de recombinaison sont faibles. Par contre la capacité diminue en court-circuit jusqu'à une valeur pratiquement nulle : presque tous les porteurs traversent la jonction sous l'effet de la vitesse de recombinaison à la jonction. Par ailleurs, on note une diminution de la capacité lorsque la profondeur Z augmente. En effet la charge du condensateur varie avec la profondeur. Elle diminue à cause de la faible génération des porteurs en profondeur occasionnant ainsi la diminution de la capacité.

On remarque d'ailleurs à la figure II.17 que la capacité lorsque la photopile fonctionne en courtcircuit diminue avec la profondeur. Cela correspond à un élargissement de l'épaisseur de la zone de charge.

A partir de cette figure on a déterminé les valeurs de la capacité de la photopile fonctionnant en court-circuit pour chaque valeur de la profondeur z pour voir l'influence de la profondeur sur l'élargissement de l'épaisseur de la zone de charge d'espace. On obtient le tableau de valeurs ciaprès.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

| <u>Tableau II.2 :</u> | Valeurs d | de la | capacité | de la | ı photopile | fonctionnant | en | court-circuit | pour |
|-----------------------|-----------|-------|----------|-------|-------------|--------------|----|---------------|------|
| différentes vale      | eurs de Z |       |          |       |             |              |    |               |      |

| Profondeur Z (cm)  | 10 <sup>-3</sup>       | 2 10 <sup>-3</sup>     | 3 10 <sup>-3</sup>     | 4 10 <sup>-3</sup>     | 5 10 <sup>-3</sup>     |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Capacitédelaphotopileencourt-circuit $C_{cc}$ (F/cm <sup>2</sup> ) | 2,337 10 <sup>-8</sup> | 1,189 10 <sup>-8</sup> | 7,478 10 <sup>-9</sup> | 5,461 10 <sup>-9</sup> | 4,406 10 <sup>-9</sup> |

On note que plus la profondeur z augmente, plus la capacité de la photopile en court-circuit devient faible. Cette diminution de la capacité de la photopile en court-circuit correspond à un élargissement de l'épaisseur X de la zone de charge d'espace qui est assimilée à un condensateur plan. Ainsi les porteurs minoritaires traversent en grand nombre les jonctions ce qui augmente le rendement de la capacité et donc la performance de la photopile.

Au paragraphe qui suit, nous étudions le courant dû aux pertes de porteurs dans la photopile appelé courant de diode.

#### II.10 Courant de diode

Le courant de diode est un courant de fuites qui caractérise les pertes de porteurs photocréés dans la photopile. Il dépend de plusieurs paramètres dont la phototension et la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction $Sf_0$ . Son expression est donnée par :

$$Id = 2 \times q \times Sf_0 \times \delta(0, z) \tag{II-13}$$

$$Id = 2 \times q \times Sf_0 \times \frac{n_i^2}{N_B} \left( e^{\frac{V_{ph}}{V_T}} - 1 \right)$$
(II-14)

Avec Vph la phototension ;  $V_T$  la tension thermique ;  $N_B$  le taux de dopage dans la base ;  $n_i$  la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires ; q la charge de l'électron et $Sf_0$  la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction.

On représente respectivement aux figures II.18 et II.19 le profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction sous l'effet de la profondeur de la base et le profil du courant de diode en fonction de la profondeur z.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016



<u>Figure II.18</u> : Profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de z (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01cm)



<u>Figure II.19</u> : Profil du courant de diode en fonction de la profondeur Z ( $D=26cm^2.s^{-1}$ ; L=0,01cm)

Pour une valeur de la profondeur z donnée le courant de diode diminue lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente. Il est maximal aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (voisinage du circuit ouvert) et tend vers zéro pour les grandes

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (voisinage du court-circuit). En effet en circuit ouvert il y'a accumulation des porteurs à la jonction ce qui augmente les fuites de courant. La profondeur z de la base a pour effet de diminuer le courant de diode. Cela est dû à la diminution du nombre de porteurs photocréés avec l'atténuation de la lumière incidente selon la loi de Beer Lambert.

Notons que les valeurs du courant de diode restent faibles devant celles du photocourant.

En tenant compte du courant de diode, nous allons étudier ci-après la puissance électrique fournie au circuit extérieur.

#### II.11 Puissance électrique

La puissance électrique fournie par la photopile sous éclairement est obtenue en faisant le produit de la phototension et du courant réel collecté au circuit extérieur.

$$P = V_{ph} \times \left(J_{ph} - I_d\right) \tag{II-15}$$

Nous représentons aux figures II.20 et II.21 respectivement le profil de la puissance électrique en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et le profil de la puissance électrique maximale en fonction de la profondeur de la base.



THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

<u>Figure II.20</u> : Profil de la puissance en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs de z ( $D=26 \text{ cm}^2$ .s-1; L=0,01cm)



<u>Figure II.21</u> : Profil de la puissance électrique maximale en fonction de la profondeur Z  $(D=26cm^2.s^{-1}; L=0,01cm)$ 

Pour une valeur de la profondeur on constate que la puissance électrique est presque nulle au voisinage du circuit ouvert et du court-circuit. Cela est dû aux faibles valeurs du courant en circuit ouvert et de la phototension en court-circuit. La puissance électrique est maximale pour une valeur de la vitesse de recombinaison à la jonction $Sf_{max} = 4.10^4 \ cm/s$ .

Lorsque la profondeur augmente, la puissance électrique diminue à cause de la diminution du courant et de la tension. Avec cette diminution de puissance en profondeur, on peut s'attendre à une diminution du rendement de conversion de la photopile.

#### II.12 Rendement de conversion électrique

Le rendement de conversion de la photopile représente le rapport de la puissance électrique maximale fournie par la puissance incidente reçue par la photopile.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} \tag{II-16}$$

Avec  $P_{max}$  la puissance maximale fournie au circuit extérieur et  $P_{inc}$  la puissance du flux de lumière incident reçu par la photopile. Sous A.M = 1,5 la puissance incidente  $P_{inc} = 1000 \text{ W/m}^2$ . A la figure II.22 nous avons représenté le profil du rendement de conversion en fonction de la profondeur z de la base.



<u>Figure II.22</u>: Profil du rendement de conversion en fonction de la profondeur Z ( $D=26cm^2.s^{-1}$ ; L=0,01cm)

On remarque sur cette figure que le rendement de conversion diminue en fonction de la profondeur z de la base. Cela réduit la performance de la photopile.

### Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié l'effet de la profondeur Z de la base sur les paramètres électriques d'une photopile à jonction verticale parallèle éclairée par une lumière polychromatique constante. Nous avons analysé le comportement de la densité des porteurs dans la base, la densité de photocourant, la phototension, la caractéristique I-V, la capacité, la puissance, le rendement de conversion ainsi que les résistances série et shunt.

D'une part, cette étude a montré que les résistances série et shunt augmentent avec la profondeur de la base.

D'autre part, l'augmentation de la profondeur z de la base diminue les performances de la photopile car les paramètres tels que le rendement de conversion, la puissance, la capacité, le

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

photocourant ainsi que la phototension diminuent. Cela s'explique par la diminution de la génération des porteurs selon la loi de Beer Lambert.

En plus cette étude nous a permis de déterminer l'épaisseur de couche optimale de notre photopile. Dans la suite de ce travail, on fixera la profondeur z de la base à cette valeur optimale.

#### **Références bibliographiques**

- [1] Wise J. F., "Vertical junction hardened solar cell," U.S patent 3690953, 1970.
- [2] Gover A. and Stella P., "Vertical multijunction solar-cell one dimensional analysis," IEEE Transactions on electron devices, 21(6), pp. 351-356, 1974.
- [3] Green M. A., "Silicon solar cells: Advanced principles & practice," Center for photovoltaic devices and systems university of new south wales, pp. 259-26, 1995.
- [4] Madougou S., Made F., Boukary M.S. and Sissoko G., "I –V Characteristics For Bifacial Silicon Solar Cell Studied Under a Magnetic Field," Advanced Materials Research, Vol.18-19, pp. 303-312, 2007.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

- [5] Ngom M.I., Zouma B., Zoungrana M., Thiame M., Bako Z.N., Camara A.G. and Sissoko G., "Theoretical study of a parallel vertical multi-junction silicon cell under multispectral illumination: influence of external magnetic field on the electrical parameters," International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), ISSN: 2250-3536, 2(6), pp. 101- 109, 2012.
- [6] Diouf M.S., I. Gaye, Thiam A., Fall M.F.M., I. Ly and Sissoko G., "Junction recombination Velocity Induced Open Circuit Voltage For a Silicon Solar Cell Under External Electric Field," Current Trends in Technology and Science, ISSN: 2279-0535 3(5), pp. 372-375, 2014.

[7] Zoungrana M., Dieng B., Lemrabott O.H., Touré F., Moujtaba M.A. Ould El, Sow M.L. and Sissoko G., "External Electric Field Influence on Charge Carriers and Electrical Parameters of Polycrystalline Silicon Solar Cell," *Research Journal of applied sciences, Engineering and technology*, *4*(17), pp. 2967-2972, 2012.

- [8] Dieng A., Zerbo I., Wade M., Maiga A. S. and Sissoko G., "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(9), pp. 473-476, 2011.
- [9] Thiam Nd., Diao A., Ndiaye M., Dieng A., Thiam A., Sarr M., Maiga A.S. and Sissoko G., "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(22), pp. 4646-4655, 2012.
- [10] Sow O., Zerbo I., Mbodji S., Ngom M.I., Diouf M.S. and Sissoko G., "Silicon solar cell under electromagnetic waves in steady state: electrical parameters determination using the i-v and p-v characteristics," *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(4), pp. 230 – 246, 2012.
- [11] Pulfrey, D. L., "Understanding Modern Transistors and Diodes," *Cambridge University Press*, 2010.
- [12] Bashahu M. and Habyarimana A., "Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance," *Renewable Energy*, 6(2), pp. 129-138, 1995.
- [13] Pysch D., Mette A. and Glunz S. W., "A review and comparison of different methods to determine the series resistance of the solar cells," *Solar Energy Materials & solar cells*, 91, pp. 1698 - 1706, 2007.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

- [14] Furlan, J. and Amon S., "Approximation of the carrier generation rate in illuminated silicon," *Solid State Electron, 28, pp. 1241–43, 1985.*
- [15] Mohammad S. N., "An alternative method for the performance analysis of silicon solar cells," J. Appl. Phys, 62(2), pp. 767-772, 1987.
- [16] Barro F.I., Zerbo I., Lemrabott O.H., Zougmore F. and Sissoko G., "Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light," *Proc.17th European PVSEC Munich 36, pp. 368-371, 2001.*
- [17] Sissoko, G., Museruka C., Corréa A., Gaye I. and Ndiaye A. L., "Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell," *Renewable Energy 3, pp. 1487-1490, 1996.*
- [18] Sissoko G., Sivoththananm S., Rodot M. and Mialhe P., "Constant Illumnation- 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, poster 1B, 12-16, Montreux, Switzerland, pp. 352-354, 1992.*
- [19] Diallo H. L., Maiga A. S., Wereme A. and Sissoko G., "New approach of both junction and back surface recombination velocities in a 3D modeling study of a polycrystalline silicon solar cell," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 42, pp. 193- 211, 2008.
- [20] El-Adawi M. K. and Al-Nuaim I. A., "A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V characteristic curve considering its shunt resistance – new approach," *Vacuum*, 64, pp. 33- 36, 2002.
- [21] Bouzidi K., Chegaar M. and Bouhemadou A., "Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance," *Solar Energy Materials & solar cells*, 91, pp. 1647-1651, 2007.
- [22] Mbodji S., Ly I., Diallo. H. L., Dione M. M., Diasse O. and Sissoko G., "Modeling study of n+/p solar cell resistances from single I-V characteristic curve considering the junction recombination velocity (Sf)," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(1), pp. 1-7, 2011.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

Chapitre III: Influence d'un champ électrique de polarisation sur les paramètres électriques d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle sous éclairement polychromatique.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

### Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons étudié l'effet de la profondeur de la base sur les paramètres électrique d'une photopile à jonction verticale parallèle. Dans ce présent chapitre nous allons prendre en compte l'influence d'un champ électrique externe sur les paramètres de la photopile. En effet des études ont montré que l'application d'un champ électrique extérieur réduit les pertes de porteurs en volume et en surface **[1]**. Pour étudier le comportement des paramètres électriques de la photopile en présence d'un champ électrique de polarisation nous allons d'abord donner une nouvelle expression de l'équation de continuité. Ensuite on déterminera l'expression de la densité des porteurs minoritaires de charges et par la suite les expressions des paramètres électriques tels que le photocourant, la phototension, la capacité, la puissance, les résistances série et shunt... Enfin on analysera le profil de chacun de ces paramètres en fonction du champ électrique et de la profondeur z.

# III.1 Présentation de la photopile a jonction verticale parallèle sous polarisation électrique

On représente à la figure III.1 notre modèle de photopile à jonction verticale parallèle sous polarisation électrique. La polarisation se fait en connectant les bases à une borne négative et les émetteurs à une borne positive.



<u>Figure III.1</u> : Structure d'une photopile à jonction verticale parallèle sous polarisation électrique

#### **III.2 Equation de continuite**

En tenant compte des hypothèses formulées au chapitre II, l'équation de continuité à laquelle obéissent les porteurs de charges minoritaires dans la base en régime statique est donnée par :

$$G(z) + D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} + \mu \cdot E \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} - R(x) = 0$$
(III-1)

Avec

- G(z) le taux de génération des porteurs à la profondeur z :  $G(z) = \sum_{i=1}^{3} a_i e^{-b_i z}$  [2];
- $D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2}$  est le terme de diffusion où D représente le coefficient de diffusion ;
- $\mu \cdot E \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x}$  est le terme de conduction où E représente le champ électrique total somme du champ extérieur de polarisation et du champ intérieur dû au gradient de concentration des électrons dans la base.
- R(x) le taux de recombinaison des porteurs à la positon x :  $R(x) = \frac{\delta(x)}{\tau}$  [3];
- $\delta(x)$  la densité des porteurs minoritaires photocréés à la position x de la base.

#### II.2.1 Solution de l'équation de continuité

La solution de l'équation (III-1) est donnée sous la forme :

$$\delta(x,z) = e^{\beta \cdot x} \left[ Ach(\alpha \cdot x) + Bsh(\alpha \cdot x) \right] + \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z} \qquad \text{(III-2)}$$
Avec

$$\alpha = \frac{(L^{2}_{E} + 4 \cdot L^{2})^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot L^{2}}; \quad \beta = \frac{-L_{E}}{2 \cdot L^{2}}; \quad C_{i} = \alpha_{i} \cdot \frac{L^{2}}{D}$$

où L est la longueur de diffusion et  $L_E = \frac{\mu \times E \times L^2}{D}$  est la longueur de diffusion dépendant du champ électrique.

Les constantes A et B de l'équation (III-2) sont déterminées en appliquant les conditions aux limites [4], [5] :

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

#### **II.2.2** Conditions aux limites

A la jonction émetteur-base (en x=0) 
$$D_n \cdot \frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x,z)\Big|_{x=0}$$
 (III-3)

 $\left.\frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\right|_{x=\frac{H}{2}} = 0$ Au milieu de la base (en H/2)

Où Sf représente la vitesse de recombinaison à la jonction [6].

$$A = -Sf \sum_{i=1}^{3} C_i \, \boldsymbol{\varrho}^{-b \cdot z} \left\{ \frac{\beta \sinh\left(\frac{\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{H}}{2}\right) + \alpha \cosh\left(\frac{\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{H}}{2}\right)}{\boldsymbol{\alpha} \cdot Sf \cosh\left(\frac{\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{H}}{2}\right) + \left[\boldsymbol{\alpha}^2 \cdot \boldsymbol{D} + \beta\left(Sf - \beta \cdot \boldsymbol{D}\right)\right] \sinh\left(\frac{\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{H}}{2}\right)} \right\}$$
(III-5)

$$B = Sf \sum_{i=1}^{3} C_i \, \boldsymbol{\varrho}^{-b_i \cdot z} \left\{ \frac{\alpha \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \beta \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)}{\alpha \cdot Sf \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \left[\alpha^2 \cdot D + \beta(Sf - \beta \cdot D)\right] \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)} \right\}$$
(III-6)

#### **III.3 Densité des porteurs minoritaires**

L'expression de la densité des porteurs minoritaires donnée à l'équation (III-2) dépend de l'épaisseur x de la base, de la profondeur z de la base et du champ électrique de polarisation. Nous pouvons donc analyser la répartition des porteurs de charges dans la base suivant l'épaisseur x.

#### III.3.1 Effet du champ électrique de polarisation

On représente ci-dessous le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la base pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.

(III-4)


<u>Figure III.2</u>: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de l'épaisseur x de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $Sf=7.10^7$  cm  $.s^{-1}$ ; D=26 cm<sup>2</sup> $.s^{-1}$ ; L=0,01 cm; Z=0,04 cm)

On observe une symétrie des différentes courbes par rapport au centre de la base (à  $x = x_m = 0,015$  cm). Au centre de la base la densité des porteurs minoritaires est maximale : il y'a blocage de porteurs. Elle diminue progressivement vers les deux jonctions de part et d'autre de la base. Cela se traduit par un écoulement des porteurs vers la jonction (jonction 1 ou 2) pour participer au photocourant.

Dans la région  $x < x_m$  le gradient de la densité des porteurs minoritaires est positif et cela correspond à un écoulement des porteurs de charges vers la jonction 1 pour participer à la collecte.

Dans la région  $x > x_m$  le gradient de la densité des porteurs est également positif par rapport à la jonction 2 et les porteurs de charges photocréés dans cette région sont renvoyés vers cette jonction pour participer au photocourant.

Cette figure montre également l'augmentation de la densité des porteurs minoritaires avec le champ électrique de polarisation. En effet sous polarisation électrique le nombre de porteurs renvoyés vers la jonction augmente car le champ électrique communique aux porteurs de charges

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

une énergie supplémentaire qui leur permet de diffuser vers les jonctions 1 et 2 pour participer à la génération du courant.

La figure III.3 illustre le profil de la densité des porteurs minoritaires de charges en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.3</u>: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du champ électrique  $(Sf=7.10^7 \text{ cm }.\text{s}^{-1}; D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}; L=0,01 \text{ cm}; x=0,03 \text{ cm}; Z=0,04 \text{ cm})$ 

Nous notons une augmentation de la densité des porteurs minoritaires avec le champ électrique. En effet l'augmentation du champ électrique entraîne une forte diffusion des porteurs photocréés vers la jonction (jonction 2 car x=0,03cm). Ainsi il y'a un accroissement des porteurs de charges dans la région proche de la jonction. Le champ électrique joue donc le rôle d'accélérateur des porteurs de charges vers les jonctions.

La figure suivante illustre le profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur z de la base suivant différentes valeurs du champ électrique de polarisation.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016



<u>Figure III.4</u>: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $Sf=7.10^7$  cm .s<sup>-1</sup>; D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm; x=0,03 cm)

Les courbes de la figure III.4 montrent que la densité des porteurs minoritaires augmente avec le champ électrique de polarisation mais diminue avec la profondeur z de la base. En effet comme illustré à la figure III.3 le champ électrique renvoie les porteurs de charges vers la jonction ce qui augmente leur densité près de la jonction. Mais lorsque la profondeur z de la base augmente la lumière incidente s'atténue ce qui diminue la génération des porteurs d'où une diminution de la densité des porteurs photocréés.

## III.3.2 Effet de la profondeur z de la base

L'effet de la profondeur sur la densité des porteurs minoritaires de la base représentée en fonction du champ électrique de polarisation est illustré à la figure ci-après.



<u>Figure III.5</u>: Profil de la densité des porteurs minoritaires en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base  $(Sf=7.10^7 \text{ cm}.\text{s}^{-1}; D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}; L=0,01 \text{ cm}; x=0,03 \text{ cm})$ 

Pour une valeur donnée de la profondeur z de la base, on remarque que la densité des porteurs minoritaires de charges augmente sous l'effet du champ électrique de polarisation. Ce phénomène s'explique du fait que l'augmentation du champ électrique de polarisation entraîne aussi une augmentation de la force électrique qui s'exerce sur les porteurs photocréés ce qui favorise leur diffusion vers la région proche de la jonction.

Toutefois on note sur cette figure une diminution de la densité des porteurs minoritaires de charges avec l'augmentation de la profondeur z de la base. En effet, plus la profondeur z de la base augmente, moins il y'a de porteurs photocréés en volume. Cela est dû à la faible génération de porteurs causée par l'atténuation de la lumière incidente en profondeur selon la loi de Beer Lambert.

Les porteurs minoritaires de charges photocréés en surface et en volume au sein de la photopile et qui échappent aux phénomènes de recombinaisons diffusent vers les jonctions. S'ils ont suffisamment d'énergie, ils peuvent traverser ces jonctions pour être collecter à travers un circuit

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

extérieur et participer à la production du photocourant. Dans le paragraphe qui suit on va étudier la densité de photocourant collecté au sein de la photopile sous polarisation électrique.

#### III.4 Densité de photocourant

La densité de photocourant d'une photopile sous polarisation électrique externe est donnée par :

$$J_{ph} = 2 \cdot q \left[ D \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=0} + \mu \cdot E \cdot \delta(0, z) \right]$$
(III-7)

avec q la charge de l'électron.

$$J_{ph} = J_D + J_C \tag{III-8}$$

$$J_D = 2 \times q \times D \times \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=0} \qquad \qquad J_C = 2 \times q \times \mu \times E \times \delta(0, z)$$

En effet, la densité de photocourant est la somme du courant de diffusion  $(J_D)$  dû au grandient de concentration des porteurs et du courant de conduction  $(J_C)$  dû au champ électrique [7].

#### III.4.1 Effet du champ électrique de polarisation

L'influence du champ électrique sur le profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction est représentée à la figure ci-dessous.



THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

<u>Figure III.6</u> : Profil de la densité de photocourant en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$  ; L=0,01 cm ; Z=0,04cm)

On note à la figure III.6 que la densité de photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction mais aussi avec l'augmentation du champ électrique de polarisation. En effet l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction entraîne une grande mobilité des porteurs de charges vers les jonctions. Et sous l'effet combiné de la polarisation électrique les porteurs photocréés ont une énergie suffisante qui leur permet de traverser les jonctions et augmenter ainsi le photocourant collecté au niveau du circuit extérieur.

Cette figure nous permet aussi de noter d'abord qu'en l'absence de polarisation électrique et pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction ( $Sf < 2.10^2$  cm/s) que la densité de photocourant est quasi-nulle. Cette situation correspond au fonctionnement de la photopile en circuit ouvert où les porteurs de charges sont bloqués au niveau de la zone de charge d'espace (ZCE).

Ensuite le photocourant augmente jusqu'à une valeur maximale aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (Sf >  $5.10^5$  cm/s) correspondant à la situation de court-circuit où presque tous les porteurs photogénérés traversent les jonctions pour participer à la production du photocourant.

Enfin entre ces deux situations existe une situation intermédiaire  $(2.10^2 < \text{Sf} < 5.10^5 \text{ cm/s})$  où le photocourant augmente avec la vitesse de recombinaison à la jonction.

Il faudra noter également qu'en présence de champ électrique la densité de photocourant lorsque la photopile fonctionne en circuit ouvert augmente. Cela s'explique du fait que même si la vitesse de recombinaison à la jonction est faible, le champ électrique communique aux porteurs photogénérés de l'énergie qui leur permet de traverser les jonctions.

Lorsque la vitesse de recombinaison tend vers de grandes valeurs, la densité de photocourant devient constante et égale à la densité de photocourant de court-circuit notée Jcc.

$$J_{cc} = \lim_{Sf \to \infty} J_{Ph} \tag{III-9}$$

Nous représentons ci-dessous la variation de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.7</u>: Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ électrique (D=26 cm2.s-1 ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

On remarque l'augmentation de la densité de photocourant de court-circuit avec le champ électrique de polarisation. Le court-circuit correspond à une situation où un maximum de porteurs photogénérés arrive à traverser les jonctions et génère ainsi un courant au niveau du circuit extérieur. Avec la présence d'une polarisation extérieure ce phénomène s'accentue augmentant ainsi la densité de photocourant.

Ci-après est représentée la variation de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.8</u> : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

La figure III.8 montre une diminution de la densité de photocourant de court-circuit lorsque la profondeur z de la base augmente. En effet la lumière s'atténue en profondeur entraînant une faible génération de porteurs. En plus les porteurs photogénérés en profondeur peuvent succomber aux recombinaisons avant d'atteindre les jonctions où ils peuvent traverser pour augmenter la quantité de courant générée.

Cette figure met en évidence également l'augmentation du photocourant de court-circuit avec le champ de polarisation comme on l'a montrée à la figure III.7.

## III.4.2 Effet de la profondeur z de la base

Le profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ électrique de polarisation pour différentes valeurs de la profondeur z de la base est représenté à la figure ciaprès.



<u>Figure III.9</u> : Profil de la densité de photocourant de court-circuit en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)

La densité de photocourant de court-circuit augmente sous l'effet du champ électrique de polarisation mais diminue avec la profondeur z de la base. Cette figure confirme les remarques faites précédemment.

Lorsque les porteurs photogénérés en surface et en volume n'ont pas suffisamment d'énergie pour traverser les jonctions, ils sont bloqués et créent ainsi une différence de potentiel au niveau des jonctions. Cette différence de potentiel est caractérisée par la phototension au sein de la photopile que nous étudions au paragraphe suivant.

## **III.5** Phototension

La phototension de la photopile est donnée par la relation de Boltzmann :

$$V_{ph} = V_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{N_B}{n_i^2} \cdot \delta(0, z) \right) + 1 \right]$$
(III-10)

avec V<sub>T</sub> la tension thermique :  $V_T = \frac{k.T}{q}$ ; N<sub>B</sub> le taux de dopage dans la base ; n<sub>i</sub> la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires ; k la constante de Boltzmann ; T la température et q la charge de l'électron.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

#### III.5.1 Effet du champ électrique de polarisation

A la figure ci-après nous avons représenté le profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.



# <u>Figure III.10</u> : Profil de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; L=0,01 cm; Z=0,04 cm)

On observe sur cette figure une diminution de la phototension en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. En effet plus la vitesse de recombinaison à la jonction augmente plus les porteurs traversent les jonctions d'où la diminution de la phototension.

Pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction la phototension est maximale correspondant à la phototension de circuit ouvert. Dans ce cas les porteurs sont bloqués au niveau des jonctions.

Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction correspondant au fonctionnement de la photopile en court-circuit, presque tous les porteurs traversent les jonctions ce qui réduit la phototension à sa valeur minimale.

Sous l'effet de la polarisation électrique la phototension augmente avec le champ électrique. En effet le champ électrique crée une force électrique qui renvoie tous les porteurs minoritaires photocréés dans la base vers les jonctions ce qui augmente leur densité au voisinage de la

jonction. Et comme la vitesse de recombinaison à la jonction est faible donc ces porteurs restent bloqués à la jonction d'où l'augmentation de la phototension.

La phototension de circuit ouvert est donnée par l'expression suivante :

$$V_{co} = \lim_{Sf \to 0} V_{Ph} \tag{III-11}$$

Le profil de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ électrique de polarisation est représenté à la figure suivante.



<u>Figure III.11</u> : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ électrique (D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

La phototension de circuit ouvert augmente exponentiellement avec le champ électrique de polarisation. Plus le champ électrique augmente, plus les porteurs de charges photocréés sont renvoyés vers la région proche des jonctions augmentant ainsi leur présence au niveau des jonctions.

Ci-après est représenté le profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique.



<u>Figure III.12</u> : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; L=0,01 cm)

On remarque que la phototension de circuit ouvert diminue en fonction de la profondeur z de la base mais augmente avec le champ électrique de polarisation. En effet en profondeur il y'a une augmentation des pertes de porteurs à cause des recombinaisons mais aussi il y'a une faible génération de porteurs à cause de l'atténuation de la lumière incidente.

Avec le champ électrique le nombre de porteurs bloqués à la jonction augmente sous l'influence de la force électrique qui les renvoie dans la région proche de la jonction.

## III.5.2 Effet de la profondeur z de la base

Le profil de la phototension en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base.



<u>Figure III.13</u> : Profil de la phototension de circuit ouvert en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm)

On note sur ces courbes une faible augmentation de la phototension de circuit ouvert avec le champ électrique de polarisation comme l'illustre la figure III.11 précédente.

Lorsque la profondeur z de la base augmente la phototension de circuit ouvert diminue à cause des pertes en volume et de la faible génération de porteurs.

## III.6 Caractéristique I-V

La caractéristique I-V d'une photopile est la courbe qui traduit la variation de la densité de photocourant en fonction de la phototension.

Nous présentons ci-après le profil de la caractéristique courant-tension de la photopile pour différentes valeurs du champ électrique.



<u>Figure III.14</u>: Caractéristique I-V de la photopile pour différentes valeurs du champ électrique (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm, z =0,04 cm)

Les allures des courbes de la figure III.14 confirment l'effet du champ électrique observé sur la densité de photocourant de court-circuit et sur la phototension de circuit ouvert.

Pour les faibles valeurs de la densité de photocourant la phototension est maximale et constante. Cela traduit la situation de circuit ouvert. La photopile peut être assimilée à un générateur de tension. Cependant la photopile n'étant pas idéale elle présente des pertes de tension caractérisées par la résistance série.

De même pour les faibles valeurs de la phototension, la densité de photocourant est maximale et constante traduisant ainsi la situation de court-circuit. La photopile est assimilée à un générateur de courant quelque soit la tension débitée. Puisque la photopile n'est pas idéale elle présente des fuites de courant caractérisées par la résistance shunt. Donc en considérant le fonctionnement de la photopile au voisinage du circuit ouvert et du court-circuit, les résistances série et shunt peuvent être déterminées à partir des modèles électriques.

## III.7 Résistance série

La résistance série d'une cellule solaire est un paramètre fondamental qui dépend de la technologie utilisée, de la nature du substrat et de la température. Elle caractérise les chutes ohmiques au sein de la photopile, les effets résistifs du matériau et du dispositif de contact utilisé pour la collecte du courant. On détermine la résistance série en considérant que la photopile se comporte comme un générateur de tension au voisinage du circuit ouvert **[8]**.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

On représente ci-dessous le modèle électrique équivalent de la photopile fonctionnant au voisinage du circuit ouvert [9, 10].



Figure III.15: Schéma électrique équivalent de la photopile en circuit ouvert

Où Jph et Vph représentent respectivement la densité de photocourant et la phototension ; Rs représente la résistance série ; Rch la résistance de charge et Vco la phototension de circuit ouvert.

En appliquant la loi des mailles au circuit électrique ci-dessus on obtient l'expression de la résistance série donnée par :  $\mathbf{I}_{\mathbf{L}}$  ( $\mathbf{T}$ )  $\mathbf{I}_{\mathbf{L}}$  ( $\mathbf{T}$ )

$$R_{s}(Sf, E) = \frac{V_{CO}(E) - V_{ph}(Sf, E)}{J_{ph}(Sf, E)}$$
(III-12)

La résistance série dépend du champ électrique et de la vitesse de recombinaison à la jonction.

## III.7.1 Effet du champ électrique de polarisation

Nous présentons ci-après le profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.



<u>Figure III.16</u> : Profil de la résistance série en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm; Z=0,04 cm)

Lorsque la vitesse de recombinaison à la jonction augmente beaucoup de porteurs de charges sont contraints au processus de diffusion à travers la jonction. Ce processus entraîne la diminution de la conduction dans la base d'où l'augmentation de la résistance série.

La résistance série diminue en présence d'une polarisation électrique. Plus le champ électrique augmente, plus les porteurs de charges arrivent à traverser la jonction pour augmenter le photocourant débité. Par conséquent, la résistivité du matériau diminue ce qui entraîne la diminution de la résistance série comme illustré à la figure suivante.

La figure III.17 ci-après représente le profil de la résistance série en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.17</u>: Profil de la résistance série en fonction du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

La résistance série diminue sous l'effet du champ électrique de polarisation. L'allure de cette courbe confirme l'effet du champ électrique sur la résistance série observé sur la figure III.16.

## III.7.2 Effet de la profondeur z de la base

Nous analysons à présent l'effet de la profondeur z de la base sur le profil de la résistance série en fonction du champ électrique.



<u>Figure III.18</u> : Profil de la résistance série en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $Sf = 2.10^2$  cm/s ; D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)

La résistance série diminue en fonction du champ électrique mais augmente avec la profondeur z de la base. En effet lorsque la profondeur augmente la résistivité du matériau est plus importante s'opposant ainsi à la diffusion des porteurs de charges. Cela a pour conséquence d'augmenter la résistance série de la photopile.

## **III.8 Résistance shunt**

La résistance shunt d'une photopile caractérise les pertes de porteurs de charges en surface, en volume et aux interfaces **[8]**. Elle est déterminée en utilisant le circuit électrique équivalent où la photopile est considérée comme un générateur de courant au voisinage du court-circuit **[10, 11]**. Le circuit électrique équivalent de la photopile en court-circuit est donné à la figure ci-dessous :



Figure III.19: Schéma électrique équivalent de la photopile en court-circuit

Où Jph et Vph représentent respectivement la densité de photocourant et la phototension ; Rsh représente la résistance shunt ; Rch la résistance de charge et Jcc la densité de photocourant de court-circuit.

En appliquant la loi aux nœuds au circuit électrique ci-dessus on obtient l'expression de la résistance shunt donnée par :  $\boldsymbol{R}_{m}(Sf,E) = \frac{V_{ph}(Sf,E)}{(Sf,E)}$ 

$$R_{Sh}(Sf, E) = \frac{I_{ph}(Sf, E)}{J_{CC}(E) - J_{ph}(Sf, E)}$$
(III.13)

Nous analysons dans ce qui suit la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction et en fonction du champ électrique.

## III.8.1 Effet du champ électrique de polarisation

Dans la figure suivante nous avons représenté le profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf (m.10<sup>m</sup>cm/s)

<u>Figure III.20</u> : Profil de la résistance shunt en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm; Z=0,04 cm)

Nous notons sur cette figure l'augmentation de la résistance shunt avec la vitesse de recombinaison à la jonction mais aussi avec le champ électrique de polarisation. En effet la polarisation de la photopile et l'augmentation de la vitesse de recombinaison à la jonction font que les porteurs de charges ont suffisamment d'énergie pour traverser massivement la jonction et participer au photocourant. Ce processus entraîne une réduction considérable des pertes de porteurs qui représentent les fuites de courant. Donc la résistance shunt devient grande pour s'opposer aux fuites de courant.

Le profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique est illustré à la figure suivante.



<u>Figure III.21</u> : Profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

Nous notons une augmentation considérable de la résistance shunt lorsque le champ électrique est compris dans l'intervalle  $0 \le E \le 6$  V/cm puis la résistance shunt diminue faiblement lorsque le champ électrique est supérieur à 6 V/c m.

## III.8.2 Effet de la profondeur z de la base

Dans la figure qui suit nous avons représenté le profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base.



<u>Figure III.22</u> : Profil de la résistance shunt en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm)

Pour une valeur donnée de la profondeur z la résistance shunt augmente jusqu'à une certaine valeur du champ électrique puis elle diminue.

Lorsque l'épaisseur de couche z augmente, la résistance shunt augmente aussi pour s'opposer aux pertes de portes en volume.

Les porteurs de charges stockés de part et d'autre de la jonction (électrons du côté de la base et trous du côté de l'émetteur) entraînent l'établissement d'un condensateur dont la capacité est étudiée au paragraphe qui suit.

#### III.9 La capacité

La capacité de la photopile éclairée avec une lumière polychromatique est donnée par l'expression suivante :

$$C = C_0 + q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T}$$
(III-14)

Où  $V_T$  est la tension thermique et  $C_o$  la capacité sous obscurité.

#### III.9.1 Effet du champ électrique de polarisation

Le profil de la capacité de la zone de charge d'espace en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.



# <u>Figure III.23</u> : Profil de la capacité en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

Sur cette figure nous notons une décroissance de la capacité de la zone de charge d'espace en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Cela est dû au fait que les porteurs de charges traversent les jonctions au fur et à mesure que la vitesse de recombinaison à la jonction augmente.

On note également que la capacité de la zone de charge d'espace est maximale au voisinage du circuit ouvert puis elle diminue et devient minimale au voisinage du court-circuit. En effet en circuit ouvert, il y'a un stockage important de porteurs de charges à la jonction ce qui augmente la capacité de la zone de charge d'espace alors qu'en court-circuit les porteurs traversent les jonctions ce qui réduit la capacité de la zone de charge d'espace.

Le champ électrique augmente la capacité de la zone de charge d'espace. Cela résulte de l'augmentation de la densité des porteurs de charges avec le champ électrique de polarisation.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

On représente à la figure ci-après le profil de la capacité de la zone de charge d'espace lorsque la photopile fonctionne en court-circuit en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.24</u> : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction du champ électrique (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

On note une augmentation de la capacité de la photopile en court-circuit avec le champ électrique. En effet le champ électrique renvoie les porteurs vers les jonctions augmentant ainsi leur présence dans la zone de charge d'espace. Même si ces porteurs peuvent traverser la jonction sous l'effet de la vitesse de recombinaison, à chaque fois qu'ils seront renvoyés vers la jonction ils augmenteront la capacité de la photopile en court-circuit.

A la figure ci-dessous le profil de la capacité de la photopile fonctionnant en court-circuit est représenté en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.25</u> : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction de la profondeur z de la base pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm)

On observe à la figure III.23 une diminution de la capacité de la photopile en court-circuit lorsque la profondeur z de la base augmente. Cela est dû à la diminution du nombre de porteurs de charges photocréés en profondeur.

La capacité de la photopile en court-circuit augmente avec le champ électrique de polarisation comme illustré à la figure précédente.

#### III.9.2 Effet de la profondeur z de la base

On représente à la figure ci-dessous le profil de la capacité de la photopile fonctionnant en courtcircuit en fonction du champ électrique de polarisation pour différentes valeurs de la profondeur z de la base.



<u>Figure III.26</u> : Profil de la capacité de la photopile en court-circuit en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s-1}$ ; L=0,01 cm)

Nous notons une augmentation de la capacité de la photopile en court-circuit avec le champ électrique comme illustré à la figure III.24 et une diminution de cette capacité lorsque la profondeur z de la base augmente comme le montre la figure III.25.

#### III.10 Le courant de diode

Le courant de diode qui caractérise les pertes de porteurs dans la photopile est donné par l'expression suivante :

$$Id = 2 \times q \times Sf_0 \times \frac{n_i^2}{N_B} \left( e^{\frac{V_{ph}}{V_T}} - 1 \right)$$
(III-15)

Où q est la charge de l'électron,  $Sf_0$  la vitesse de recombinaison intrinsèque à la jonction, n<sub>i</sub> la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires, N<sub>B</sub> le taux de dopage dans la base, Vph la phototension et V<sub>T</sub> la tension thermique.

#### III.10.1 Effet du champ électrique de polarisation

Nous représentons à la figure III.27 le profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016



Vitesse de recombinaison à la jonction Sf m.10<sup>m</sup>(cm/s)

<u>Figure III.27</u> : Profil du courant de diode en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$  ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

Le courant de diode diminue en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction. Il est maximal au voisinage du circuit ouvert puis devient faible au voisinage du court-circuit. En effet le photocourant est maximal lorsque la vitesse de recombinaison augmente ce qui réduit les pertes de porteurs.

Lorsque le champ électrique croît, le courant de diode augmente du fait de la présence maximale des porteurs de charges dans la région proche de la jonction de la photopile.

Nous représentons à la figure III.28 le profil du courant de diode en fonction du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.28</u> : Profil du courant de diode en fonction du champ électrique  $(D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}; L=0,01 \text{ cm}; Z=0,04 \text{ cm})$ 

Le courant de diode augmente avec le champ électrique. Cependant on remarque que ses valeurs restent négligeables devant celles du photocourant collecté au sein de la photopile.

#### III.10.2 Effet de la profondeur z de la base

Le profil du courant de diode en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base est donné à la figure ci-dessous.



THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

# <u>Figure III.29</u> : Profil du courant de diode en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base ( $Sf = 3.10^3$ cm/s ; D=26 cm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; L=0,01 cm)

On remarque sur cette figure que le courant de diode augmente avec le champ électrique comme l'illustre la figure III.28. Mais lorsque la profondeur z de la base augmente, le courant de diode diminue du fait de la faible présence de porteurs en profondeur.

Nous allons à présent étudier la puissance électrique fournie par la photopile en présence d'un champ électrique.

## III.11 La Puissance électrique

La puissance délivrée par une photopile éclairée est donnée par l'équation suivante :

$$P = I \times V_{ph}$$
 (III-16)

avec  $I=J_{ph}-I_d$  est le courant réel collecté au circuit extérieur [7], Jph représente la densité de photocourant et  $I_d$  est le courant de diode.

#### III.11.1 Effet du champ électrique de polarisation

La figure ci-dessous représente le profil de la puissance électrique en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique.



<u>Figure III.30</u> : Profil de la puissance électrique en fonction de la vitesse de recombinaison à la jonction pour différentes valeurs du champ électrique ( $D=26 \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

On observe sur cette figure une diminution de la puissance électrique en fonction de la vitesse de recombinaison de la jonction.

En l'absence de polarisation électrique la puissance électrique est presque nulle aux faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (en circuit ouvert) et aux grandes valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction (en court-circuit). Cela est dû au fait qu'en circuit ouvert le photocourant est presque nul et en court-circuit la phototension est quasi-nulle. Entre les deux situations existe une situation intermédiaire où la puissance électrique est maximale. Cette puissance maximale est obtenue pour une valeur  $Sf_{max}$  de la vitesse de recombinaison à la jonction du champ électrique.

En présence de polarisation la puissance électrique est non-nulle en circuit ouvert car le photocourant n'est plus nul. Cette puissance augmente avec le champ électrique de polarisation. L'augmentation de la puissance électrique en fonction du champ électrique est synonyme d'une amélioration de la qualité de conversion de la photopile.

Nous représentons ci-dessous le profil de la caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.



<u>Figure III.31</u> : Profil de la puissance électrique en fonction de la phototension pour différentes valeurs du champ électrique (D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm ; Z=0,04 cm)

On note à la figure ci-dessus en l'absence de polarisation que la puissance électrique croît jusqu'à une certaine valeur de la tension où elle atteint son maximum puis décroît jusqu'à tendre vers une valeur nulle.

En présence de polarisation électrique la puissance maximale de la photopile augmente avec le champ électrique. Cela prédit une augmentation du rendement de conversion de la photopile avec le champ électrique.

#### III.11.2 Effet de la profondeur z de la base

Nous représentons ci-dessous le profil de la puissance électrique en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur z de la base.



<u>Figure III.32</u> : Profil de la puissance électrique en fonction du champ électrique pour différentes valeurs de la profondeur de la base ( $Sf=7.10^7$  cm .s<sup>-1</sup>; D=26 cm<sup>2</sup>.s-1; L=0,01 cm) Sur cette figure on observe une augmentation de la puissance électrique avec le champ électrique de polarisation comme illustré précédemment mais une diminution de la puissance en fonction de la profondeur z de la base. Cette diminution de puissance est due à la diminution du photocourant et de la phototension en profondeur. Elle est équivalente à une baisse de la qualité de conversion de la photopile pour des valeurs importantes de la profondeur z.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé l'effet du champ électrique de polarisation et de celui de la profondeur sur le comportement des porteurs minoritaires de la base et des paramètres électriques.

Les résultats obtenus ont montré que le champ électrique issu d'une polarisation favorise le mouvement des porteurs minoritaires vers les jonctions. Ce phénomène augmente ainsi la densité des porteurs de charge dans la base, le photocourant, la phototension et la résistance shunt. En ce sens, l'application d'un champ électrique présente un intérêt pour l'amélioration du rendement d'une photopile car comme illustré dans cette étude le champ électrique augment la puissance maximale d'une photopile. Nous notons également dans cette étude que la profondeur z de la base diminue la performance de la phototpile dans ce sens où elle diminue la densité de photocourant et la phototension.

#### **Références bibliographiques**

- S. Erel, "The effect of electric and magnetic fields on the operation of a photovoltaic cel" Solar Energy Materials & Solar Cells 71 (2002) 273-280.
- [2] Barro F.I., Zerbo I., Lemrabott O.H., Zougmore F. and Sissoko G., "Bulk and surface recombination parameters measurement in silicon double sided surface field solar cell under constant white bias light," *Proc.17th European PVSEC Munich 36, pp. 368-371,* 2001.
- [3] Sissoko G., Sivoththananm S., Rodot M. and Mialhe P., "Constant Illumnation- 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, poster 1B, 12-16, Montreux, Switzerland, pp. 352-354, 1992.*
- [4] Mohammad S. N., "An alternative method for the performance analysis of silicon solar cells," J. Appl. Phys, 62(2), pp. 767-772, 1987.
- [5] Sissoko, G., C. Museruka, A. Corréa, I. Gaye and A. L. Ndiaye, "Light spectral effect on recombination parameters of silicon solar cell," *Renewable Energy 3, pp. 1487-1490, 1996.*
- [6] Sissoko G., Sivoththananm S., Rodot M. and Mialhe P., "Constant Illumnation- 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, poster 1B, 12-16, Montreux, Switzerland, pp. 352-354, 1992.*
- [7] Zoungrana M., Dieng B., Lemrabott O.H., Touré F., Ould El Moujtaba M.A., Sow M.L. and Sissoko G., "External Electric Field Influence on Charge Carriers and Electrical Parameters of Polycrystalline Silicon Solar Cell", *Research Journal of applied sciences, Engineering* and technology, 4(17): 2967-2972, 2012.
- [8] Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E. and Corkish R., "Applied photovoltaics", 2<sup>nd</sup> edition, ARC Center for Advanced Silicon photovoltaics and photonics, 2007.
- [9] Kumar R.A., "Measurement of solar cell AC parameters using impedance spectroscopy", *A degree of master, Department of instrumentation, India institute of science Bangalore India, 2000.*

[10] Barro F.I., Gaye S., Dème M., Diallo H.L., Samb M.L., Samoura A.M., Mbodji S., and Sissoko G., "Influence of grain size and grain boundary recombination velocity on the series and

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

shunt resistances of a polycrystalline silicon solar cell", *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp 612-615, 2008.* 

[11] Museruka C., "Effet de la longueur d'onde de l'excitation optique sur les phénomènes de recombinaison dans une photopile en régime statique et transitoire", *thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 1995.* 

**[12]** Dieng A., Sow M.L., Mbodji S., Samb M.L., Ndiaye M., Thiame M., Barro F.I. and Sissoko G., ''3D study of polycrystalline silicon solar cell: influence of applied magnetic field on the electrical parameters'', *Semiconductor Science and technology*, *26(9): 473-476*, 2011.

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MIIE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

## **Conclusion et perspectives**

Dans ce travail de recherche les paramètres électriques d'une photopile au silicium à jonction verticale parallèle ont été étudiés sous l'influence de la profondeur de la base et d'un champ électrique de polarisation.

Pour ce faire on a d'abord fait une étude bibliographique portant sur la technologie des photopiles à jonction verticale et sur les techniques de caractérisation des photopiles en régime statique. Des techniques de fabrication des photopiles à jonction verticale ont été présentées à travers quelques travaux. Ces types de photopiles de par leur conception peuvent être connectés soit en parallèle pour augmenter le courant généré soit en série pour augmenter la tension délivrée au circuit extérieur. Afin d'augmenter leur rendement, ces photopiles peuvent être fabriquées avec des lamelles pour diminuer la distance qui sépare l'émetteur et l'endroit où les porteurs sont générés dans la base. Les paramètres phénoménologiques tels que la longueur de diffusion, les vitesses de recombinaison à la jonction et en face arrière ont été déterminés par différentes méthodes pour des photopiles à jonction horizontale fonctionnant en régime statique. L'influence d'un champ électrique externe sur les paramètres électriques d'une photopile à jonction horizontale a aussi été considérée.

Ensuite, nous avons analysé dans la deuxième partie de ce travail le comportement des porteurs de charges et des paramètres électriques lorsque la profondeur de pénétration de la lumière augmente. Etant donné que la génération des porteurs diminue en profondeur selon la loi de Beer Lambert, la performance de la photopile diminue pour une grande épaisseur de couche. Le photocourant, la phototension, la capacité de la zone de charge d'espace, la puissance électrique ainsi que le rendement de conversion diminuent avec la profondeur de la base alors que les résistances série et shunt augmentent. L'étude du photocourant total généré au sein de la photopile nous a permis de connaître la valeur de la profondeur à partir de laquelle le photocourant collecté reste constant. Cette valeur a été considérée comme une valeur optimale de l'épaisseur de couche de notre modèle de photopile.

Enfin dans la dernière partie de cette recherche nous avons pris en considération l'influence d'un champ électrique extérieur. L'étude a montré que le champ électrique de polarisation favorise le mouvement des porteurs minoritaires vers la jonction. Il permet aux porteurs de charges d'avoir

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

suffisamment d'énergie pour traverser la jonction et générer un courant électrique. D'ailleurs l'application d'un champ électrique externe permet de collecter un courant même lorsque la photopile fonctionne au voisinage du circuit ouvert. Ainsi, la densité des porteurs minoritaires, le photocourant, la phototension, la résistance shunt, la capacité de la zone de charge d'espace et la puissance électrique augmentent avec le champ électrique de polarisation. Donc l'application d'un champ électrique de polarisation améliore l'efficacité de la photopile.

Pour la suite de ce travail, on peut envisager de faire l'étude sur une photopile verticale série.

On peut poursuivre le travail en régime dynamique fréquentiel ou en dynamique transitoire. On pourra aussi tenir compte de l'effet combiné d'un champ magnétique et électrique.

L'étude peut être élargie en tenant compte de la contribution de l'émetteur et de la zone de charge d'espace. L'effet de la température, de l'irradiation ou du taux de dopage peut être aussi pris en compte.
# **Annexes mathématiques**

Ici nous détaillons certains calculs faits dans les chapitres II et III.

I. Chapitre II

### Résolution de l'équation de continuité

L'équation de continuité des porteurs de charge minoritaires est :

$$G(z) + D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - R(x) = 0 \quad (1)$$

Où  $G(z) = \sum_{i=1}^{3} a_i e^{-b_i \cdot z}$  est le taux de génération des porteurs à la profondeur z de la base ;

 $R(x) = \frac{\delta(x)}{\tau}$  est le taux de recombinaison des porteurs à la position x.

En remplaçant ces deux expressions dans l'équation (1) on obtient :

$$\sum_{i=1}^{3} a_i \, \boldsymbol{\varrho}^{-\boldsymbol{b}_i \cdot \boldsymbol{Z}} + \boldsymbol{D} \cdot \frac{\partial^2 \delta(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}^2} - \frac{\delta(\boldsymbol{x})}{\tau} = 0 \quad (2)$$

En divisant chaque terme par le coefficient de diffusion D et en tenant compte du fait que

$$D \cdot \tau = L^2 \text{ on a : } \frac{1}{D} \sum_{i=1}^3 a_i \, e^{-b_i \cdot Z} + \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = 0 \quad (3)$$

Cette dernière équation est une équation différentielle de second degré avec second membre à coefficients constants.

La solution générale de cette équation est la somme de la solution de l'équation sans second membre et de la solution particulière.

L'équation sans second membre est :  $\frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta(x)}{L^2} = 0$  (4) et admet comme

solution 
$$\delta_1(x) = Ach(\frac{x}{L}) + Bsh(\frac{x}{L})$$
 (5)

La solution particulière est 
$$\delta_2(z) = \sum_{i=1}^3 C_i e^{-b_i \cdot z}$$
 (6)

D'où la solution générale de l'équation de continuité est

$$\delta(x,z) = Ach(\frac{x}{L}) + Bsh(\frac{x}{L}) + \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z}$$
(7)

Les coefficients A et B de l'équation (7) sont obtenus en appliquant les conditions :

A la jonction émetteur-base (en x=0)  $D \cdot \frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x,z)\Big|_{x=0}$  (8) et

Au milieu de la base (en x=H/2) 
$$\frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=\frac{H}{2}} = 0$$
 (9)

Tout calcul fait on a :

$$A = \frac{-L \cdot Sf \cdot \cosh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) \cdot \sum_{i=1}^{3} C_{i} e^{-b \cdot z_{i}}}{L \cdot Sf \cosh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) + D \cdot \sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right)}$$
(10)  
$$B = \frac{L \cdot Sf \cdot \sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) \cdot \sum_{i=1}^{3} C_{i} e^{-b \cdot z_{i}}}{L \cdot Sf \cosh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) + D \cdot \sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right)}$$
(11)

#### Calcul de la densité de photocourant Jph

La densité de photocourant est donnée par : 
$$J_{ph} = 2 \cdot q \times D \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=0}$$
 (12)

Avec q la charge de l'électron ; D le coefficient de diffusion, le coefficient 2 est dû au fait que la collecte des porteurs minoritaires dans la base se fait à travers les deux jonctions qui sont de part et d'autre de la base de la cellule à jonction verticale parallèle.

Après calcul on trouve 
$$J_{ph} = 2 \cdot q \cdot D \cdot \frac{B}{L}$$
  $\implies$   
 $J_{ph} = 2 \cdot q \cdot D \cdot \frac{Sf \cdot \sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) \cdot \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z}}{L \cdot Sf \cosh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) + D \cdot \sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right)}$  (13)

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

#### Calcul de la densité de photocourant de court-circuit Jcc

La densité de photocourant de court-circuit est obtenue à partir de la relation

$$J_{cc} = \lim_{Sf \to \infty} J_{ph} \tag{14}$$

Après calcul on obtient : 
$$J_{cc} = 2 \cdot q \cdot D \cdot \frac{\sinh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right) \cdot \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z}}{L \cdot \cosh\left(\frac{H}{2 \cdot L}\right)}$$
 (15)

#### Calcul de la densité de photocourant total généré J<sub>T</sub>

La densité de photocourant total photogénéré dans une photopile d'épaisseur de couche

$$z = z_{\text{max}} = d$$
 est obtenue par la relation  $J_T = \int_0^d J_{CC} \cdot dz$  (16)

En intégrant suivant z on a :  $J_T = 2 \cdot q \cdot L \cdot \tanh(\frac{H}{2 \cdot L}) \cdot \sum_{i=1}^{3} \frac{a_i}{b_i} \cdot (1 - e^{-b_i \cdot d})$  (17)

#### Calcul de la phototension Vph

$$V_{ph} = V_T \left[ \ln \frac{N_B}{n_i^2} \delta(0, z) + 1 \right]$$
(18)

Où n<sub>i</sub> est la concentration intrinsèque des porteurs minoritaires, N<sub>B</sub> le taux de dopage de la base en atomes d'impureté et  $V_T$  est la tension thermique.  $V_T = \frac{k \cdot T}{q}$  (19)

k est la constante de Boltzmann, T la température, q la charge de l'électron.

Après calcul on obtient : 
$$V_{ph} = V_T \cdot \ln \left[ \frac{N_B}{n_i^2} (A + \sum_{i=1}^3 C_i \, \boldsymbol{\varrho}^{-b_i \cdot \boldsymbol{z}}) + 1 \right]$$
 (20)

#### Calcul de la phototension de circuit-ouvert Vco

$$V_{CO} = \lim_{Sf \to 0} V_{ph} \tag{21}$$

Après calcul l'expression de Vco est donnée par:

$$V_{CO} = V_T \ln \left[ \frac{N_B}{n_i^2} \cdot \sum_{i=1}^3 C_i \, \boldsymbol{\varrho}^{-b_i \cdot z} + 1 \right]$$
(22)

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR MILE OULIMATA MBALLO LASES\_FST\_UCAD\_2016

### Calcul de la résistance série Rs

La résistance série de la photopile est donnée par la relation

$$R_{S}(Sf) = \frac{V_{co} - V_{ph}(Sf)}{J_{ph}(Sf)}$$
(23)

# Calcul de la résistance shunt Rsh

La résistance shunt de la photopile est donnée par la relation suivante :

$$R_{Sh}(Sf) = \frac{V_{ph}(Sf)}{J_{cc} - J_{ph}(Sf)}$$
(24)

# Calcul de la capacité de la zone de charge d'espace C

L'expression de la capacité de la zone de charge d'espace est donnée par:

$$C = q \cdot \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial V_{ph}} \bigg|_{x=0}$$
(25)

En dérivant la densité des porteurs minoritaires par rapport à la phototension on a :

$$C = \frac{q \cdot n_o}{V_T} + q \cdot \frac{\delta(0, z)}{V_T}$$
(26)

Donc la capacité de la zone de charge d'espace est la somme de deux termes :

C=C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> où 
$$C_o = \frac{q \cdot n_o}{V_T}$$
 représente la capacité sous obscurité de la photopile.

# Calcul du courant de diode Id

$$Id = 2 \times q \times Sf_0 \times \delta(0, z) \tag{27}$$

$$Id = 2 \times q \times Sf_0 \times \frac{n_i^2}{N_B} \left( e^{\frac{V_{ph}}{V_T}} - 1 \right)$$
<sup>(28)</sup>

**Puissance électrique** 

$$P = V_{ph} \times \left(J_{ph} - I_d\right) \tag{29}$$

Rendement de conversion électrique

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}}$$
II. Chapitre III
(30)

#### Résolution de l'équation de continuité

En tenant compte du champ électrique de polarisation, l'équation de continuité des porteurs de charge minoritaires est donnée par :

$$G(z) + D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} + \mu \cdot E \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} - R(x) = 0$$
(31)

Où G(z) le taux de génération des porteurs à la profondeur z :  $G(z) = \sum_{i=1}^{3} a_i e^{-b_i z}$ ;

 $D \cdot \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2}$  est le terme de diffusion où D représente le coefficient de diffusion ;  $\mu \cdot E \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x}$  est le terme de conduction où E représente le champ électrique total somme du champ extérieur de polarisation et du champ intérieur dû au gradient de concentration des électrons dans la base.

R(x) le taux de recombinaison des porteurs à la positon x :  $R(x) = \frac{\delta(x)}{\tau}$  et

 $\delta(x)$  la densité des porteurs minoritaires photocréés à la position x de la base.

En remplaçant tous ces termes dans (31) et en divisant par D l'équation de continuité devient :

$$\frac{1}{D} \cdot \sum_{i=1}^{3} a_i \, e^{-b_i \cdot z} + \frac{\partial^2 \delta(x)}{\partial x^2} + \frac{\mu \cdot E}{D} \cdot \frac{\partial \delta(x)}{\partial x} - \frac{1}{D \cdot \tau} \cdot \delta(x) = 0$$
(32)

L'équation (32) est un équation différentielle avec second membre ; sa résolution se fait en considérant d'abord l'équation sans second membre puis en ajoutant la solution particulière.

En posant  $D \cdot \tau = L^2$  et  $L_E = \frac{\mu \cdot E \cdot L^2}{D}$  la solution générale de l'équation (32) est

$$\delta(x,z) = e^{\beta \cdot x} \left[ Ach(\alpha \cdot x) + Bsh(\alpha \cdot x) \right] + \sum_{i=1}^{3} C_i e^{-b_i \cdot z}$$
(33)

$$\alpha = \frac{(L^{2}_{E} + 4 \cdot L^{2})^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot L^{2}}; \qquad \beta = \frac{-L_{E}}{2 \cdot L^{2}}; \qquad C_{i} = \boldsymbol{\alpha}_{i} \cdot \frac{L^{2}}{D}$$

Les coefficients A et B de l'équation (33) sont déterminés à partir des conditions suivantes :

A la jonction émetteur-base (en x=0)  $D \cdot \frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x,z)\Big|_{x}$ Au milieu de la base (en H/2)  $\frac{\partial \delta(x,z)}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0$ 

$$\frac{D \cdot \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x}}{\frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x}}\Big|_{x=0} = Sf \cdot \delta(x, z)\Big|_{x=0}$$
(34)  
$$\frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x}\Big|_{x=\frac{H}{2}} = 0$$
(35)

Tout calcul fait on a

$$A = -Sf \sum_{i=1}^{3} C_{i} e^{-b \cdot z} \left\{ \frac{\beta \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \alpha \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)}{\alpha \cdot Sf \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \left[\alpha^{2} \cdot D + \beta(Sf - \beta \cdot D)\right] \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)} \right\} (36)$$
$$B = Sf \sum_{i=1}^{3} C_{i} e^{-b_{i} \cdot z} \left\{ \frac{\alpha \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \beta \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)}{\alpha \cdot Sf \cosh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right) + \left[\alpha^{2} \cdot D + \beta(Sf - \beta \cdot D)\right] \sinh\left(\frac{\alpha \cdot H}{2}\right)} \right\} (37)$$

Densité de photocourant Jph

$$J_{ph} = 2 \cdot q \left[ D \frac{\partial \delta(x, z)}{\partial x} \right|_{x=0} + \mu \cdot E \cdot \delta(0, z) \right]$$
(38)

THESE DE DOCTORAT UNIQUE PRESENTEE PAR **MILE OULIMATA MBALLO** LASES\_FST\_UCAD\_2016

# ETUDE DES PARAMETRES ELECTRIQUES D'UNE PHOTOPILE AU SILICIUM A JONCTION VERTICALE PARALLELE SOUS POLARISATION ELECTRIQUE ET SOUS ECLAIREMENT POLYCHROMATIQUE EN REGIME STATIQUE

#### THESE DE DOCTORAT UNIQUE EN PHYSIQUE

Option : Energie Solaire

Présenté par

Mlle. Oulimata MBALLO

Soutenue publiquement le 04/02/2017 devant le jury composé de :

| Président    | Grégoire SISSOKO    | Professeur Titulaire  | FST/UCAD  |
|--------------|---------------------|-----------------------|-----------|
| Rapporteurs  | Mamadou lamine SAMB | Maître de Conférences | UT/THIES  |
|              | Moustapha DIENG     | Professeur Titulaire  | FST/UCAD  |
| Examinateurs | Mamadou WADE        | Maître de Conférences | EPT/THIES |
|              | Ibrahima LY         | Maître de Conférences | EPT/THIES |
|              | Mor NDIAYE          | Maître de Conférences | FST/UCAD  |
| Directeur    | Séni TAMBA          | Maître de Conférences | EPT/THIES |

# Résumé :

Cette étude est subdivisée en trois parties :

Une première partie où une étude bibliographique sur les techniques de fabrication des photopiles à jonction verticale et sur la caractérisation des photopiles en régime statique a été menée. Dans la deuxième partie nous avons étudié l'effet de la profondeur z de la base sur le comportement des porteurs de charges minoritaires et sur les paramètres électriques tels que le photocourant, la phototension, la capacité de la zone de charge d'espace, la puissance électrique, le rendement de conversion et les résistances série et shunt. Aussi le photocourant de court-circuit, la phototension de circuit ouvert et la capacité de la photopile en court-circuit ont été étudiés.

La troisième partie du travail a pris en compte l'influence d'un champ électrique de polarisation. Après avoir résolu l'équation de continuité en tenant compte du terme de conduction dû au champ électrique, l'expression de la densité des porteurs minoritaires et celle de la densité de photocourant, de la phototension, des résistances série et shunt, de la capacité de la zone de charge d'espace et de la puissance ont été données. Tous ces paramètres ont été analysés pour différentes valeurs du champ électrique de polarisation.

*Mots clés* : photopile à jonction verticale parallèle - profondeur de la base - champ électrique – éclairement polychromatique – régime statique.