

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE LarbiTèbessi-Tébessa-
Faculté des Sciences Exactes Et Sciences de la Nature et de la Vie Département
Sciences de la Matière

Mémoire Master

domaine : Sciences de
la Matière Filière : Physique
Option : Physique de la matière condensée

Thème

Étude théorique des effets des paramètres du courant de conduction des cellules solaires MIS

Présenté
Par: Aounallah Abir
et
Mokdad NourElhouda

Devant le jury:

Président :	F.BENMAKHLOUF	Prof.	Université LarbiTèbessi-Tébessa
Rapporteur:	N.Rouag	M.C.A	Université LarbiTèbessi-Tébessa
Examineurs:	M.E.MANSOUR	M.C.B	Université LarbiTèbessi-Tébessa

Datedesoutenance:
25/06/2019
Note:
Mention:

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE Larbi Tèbessi-Tébessa-
Faculté des Sciences Exactes Et Sciences de la Nature et de La Vie
Département Sciences de la Matière



Mémoire Master

domaine : Sciences de la Matière
Filière : Physique
Option : Physique de la matière condensée

Thème

Étude théorique des effets des paramètres du courant de conduction des cellules solaires MIS

Présenté Par :
Aounallah Abir
et
Mokdad Nour Elhouda

Devant le jury :

Président :	F. BENMAKHOUF	Prof.	Université Larbi Tèbessi-Tébessa
Rapporteur :	N. Rouag	M.C.A	Université Larbi Tèbessi-Tébessa
Examineurs :	M.E. MANSOUR	M.C.B	Université Larbi Tèbessi-Tébessa

Date de soutenance : 25/06/2019
Note : Mention :



Faculté des Science Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Déclaration sur l'honneur de non-Plagiat

(À joindre obligatoirement au mémoire; Remplie et signée)



Nous soussignons

Nom, prénom: MOKDAS NOUR & Aoun Allah Amini

N° de carte d'étudiant: (1) 2020 / 4027728 (2) 2021 / 4019768

Régulièrement inscrits (es) en **Master** au **Département Sciences de la Matière**

Année universitaire: **2018/2019**

Domaine: **Sciences de la matière**

Filière: **Physique**

Spécialité: physique de la matière Condensée

Intitulé du memoire:

Etude théorique des effets des paramètres du courant de Construction des Cellules Solaires M/S

Attestons que notre mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Nous certifions également que nous n'avons ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article, ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé:

Les étudiants seront convoqués devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont:

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent.
- L'exclusion d'une année du master.
- L'exclusions définitive.



Fait à Tébessa, le:

Signature des étudiants (es):

(1): [Signature] (2): [Signature]

ملخص:

إن دراسة المركبان (MIS) معدن-عازل-شبه ناقل أمر لا غنى عنه, لأنها تستخدم في مجال الالكترونيات كمكثف, كصمام ثنائي النفق, في خلية الذاكرة, في الخلية الشمسية, في هياكل التحكم والترانزستورات. ان عملية إعطاء نماذج الخلايا الشمسية هي وسلة هامة من اجل فهم ليس فقط كيفية عمل هذه المركبات ولكن بالأخص كيفية التحكم في الوسائط التي تتحكم في أدائها. نقدم في هذا العمل مناقشة نموذجاً يحاكي هذه الميزة الكهربائية (I-V) للخلايا الشمسية من نوع MIS والذي استخدم في وضع الظلام الاضاءة من اجل فهم تأثيرات الوسائط المختلفة لهذا النموذج المقترح.

الكلمات المفتاحية: آليات النقل, البنية م.ع.ش ن, تيار النفق, النموذج, المحاكاة, Matcad

Abstract:

The study of metal-insulator-semiconductor (MIS) is indispensable because it is used in the field of electronics as a semiconductor or capacitors such as a double-tunnel, in a memory cell, in a solar cell, in control structures and in transistors.

The process of modeling solar cells is an important tool to understand not only how the semiconductor works, but particularly how to control the parameters that control their performance.

In this work we will discuss a model that simulates the current-voltage (I-V) characteristics of solar cells MIS, which was applied in the dark and under lighting mode in order to the effect of the different parameters characterizing this model.

Keywords : Mécanisms of transport, MIS structure, Tunneling current, Model, Simulation, Matcad

Résumé:

L'étude de la structure MIS métal-isolant-semi-conducteur est très indispensable, utilisée en électronique comme capacité semi-conducteur, diode tunnel, cellule mémoire, cellule solaire et structure de commandé dans les transistors.

La modélisation des cellules solaires est un outil important permettant de comprendre non seulement le fonctionnement des composants mais aussi et surtout maîtriser les paramètres limitatifs des performances de celles-ci.

Afin de comprendre les effets des différents paramètres caractérisant la caractéristique courant-tension (I - V) pour ces composants à structures MIS, un modèle simulant cette caractéristique I - V est utilisé en mode obscurité et sous illumination est présenté puis discuté.

Les mots clés : Diode, Mécanismes de transport, structure MIS, courant tunnel, Modèle, Simulation, M

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions DIEU qui nous a aidé à terminer ce modeste travail. A terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos profonde gratitude à Monsieur NOUARI ROUAG, Maître Conférences à l'université de Tébessa, pour avoir dirigé ce mémoire et encadré nos travaux. nous avons beaucoup profité de ses connaissances scientifiques et de son sérieux, son expérience dans le domaine de la physique des composants. et beaucoup plus ses qualités humaines et sa disponibilité.

Nous remercions sincèrement Madame Benmekhlouf Foula, Professeur à l'université de Tébessa, pour l'honneur nous accordé en acceptant de présider le jury de soutenance.

Nous tenons à exprimer notre respectueuse gratitude à Monsieur Mansour Mohamed El-Hadi, Maître Conférences à l'université de Tébessa, d'avoir répondu aimablement afin de jury ce travail en participant au jury du mémoire.

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Signification	Unité
D_{np}	Coefficient de diffusion des électrons ou de trous	$m^2.s^{-1}$
E_{FM}	Niveau de Fermi d'un métal	Joules ou eV
T	Température	300K
h	Constante de Planck	J.s
k	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
\hbar	Constante de Planck réduite	$h/2\pi J.s$
N_A	concentration en impuretés de type accepteur	m^{-3} ou cm^{-3}
N_{A^-}	concentration en impuretés ionisées de type accepteur	m^{-3} ou cm^{-3}
N_C	Densité d'états équivalente dans la BC, ramenée	$10^{-13} cm^{-3}$
n^*	Nombre de sites de pièges	1
N_t	La densité de pièges	m^{-3} ou cm^{-3}
N_V	Densité d'états équivalente dans la bande de conduction, ramenée	m^{-3} ou cm^{-3}
q	Valeur absolue de la charge de l'électron	C
T	Température absolue	K
d_{ox}	Épaisseur d'oxyde	m
V_G	Tension entre grille et substrat	V
ϵ_0	Permittivité du vide	Fm^{-1}
ϵ_{ox}	permittivité d'un oxyde	Fm^{-1}
ϵ_r	Constante diélectrique relative	1
C_{ox}	Capacité de l'oxyde par unité de surface	Fm^{-2}
$m_{n,p}$	Masse effective des électrons ou de trous	Kg
$\mu_{n,p}$	Mobilité des électrons ou de trous	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
m^*	La masse effective des électrons	kg

χ	Affinité électronique d'un semi-conducteur	J ou eV
F_{ox}	Champ électrique	V
$q\phi_t$	La différence d'énergie entre la bande de conduction et un site de piègeage	eV
$E_g/2$	La largeur de la bande interdite d'un semi-conducteur	eV
E_i	Niveaux d'énergie intrinsèque	eV
J	Densité de courant	A/m ²
W_M	Travail de sortie d'un métal	Joule
$q\phi$	La profondeur du puits de potentiel dans l'isolant	eV
ψ_s	Potential de surface dans le semi-conducteur	eV
Q_f	La charge fixe d'oxyde	C
Q_{sc}	La charge d'un semi-conducteur	C
Q_{ss}	La charge des états d'interface	C
τ_s	Constante de temps pour les états de surface	s
v_{th}	Vitesse thermique des électrons	m/s
D_{it}	La densité des états d'interface	cm ⁻² .eV ⁻¹
D_n	Coefficient de diffusion de l'électron	1

LISTE DESTABLEAUX

III.1 Table des différents paramètres utilisés dans le calcul [10]. 35

TABLE DES FIGURES

I.1	Les panneau solaire photovoltaïque.	3
I.2	Le fonctionnement d'un panneau solaire.	4
I.3	CellulesolaireàjonctionPN.....	5I.4
	Cellulepolycristalline.....	6I.5
	Cellulemonocristalline.....	
6I.6	Celluleamorphe.....	7
I.7	Forme simple d'un condensateur MIS. [2].	8
I.8	Transfert des charges dans la structure MIS [2].	8
I.9	diagrammedebandesd'énergieenrégimed'accumulation[5].....	11
I.10	diagrammedebandesd'énergieenrégimededéplétion[5].	12
I.11	Ladensitédesélectronsetdestrousal'interfaceenfonctiondupotential de surface ψ_s [5].....	13
I.12	structure MIS en régime de'inversion[5].....	14
I.13	Diagrammed'énergiealасurfaced'unsemiconducteurdetypep.[5]..	15
I.14	barrière de potentiel en fonction du dopage pour différents typesdesmétauxdegrille.[5].....	18
II.1	Le diagramme des bandesd'énergie	20
II.2	Lediagrammedesbandesd'énergie d'nestructureMISsouséclairement	25
II.3	Structured'unecellulesolairephotovoltaïqueavecsondiagrammede bande.....	28
II.4	CaractéristiqueI(V)d'unecellulesolaireal'obscuritéetsouséclairement	30
III.1	Le rôle de simulation[10].....	32
III.2	Fenêtre d'édition du logiciel Mathcad[10].	32
III.3	Organigrammedel'algorithmedecalculdeladensitéducourant.....	33

III.4 FluxduphotonsincidentsparunitésurfaceetparunitédetempssetCoefficient td'absorptionenfonctiondelongueur'd'onde	36
III.5 Lacaractéristiquecourant-tension(I-V)delastuctureMISdetypeppour différents valeurs de φ_m . :(a) Variation du potentiel desurface ,(b)Variationdupotentiield'équilibre,(c)Densitédecourantet(d)Les différentes composantes du couranttotal.....	38
III.6 Lacaractéristiquecourant-tension(I- V)delastuctureMISdetypeppourdifférentsdedopage N_a .:(a)Variation dupotentiieldesurface,(b) Variationdupotentiield'équilibreet(c)Densitédecourant.	40
III.7 Lacaractéristiquecourant-tension(I- V)delastuctureMISdetypeppourdifférents valeurs de d_j . :(a) $\varphi_m = 4.3\text{eV}$ et (b) $\varphi_m = 4.9\text{eV}$	42
III.8 Lacaractéristiquecourant-tensionI(V)delastuctureMISdetypeppour deux valeurs de Charges fixes N_f	43
III.9 Lacaractéristiquecourant-tension(I- V)delastuctureMISdetypeppourdifférentsdedopage D_{it} .:(a)Variationd upotentiieldesurface,(b) Variationdupotentiield'équilibreet(c)Densitédecourant.	44
III.10Lacaractéristiquecourant-tensionI(V)delastuctureMISdetypeppour deux valeurs de H	46

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	7
Table des figures	i
I Généralités sur les cellules solaires	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque	4
I.3. Différents type des panneaux solaires photovoltaïque	5
I.3.1. Les cellules polycristallines	5
I.3.2. Les cellules monocristallines	6
I.3.3. Les cellules amorphe.....	6
I.4. Composition d'un panneau solaire photovoltaïque.....	7
I.5. La structure métal isolant semiconducteur MIS.....	8
I.5.1. Représentation.....	8
I.5.1.1. Transfert des charges	8
I.5.1.2. Hypothèse	9
I.5.1.3. Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS ..	9
I.5.2. La structure MIS idéale.....	10
I.5.2.1. Caractéristiques d'une structure idéale.....	10
I.5.2.2. Principe et régimes de fonctionnement.....	10
I.5.2.2.1 La structure MIS en régime d'accumulation .	10
I.5.2.2.2 La structure MIS en régime de déplétion : . .	12
I.5.2.2.3 La structure MIS en régime d'inversion	13
I.5.2.3. La zone des charges d'espace.....	15
I.5.3. La structure MIS réelle	16
I.5.3.1. Différence des travaux de sortie	17
I.5.3.2. La barrière de potentiel	17

I.6. Conclusion.....	18
II Modélisation des cellules solaires MIS	19
II.1. Introduction.....	19
II.2. Diagramme des bandes d'énergie.....	19
II.3. Les différentes composantes du courant totale.....	21
II.3.1. Courant de diffusion.....	22
II.3.2. Courant de génération recombinaison.....	22
II.3.3. Courant tunnel bande à bande.....	22
II.3.4. Courant des états de surface.....	23
II.3.5. Courants de photo-génération.....	25
II.3.6. Le courant total.....	26
II.4. Grenades essentielles caractérisant une cellule solaire.....	27
II.4.1. Courant de court circuit I_{cc}	28
II.4.2. Tension en circuit ouvert V_{oc}	28
II.4.3. Le facteur forme FF.....	29
II.4.4. Rendement de conversion η	29
II.5. Caractéristique électrique d'une cellule solaire.....	29
II.6. Conclusion.....	30
III RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	31
III.1. Introduction.....	31
III.2. Simulation.....	31
III.2.1. Le rôle de simulation.....	31
III.2.2. Présentation du logiciel de programmation Mathcad.....	32
III.2.3. Étude des effets des différents paramètres du courant de conduction dans les cellules solaires MIS.....	33
III.2.4. Le logiciel de traitement des résultats.....	34
III.2.5. Paramètre de simulation.....	34
III.2.6. Photoconductance ou Conductivité modifiée/Résistivité sous éclairement.....	36
III.3. Discussions des résultats de simulation.....	37
III.3.1. Effet de variation du travail de sortie du métal ϕ_m	38
III.3.2. Effet de variation de dopage N_a	39
III.3.3. Effet de variation d'épaisseur d'oxyde d_i	41
III.3.4. Effet de variation de la densité d'états de surface N_f	42
III.3.5. Effet de variation de la densité des états d'interfaces D_{it}	43
III.3.6. Effet de variation de l'épaisseur de la cellule solaire H	45
III.4. Conclusion.....	46

Bibliographie

49

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel. L'exploitation de toutes les sources est la question que le futur verra poser à l'homme. Cependant, l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'un des enjeux les plus importants qu'il doit relever actuellement l'industrie de la microélectronique est sans doute l'amélioration des performances des cellules solaires afin d'obtenir des rendements de conversion les plus élevés possibles. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle est utilisée pour fabriquer des convertisseurs photovoltaïques dont les cellules solaires représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent de développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces dernières raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

Ce travail porte sur l'étude du comportement électrique et spécialement la Carac-

téristique courant-tension (I - V) des cellules solaires de structures MIS. Notre travail s'inscrit dans le cadre de la simulation et modélisation des propriétés électriques des cellules solaires MIS. Spécialement, il porte sur l'étude des effets des paramètres tels que le travail de sortie du métal ϕ_m , la concentration du dopage N_a ; la densité des états d'interface D_{it} , l'épaisseur de l'isolant d_i et l'épaisseur du substrat H sur la caractéristique courant-tension (I - V). Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle qui simule cette caractéristique en mode obscurité. Ce mémoire est constitué principalement de trois chapitres: Dans le premier chapitre; on présente des généralités sur l'énergie solaire, les phénomènes de base dans ces composants MIS. On s'est concentré sur la description de sa structure de bande et sur les phénomènes de transport de charge dans ces structures.

Dans le deuxième chapitre; on présente le modèle de simulation de la caractéristique électrique courant-tension I - V des structures MIS et les différentes expressions du courant de conduction qui résultent du transport de charge dans ces structures.

Le troisième chapitre est consacré à la discussion des résultats de simulation par lequel on termine ce mémoire par une conclusion.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES CELLULES SOLAIRES

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen de la cellule photovoltaïque. [1]



Figure I.1—Les panneaux solaires photovoltaïques [1].

Pour étudier cette structure nous allons présenter dans ce chapitre le principe de fonctionnement des cellules solaires à effet photovoltaïque, on présente des généralités

et des concepts de base sur les cellules solaires photovoltaïques et tels que le principe de l'effet photovoltaïque, et les principes des composants des dispositifs solaires, puis, on rapporte les schémas et les figures les plus utilisés. [1]

I.2. Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque est très simple d'après cette figure.

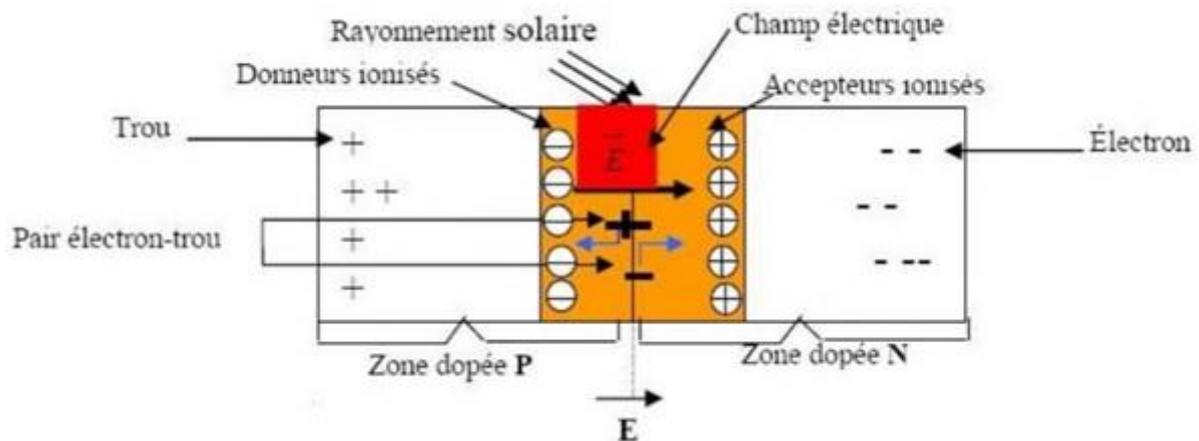


Figure I.2 – Le fonctionnement d'un panneau solaire [2].

La lumière produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu. C'est-à-dire la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur générant ainsi des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le

champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. [2]

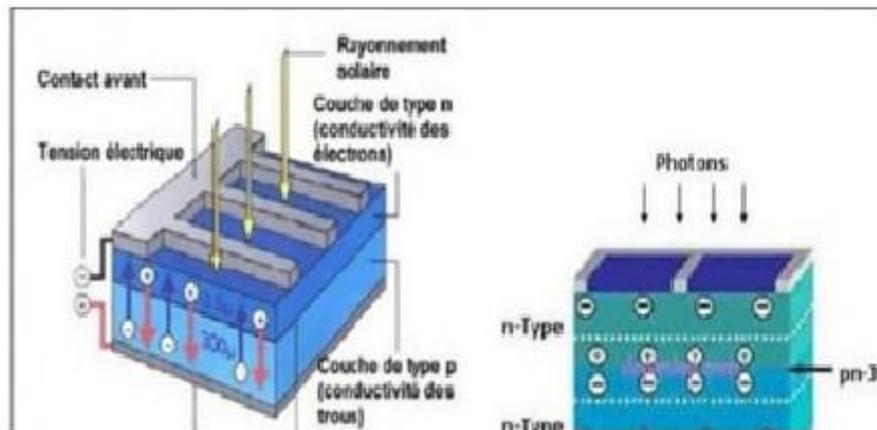


Figure I.3—Cellule solaire à jonction PN. [1]

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (phototension), s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule. [2]

I.3. Différents types de panneaux solaires photovoltaïques

Il existe 3 types de cellules photovoltaïques qui varient selon la qualité du silicium.

I.3.1. Les cellules polycristallines

Sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, il offre un bon rendement (de 12 à 14%) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets. [2]



Figure I.4—Cellule polycristalline [2].

I.3.2. Les cellules monocristallines

Sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très pures. Elles offrent le meilleur rendement (entre 13 et 17%) est légèrement supérieur au silicium polycristallin, ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). [1]



Figure I.5—Cellule monocristalline. [1]

I.3.3. Les cellules amorphe

Sont produites à partir d'un gaz de silicium qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. La cellule est grise très foncée c'est la cellule des calculatrices et des montres dit solaire, car ce type de cellule est bon marché et la technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment des supports souples. Le problème c'est que son rendement est 2 à 3 fois plus faible que les cellules monocristallines. [2]

Pour ces trois matériaux photovoltaïques, les coûts par unité de puissance sont identiques mais les surfaces de capteur nécessaires pour atteindre cette unité de surface varient en fonction du rendement. Les matériaux en silicium cristallin (poly et mono) représentent à 90% du marché mondial. [1]



Figure I.6 – Cellule amorphe. [2]

I.4. Composition d'un panneau solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques, celles-ci sont principalement composées de silicium. Dès qu'une cellule reçoit de la lumière, elle se met à fonctionner, la structure de base d'une cellule PV est une jonction PN constituée de la manière suivante ou l'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre :

- Un cristal semi-conducteur (silicium) dopé P.
- Zone mince (silicium) dopée N (quelques millièmes de mm).
- Entre les deux zones se développe une jonction.
- La zone N est couverte par une grille métallique (contact de front) qui sert de cathode.
- Une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle de l'anode.
- Une couche de protection transparente (verre fumé) qui laisse passer la lumière dans un sens unique (anti-réflexion).
- Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.

- Le dessus et le dessous de la cellule doivent alors être recouverts de contact métallique pour collecter l'électricité générée. [2]

I.5. La structure métal isolant semi conducteur MIS

I.5.1. Représentation

Par définition un condensateur est constitué de deux électrodes conductrices séparées par un matériau isolant. Ainsi, on appelle "structure MIS", la superposition de trois couches de matériaux : métal appelé grille, semi-conducteur appelé substrat séparés par un isolant (le vide en générale). En appliquant une tension entre le métal et la face arrière du semi-conducteur, des transferts de charges sont effectués. Ces transferts se font par le circuit externe de polarisation [1].

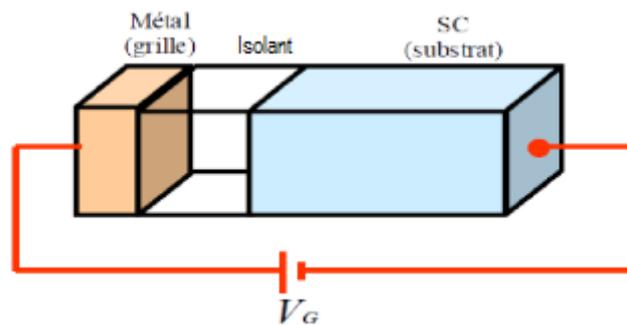


Figure I.7 – Forme simplifiée d'un condensateur MIS. [2].

I.5.1.1. Transfert des charges

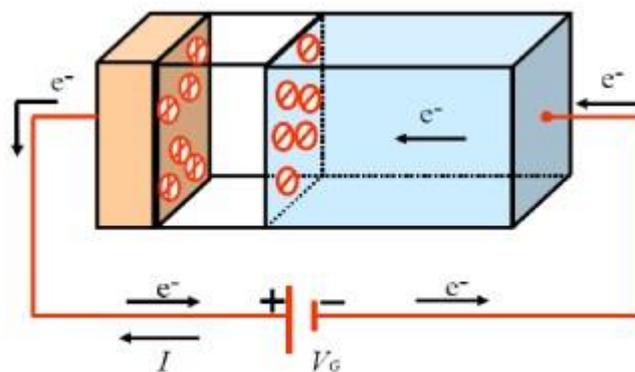


Figure I.8 – Transfert des charges dans la structure MIS [2].

I.5.1.2. Hypothèse

Nous utiliserons les hypothèses simplifications suivants [2,3]:

- Le dopage de semi conducteur est constant.
- L'isolant est parfait donc aucun courant se traverse lui.

I.5.1.3. Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS

Soit un métal de travail des électrons ϕ_m et un semi conducteur de travail des électrons ϕ_s séparés par un isolant d'épaisseur d_i relativement faible constitué par le vide. Si le métal et le semi conducteur sont reliés électriquement, ils constituent un seul système thermodynamique, leur niveau de Fermi s'alignent et une différence de potentiel créée par la différence de travaux des électrons donnée par:

$$qV_b = qQ_m - qQ_s$$

Suivant les valeurs de ϕ_m et de $\phi_s = V_b$ peut être positif ou négatif. Le potentiel de barrière se décompose en:

- V_i : la différence de potentiel de part et d'autre de l'isolant.
- V_s : Le potentiel à l'interface isolant semi conducteur.

La structure se comporte comme un condensateur plan dont la tension entre les armatures est constante V_b la charge dépend de la capacité donc de la distance entre les armatures. Si cette distance se diminue la capacité, donc la charge augmente. La charge dans le métal Q_m est égale et de signe opposé à celle dans le semi conducteur Q_s . Compte tenu de très grandes différences de densités d'états disponibles entre le métal et le semi conducteur, cette charge sera confinée sur une fraction de couche atomique dans le métal. La charge dans le semi conducteur s'étend sur quelques dizaines d'Angströms dans le cas d'une accumulation des porteurs majoritaires et sur quelques milliers d'Angströms dans le cas d'une déplétion des porteurs majoritaires [3,4,5].

I.5.2. La structure MIS idéale

Pour comprendre les différents états d'une structure MIS en fonction de polarisation, nous allons envisager un composant "idéale" et ensuite étudier l'influence des différents défauts sur le comportement [6, 7, 8].

I.5.2.1. Caractéristiques d'une structure idéale

- Le dopage d'un semiconducteur est tel que les travaux de sortie de métal et du semiconducteur sont identiques $\phi_m = \phi_{sc}$ c'est à dire la structure MIS se trouve dans le régime de bandes plates.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \chi + \frac{E_g}{2} - \phi_{Fi} = 0 \text{ Pour type n} \quad (I.1)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \chi + \frac{E_g}{2} + \phi_{Fi} = 0 \text{ Pour type p} \quad (I.2)$$

- Le dopage de semi conducteur est uniforme.
- Il y a pas un état d'interface entre l'isolant métal et semiconducteur.
- Il y a pas une charges dans l'isolant.

I.5.2.2. Principe et régimes de fonctionnement

Quand une différence de potentiel est appliquée entre la grille et le substrat d'une structure MIS idéale il apparaît quatre régimes de fonctionnement :

- L'accumulation.
- Régime des bandes plates.
- La déplétion.
- L'inversion.

I.5.2.2.1 La structure MIS en régime d'accumulation

: Par effet d'influence, les porteurs majoritaires sont attirés vers l'interface isolant semiconducteur, ils agissent d'une

accumulation des porteurs majoritaires qui sont les trous pour les semiconducteurs de type "p" se forme à l'interface isolant-semiconducteur.

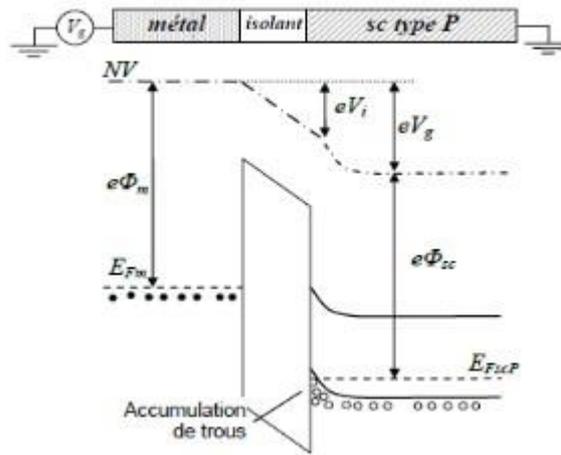


Figure 1.9—diagramme de bandes d'énergie en régime d'accumulation [5].

Lorsque on applique une tension V_g (0 sur l'électrode métallique) ils s'apparait une charge négative Q_m (0 et les charges forment à l'interface isolant-semiconducteur sont positive $Q_s = -Q_m$). Les porteurs majoritaires se forment à l'interface isolant-semiconducteur une courbe des bandes d'énergie vers le haut pour une MIS de type "p", sachant qu'il n'y a aucun courant qui circule dans la structure MIS idéal quelque soit la tension de polarisation, ainsi, le niveau de Fermi dans le semiconducteur reste constant. La conductivité au voisinage de l'interface isolant-semiconducteur est augmentée (il y a pas des porteurs libres). La charge d'accumulation peut être considérée comme uniquement surfacique. On peut considérer que le potentiel de surface V_s est très légèrement négatif, la charge d'accumulation est donnée par :

$$Q_s = -Q_m \tag{I.3}$$

La charge et la tension sont reliées par la relation suivante :

$$V_g = V_i = \frac{Q_m}{C_i} \tag{I.4}$$

avec : $C_i = \frac{\epsilon_i}{d_i}$ C_i : La capacité par unité de surface de l'isolant. ϵ_i : permittivité de l'isolant. d_i : épaisseur de l'isolant.

I.5.2.2.2 La structure MIS en régime de déplétion : Pour une tension légèrement positive: $V_g > 0$ sur l'électrode métallique, il apparaît une charge positive $Q_m > 0$. Par effet d'influence les porteurs majoritaires sont repoussés de l'interface isolant/semi-conducteur, il se crée une charge d'espace négative due à la ZCE d'épaisseur W dans le semi-conducteur, telle que:

$$Q_m = -Q_s = qNW \tag{I.5}$$

Avec: N la concentration des dopants dans le semi-conducteur $N = N_a$ pour une MIS de type p. W : l'épaisseur de la ZCE. Il se forme une déplétion des porteurs majoritaires à l'interface isolant/semi-conducteur, et une courbe de bande d'énergie à l'interface isolant/semi-conducteur se fait vers le bas pour une MIS de type p, c'est le régime de déplétion.

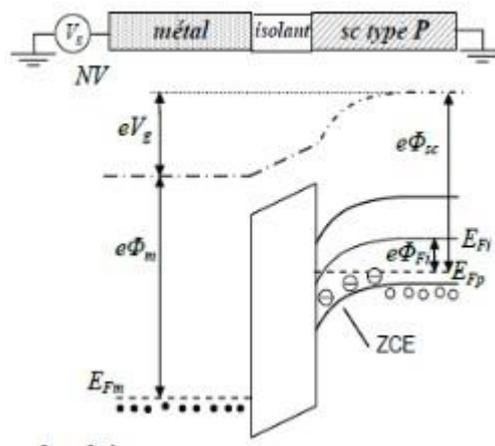


Figure I.10—diagramme de bandes d'énergie en régime de déplétion [5].

La valeur du potentiel de surface donnée par l'expression suivante:

$$V_s = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_s} \tag{I.6}$$

et le potentiel dans le semi-conducteur évolue de la façon suivante:

$$V(x) = V_s \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2 \tag{I.7}$$

Toute variation de la charge sur l'électrode métallique sera compensée par une variation de l'épaisseur de la zone de déplétion devient donc maximale lorsque la ZCE est

maximum. La valeur maximale de la ZCE vaut alors :

$$W_{\max} = \frac{\sqrt{2\epsilon_{sc}}}{qN} |Q_{Fi}| \tag{I.8}$$

Avec ϵ_{sc} la permittivité diélectrique du semiconducteur.

Q_{Fi} est le potentiel de volume représenté la distance d'un niveau de Fermi intrinsèque dans le semiconducteur.

$$Q_{Fi} = \frac{E_F - E_{Fi}}{q} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N}{n_i} \tag{I.9}$$

Nous définissons alors la quantité de charges maximales dans la ZCE aux dopants du semiconducteur par :

$$Q_W = -qNW_{\max}$$

I.5.2.2.3 La structure MIS en régime d'inversion : En augmentant la polarisation, les porteurs majoritaires sont de plus en plus repoussés de l'interface isolant semiconducteur l'épaisseur de la ZCE est alors maximum $W = W_{\max}$.

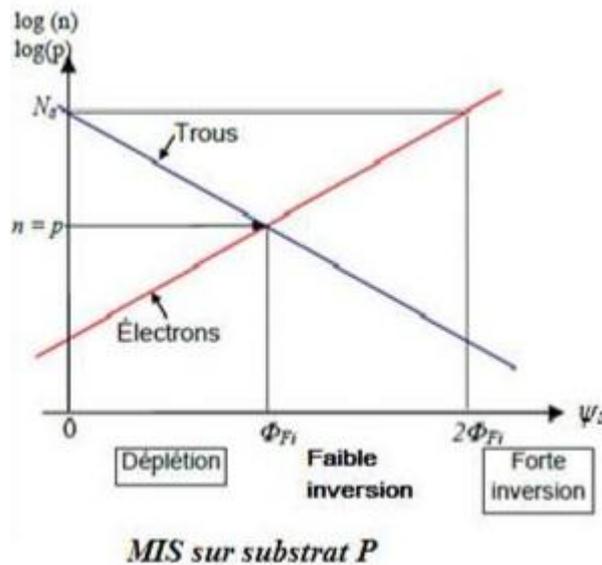


Figure I.11—La densité des électrons et des trous à l'interface en fonction du potentiel de surface ψ_s [5].

À la charge de déplétion s'ajoute une charge d'électrons elle aussi négative, pour les valeurs de ψ_s supérieures à une tension de l'ordre du volt. Cette charge d'électrons

appelée couche d'inversion, se forme lorsque la bande de conduction proche de l'interface d'un matériau de Fermi pour être occupés, la concentration locale des électrons peut alors devenir supérieure à la concentration de trous dans le substrat, d'où le qualificatif d'inversion, comme si le type de matériau (p), mais bien évidemment les dopants sont restés des accepteurs.

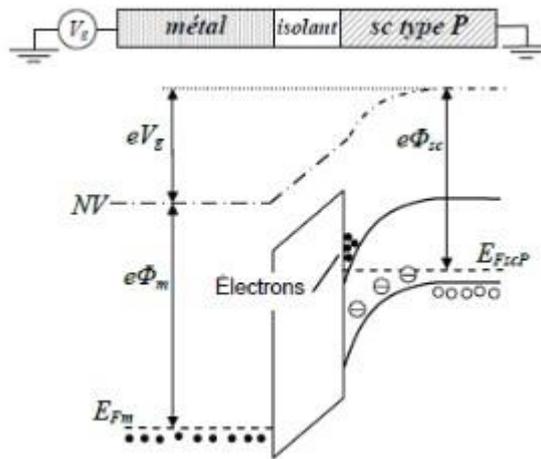


Figure I.12—structure MIS en régime d'inversion [5].

La courbure des bandes d'énergies accentuée et pour certaines tensions, le niveau de Fermi intrinsèque E_{Fi} passe sous le niveau de Fermi du semiconducteur dopé E_{Fsc} . Le potentiel de surface ψ_s atteint un seuil par lequel la densité des porteurs majoritaires à l'interface est égale à la densité des porteurs majoritaires dans le semiconducteur. Le seuil correspondant à la transition entre le régime de déplétion et le régime de faible inversion est défini par :

$$\psi_s = Q_{Fi} \tag{I.10}$$

En régime de faible inversion, la charge à l'interface est conditionnée par les charges de déplétion car les porteurs minoritaires dont la densité des dopants, le seuil de ψ_s , pour lequel la densité des porteurs minoritaires est équivalente à la densité des dopants est défini par :

$$\psi_s = 2 Q_{Fi} \tag{I.11}$$

La tension de grille correspondante à cette condition est la tension de seuil

$$V_{Th}: V_{Th} = 2Q_{Fi} + \frac{2q\epsilon_{sc}N|Q_{Fi}|}{C_i} \quad (I.12)$$

La charge totale dans la substrate est la somme des charges issues des dopants du semiconducteur dans la ZCE et des porteurs minoritaires accumulés à l'interface isolant-semiconducteur Q_{inv} . En régime d'inversion, la charge dans le semiconducteur s'écrit:

$$Q_{sc} = Q_{inv} + Q_w \quad (I.13)$$

I.5.2.3. La zone des charges d'espace

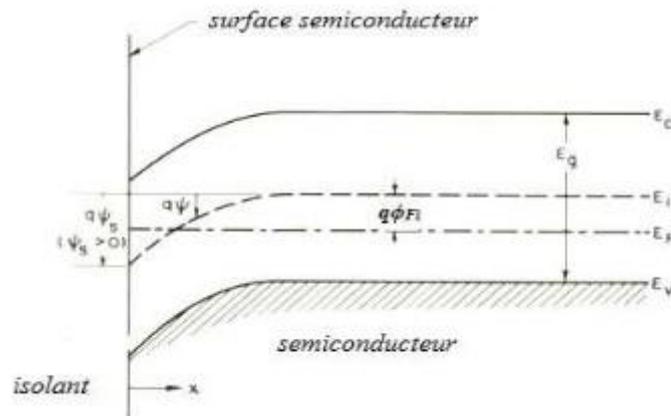


Figure I.13 – Diagramme d'énergie à la surface d'un semiconducteur de type p. [5].

La figure montre un diagramme détaillé à la surface d'un semiconducteur de type p, le potentiel ψ est défini comme étant égal à zéro dans le substrat du semiconducteur (région neutre). Il est mesuré par rapport à E_F niveau de Fermi intrinsèque et il est considéré positif si les bandes s'incurvent vers le bas. À la surface $\psi = \psi_s$ est le potentiel de surface. Dans la région neutre du semiconducteur les densités d'électrons et de trous sont données par:

$$n = N_c e^{\frac{-E_c - E_F}{kT}} \quad p = N_v e^{\frac{-E_F - E_v}{kT}} \quad (I.14)$$

Comme il s'agit d'un semiconducteur de type p et en fin de garder un exposant significatif nous posons $qQ_{Fi} = |E_F - E_{Fi}|$ Et l'équation devient:

$$n_0 = n_i e^{\frac{-qQ_{Fi}}{KT}} \quad p_0 = n_i e^{\frac{qQ_{Fi}}{KT}} \quad (\text{I.15})$$

Les densités en un point quelconque d'un semiconducteur sont données par :

$$n(x) = n_0 e^{\frac{q\psi(x)}{KT}} = n_i e^{\frac{q(\psi(x) - Q_{Fi})}{KT}} \quad p(x) = p_0 e^{\frac{-q\psi(x)}{KT}} = n_i e^{\frac{-q(\psi(x) - Q_{Fi})}{KT}} \quad (\text{I.16})$$

En particulier les densités de porteurs à l'interface isolant-semiconducteur comme origine des abscisses s'écrivent :

$$n_s = n_i e^{\frac{q(\psi_s - Q_{Fi})}{KT}} \quad p_s = n_i e^{\frac{-q(\psi_s - Q_{Fi})}{KT}} \quad (\text{I.17})$$

Les expressions montrent que le potentiel d'interface conditionne le régime de fonctionnement de la structure MIS [5] :

- $\psi_s = 0$, $n_s = n_0$ et $p_s = p_0$: Bandes plates
- $0 < \psi_s < Q_{Fi}$ ($n_s < n_0$ et $p_s > p_0$) : Régime de déplétion
- $Q_{Fi} < \psi_s < 2Q_{Fi}$ ($n_s > n_0$ et $p_s < p_0$) : Régime de faible inversion
- $\psi_s > 2Q_{Fi}$: Régime de forte inversion.

I.5.3. La structure MIS réelle

Dans le cas d'une structure MIS réelle, les états d'interface existent et leurs niveaux énergétiques sont situés dans la bande interdite du semiconducteur. Ces états donnent lieu à une charge d'interface qui contribue à la bande. Contrairement à une structure MIS idéale, une structure MIS réelle possède un isolant qui contient des charges électriques exerçant une influence électrostatique sur les porteurs du semiconducteur, ce qui fait, même en l'absence d'une polarisation, une structure MIS réelle, en raison de ces charges à une forme de bande non plate, il faut appliquer une tension négative pour un semiconducteur de type p. Dans le cas d'une interface réelle, la présence de défauts modifie la structure électronique par rapport à celle d'une surface idéale ou bien en éliminant des états électroniques.

I.5.3.1. Différence des travaux desortie

Pour une structure MIS, le travail desortie du métal et du semiconducteur ne sont pas égaux, lorsqu'on relie le métal et le semiconducteur par un fil électrique, il y aura un échange d'électrons jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi. A ce moment les bandes d'énergies incurvent et il n'y a pas de régime de bandes plates [?]. On définit la tension de bandes plates V_{FB} comme étant la tension de grille V_g appliquée à la structure pour que les bandes d'énergies soient plates, lorsque les bandes d'énergies sont plates cela signifie qu'il n'y a pas de chute de potentiel entre l'interface et le volume du semiconducteur donc que le potentiel de surface ψ_s est nul.

$$V_{FB} = \varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s \quad (I.18)$$

Avec le travail desortie pour chaque semiconducteur donné par :

$$\varphi_{sc} = \chi + \frac{E_g}{2} + \varphi_{Fi} \quad (I.19)$$

Le potentiel de volume φ_{Fi} est défini par :

$$\varphi_{Fi} = \frac{E_F - E_{Fi}}{q} \quad (I.20)$$

I.5.3.2. La barrière de potentiel

Le travail desortie d'un semiconducteur φ_{sc} est la différence d'énergie qui existe entre le niveau de Fermi et le niveau vide, le travail desortie φ_m reste constant. On va donc dire que le travail desortie du semiconducteur varie en fonction du dopage, alors que pour un métal donné, le travail desortie φ_m reste constant. On va donc dire que la barrière de potentiel $\varphi_{ms} = \varphi_m - \varphi_s$ varie en fonction du dopage du semiconducteur. L'un des métaux le plus utilisé dans la fabrication des MIS est l'aluminium qui possède un travail desortie d'environ $\varphi_m = 4.1 \text{ eV}$.

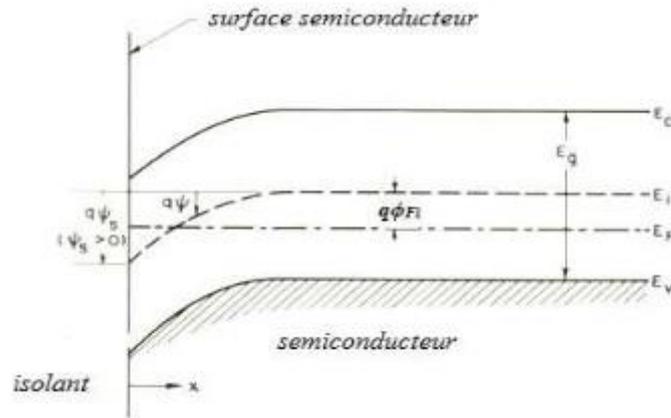


Figure I.14—barrière de potentiel en fonction du dopage pour différents types de métaux de grille. [5].

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base sur le capteur solaire photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs différents types avec quelques figures et schémas. Finalement, nous avons décrit la composition essentielle d'une cellule photovoltaïque.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DES CELLULES SOLAIRES MIS

II.1. Introduction

Cette partie s'intéresse à étudier un modèle développé d'une cellule solaire de structure MIS. La physique de cette structure a été discutée dans de nombreux travaux [9, 10, 5, 11, 12], plusieurs modèles de la structure MIS ont été proposées. Dans ce travail, on présente un modèle de calcul analytique basé sur des équations mathématiques des différents mécanismes de conduction qui peuvent exister dans ces composants. Ce modèle fait introduire les effets de la variation de la température sur la caractéristique $I-V$ de la structure MIS et sur le potentiel de surface.

II.2. Diagramme des bandes d'énergie

La figure (II.1) montre le diagramme de bandes d'énergie d'une structure MIS de type p⁺-n⁺-p. Dans ce diagramme, on suppose l'application d'une tension positive au semiconducteur, les niveaux de Fermi des électrons et des trous sont séparés par une différence d'énergie est $q\phi_s$.

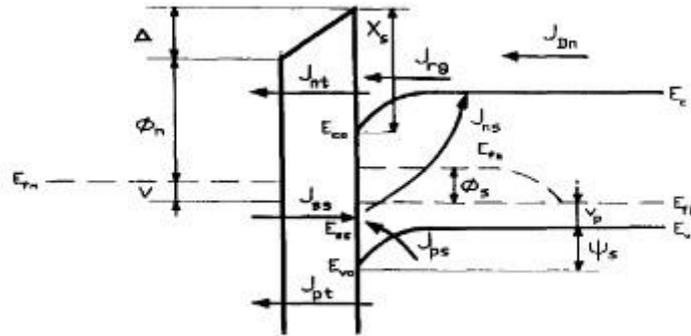


Figure II.1—Lediagrammedes bandes d'énergie

Lachuedetensionàtraversl'isolantestdeΔpeut's'écrire:

$$\Delta = E_g + \chi_s + \phi_m - v_p - \psi_s - V \tag{II.1}$$

Avec:

- E_g : Largeur de la bande interdite.
- χ_s : L'affinité électronique de semiconducteur.
- ϕ_m : travail de sortie emétal.
- ψ_s : Le potentiel desurface.
- V : La polarisation appliquée.

EnappliquantlaloideGausslachutedetensionàtraversl'isolantpeut's'écrirecomme:

$$\Delta = -\frac{dj}{\epsilon i} (Q_{sc} + Q_{ss} + Q_F) \tag{II.2}$$

Avec:

- Q_F : Lachargefixedansl'isolantelleestdonnéeepar $Q_F = qN_F$.
- N_F : La densité des charges fixe dansl'isolant.

En considérant une distribution homogène des états d'interface a travers labandeinterdite:

$$Q_{SS} = qD_{it}(E_{fn} - E_{ss}) = -q^2 D_{it}(\psi_s + v_p + \phi_s - \phi_0) \tag{II.3}$$

Avec:

- D_{it} : La densité des états d'interface.
- φ_s : L'écart entre les quasi niveaux de Fermi.
- φ_0 : Le niveau de Fermi neutre des états de surface.
- v_p : L'écart entre le niveau de Fermi des porteurs majoritaires et le niveau de la bande de valence.

La charge dans les semiconducteurs s'écrit comme:

$$Q_{sc} = \pm \frac{q}{2KT\epsilon_s N_A} \left[\beta\psi_s + e^{-\beta\psi_s} - 1 + \frac{n_i^2}{N_A^2} e^{\beta\psi_s} - 1 - \beta\psi_s \right]^{1/2} \quad (\text{II.4})$$

Dans nos calculs, on tient en compte l'état de déséquilibre du système c'est à dire que $e^{\beta\varphi_s} \neq 0$, cette hypothèse est réelle en raison de la chute de tension à travers le dispositif. Contrairement, certains auteurs [13, 14, 15] ne prennent pas en considération l'état de déséquilibre du système, ils obtiennent une expression de Q_{sc} semblable à l'équation (II.4) mais sans le terme $e^{\beta\varphi_s}$. Donc la relation précédente est la plus générale, les autres qui se trouvent dans la littérature ne sont que des cas particuliers.

II.3. Les différentes composantes du courant totale

La condition de déséquilibre se reproduit en raison de l'existence de différents composants actuels dans le dispositif MIS [9]. Ceci est illustré par la séparation des niveaux d'énergie de Fermi d'électrons et des trous dans le semiconducteur. La différence d'énergie $q\varphi_s$ ($q\varphi_s = E_{fn} - E_{fp}$) peut être déterminée par l'équilibre des différentes composantes des porteurs minoritaires dans la bande de conduction figure (II.1), ce qui donne la relation suivante.

$$J_{Ln} + J_{dr} - J_{rg} - J_{Dn} = J_{ns} - J_{pt} \quad (\text{II.5})$$

II.3.1. Courant de diffusion

Le courant de diffusion dans la zone de charge d'espace est donné par référence :

$$J_{Dn} = \frac{qD_n}{L_n} np_0 \frac{F_2(H^*)}{F_1(H^*)} e^{\beta\phi_s} - 1 \quad (\text{II.6})$$

- H : L'épaisseur.
- w : La largeur de la région de déplétion.

donnée par :

$$w = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s\psi_s}}{qN_A} \quad (\text{II.7})$$

$$F_1(H^*) = \frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \frac{H^*}{L_n} + \cosh \frac{H^*}{L_n} \quad (\text{II.8})$$

$$F_2(H^*) = \frac{S_n L_n}{D_n} \cosh \frac{H^*}{L_n} + \sinh \frac{H^*}{L_n} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2. Courant de génération recombinaison

Le courant de génération recombinaison dans la région de déplétion est donné par référence :

$$J_{rg} = \frac{qn_i \omega}{\tau_n} e^{\frac{(\beta\phi)^1}{2}} - 1 \quad (\text{II.10})$$

II.3.3. Courant tunnel bande à bande

Le courant à effet tunnel des électrons ou de trous c'est le courant de passage de porteurs à travers la couche isolante de la barrière de potentiel.

- Le courant tunnel de trous à travers l'isolant donné par l'expression :

$$J_{pt} = A^* T_n^2 \theta(\chi_p, d) \exp[-\beta(\psi_s + v_p)] (1 - e^{-\beta v}) \quad (\text{II.11})$$

- Le courant tunnel des électrons à travers l'isolant donné par l'expression :

$$J_{pt} = A^* T_n^2 \theta(\chi_n, di) \exp[-(E_g/Kt)] \exp[\beta(\psi_s + v_p)] e^{\beta v} - e\beta\phi \quad (II.12)$$

ou

- A_p^* et A_n^* : sont les constantes de Richardson des trous et des électrons respectivement.
- χ_p et χ_n : sont les barrière de potentiel effective de l'isolant pour le tunnel des trous et des électrons vers le métal.
- di est l'épaisseur de la couche d'isolant.

II.3.4. Courant des états de surface

C'est le courant dû à la présence des états d'interface ou les porteurs de charges (trous ou électrons) passe par l'intermédiaire de ces états pour atteindre l'autre côté de la surface.

- Le courant des états de surface des électrons est donné par l'expression :

$$J_{ns} = q D_{it} \vartheta_{th} \delta_n n^2 \frac{I_s}{\tau_s + \tau_t} \cdot \tau_{th} \vartheta_{th} v_p e^{\beta \varphi_s - 1} + \frac{e^{[\beta(\varphi_s - v)] - 1}}{\rho_1 + \rho_s e^{-\beta \varphi}} \quad (II.13)$$

- Le courant des états de surface des trous est donné par l'expression :

$$J_{ps} = q D_{it} \vartheta_{th} \vartheta_n n^2 \frac{\tau_s}{\tau_s + \tau_t} \cdot \tau_{th} \vartheta_{th} e^{\beta \varphi_s - 1} + \frac{\rho_s \delta_p}{n_1 \delta_n} \frac{1 - e^{-\beta v}}{\rho_1 + \rho_s e^{-\beta v}} \quad (II.14)$$

Ainsi, le courant total du aux états de surface est :

$$J_{ss} = J_{ns} - J_{ps} \quad (II.15)$$

Ce qui conduit :

$$J_{ss} = \frac{q D_{it} \vartheta_{th} \delta_n n^2}{(\rho_1 + \rho_s e^{-\beta v})} \cdot \frac{I_s}{\tau_t + \tau_s} \cdot \{ \exp[\beta(\varphi_s - v)] - 1 \} - \frac{\rho_s \delta_p}{n_1 \delta_n} \{ 1 - e^{\beta v} \} \quad (II.16)$$

avec:

- D_{it} : La densité des états d'interface.
- δ_p et δ_n : Sont les sections de capteurs des électrons et des trous respectivement.
- \mathcal{V}_{th} : C'est la vitesse thermique des électrons, donnée par:

$$\mathcal{V}_{th} = \frac{3KT^{1/2}}{me} \quad (\text{II.17})$$

avec:

- K : Le constant de Boltzmann.
- T et \mathcal{V} : La température ambiante.
- me : La masse effective de la densité d'état des électrons.
- τ_s : constant du temps pour le tunnel ou états de surface, exprimé par

$$\tau_s = \frac{1}{\mathcal{V}_{th} [(n_s + n_1) \delta_n + (p_s + p_1) \delta_p]} \quad (\text{II.18})$$

avec:

- n_s et p_s : Sont respectivement les concentrations d'électrons et de trous à l'interface isolant semiconducteur.

Elles sont données par:

$$n_s = N_c e^{(E_{fn} - E_{c0})/KT} = N_c e^{\beta(\psi_s + \phi_s)} \quad (\text{II.19})$$

$$n_s = N_v e^{(E_{fn} - E_{v0})/KT} = N_a e^{-\beta\psi_s} \quad (\text{II.20})$$

avec:

- N_c : La densité effective d'états dans la bande de conduction.
- N_v : La densité effective d'états dans la bande de valence.
- N_a : La concentration des atomes accepteurs dans le semiconducteur.
- n_i : La concentration intrinsèque d'électrons dans le semiconducteur.

- $\beta = \frac{q}{kT}$: L'inverse de la tension thermique.
- n_1 et p_1 : Sont respectivement les concentrations d'électrons et des trous pour $E_F = E_{ss}$, sont donnée par :

$$n_1 = N_c e^{(E_{ss} - E_{c0})/KT} = N_c e^{-(E_g - q\phi_0)/KT} \tag{II.21}$$

$$p_1 = N_v e^{(E_{ss} - E_{v0})/KT} = N_v e^{-\beta\phi_0} \tag{II.22}$$

τ_t : C'est le constant du temps pour le tunnel ou métal, elles sont donnée par :

$$\tau_t = \tau_0 e^{d\sqrt{\chi}} \tag{II.23}$$

où :

- τ_0 : C'est une constante.
- χ : L'hauteur de la barrière tunnel.

II.3.5. Courants de photo-génération

Lorsque la structure MIS est illuminée (figure II.2), ils'ajoute en plus des courants déjà établis.

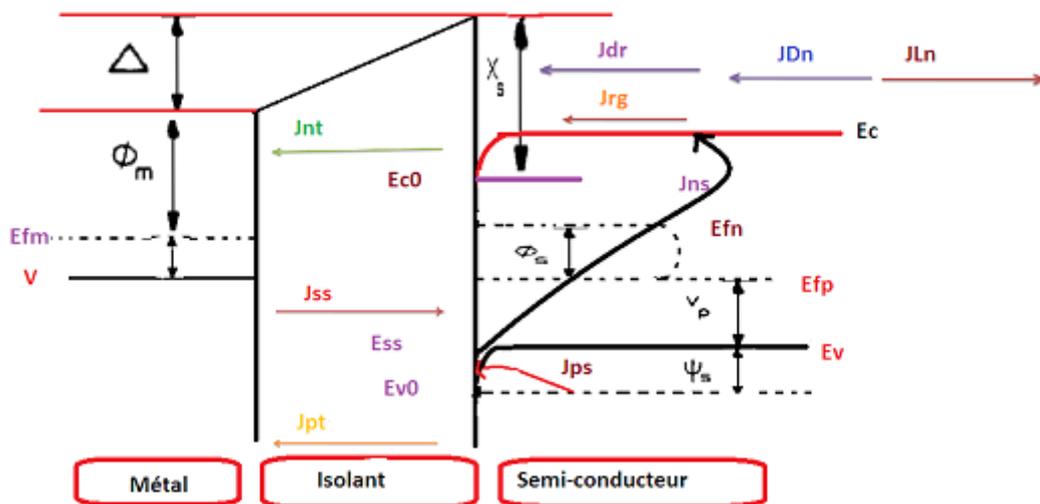


Figure II.2 – Le diagramme des bandes d'énergie d'une structure MIS sous éclairage

Les photocourants J_{Ln} et J_{dr} . Dans le volume du semi-conducteur il se produit J_{Ln} donné par:

$$J_{Ln} = \frac{q\phi\alpha L_n}{\alpha^2 L^2 n^{-1}} \cdot e^{-\alpha W} \left[\alpha L_n - \frac{F_2(H^*) - e^{-\alpha H^*} \frac{\delta_n L_p}{D_n} - \alpha L_n}{F_1(H^*)} \right] \quad (II.24)$$

$\Phi(\lambda)$ est le nombre de photons absorbés par unité de surface et par unité de largeur de photons donné par:

$$\Phi(\lambda) = F_0(\lambda) [1 - R(\lambda)] \quad (II.25)$$

- $F_0(\lambda)$: C'est le nombre de photons incidents.
- $[R(\lambda)]$: Le nombre de photons réfléchis.

Pour le cas d'un champ électrique très élevé dans la région de déplétion, les porteurs photo-générés sont accélérés hors la zone de déplétion avant qu'ils ne se recombinent, ce courant J_{dr} est pris en considération par l'expression suivante:

$$J_{dr} = q\phi(1 - e^{\alpha W}) \quad (II.26)$$

II.3.6. Le courant total

La condition de déséquilibre pour ces composantes obtenues suite aux différents termes qui composent le courant total. La différence en énergie $q\phi_s$ est déterminée en faisant l'équilibre des porteurs minoritaires dans la bande de conduction de l'équation (II.5). De même, le courant total qui traverse la structure MIS ne peut être recalculé sans calculer le potentiel de surface $q\psi_s$, ce qui conduit à déterminer ces deux paramètres en utilisant le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} J_{Ln} + J_{dr} - J_{rg} - J_{Dn} = J_{ns} - J_{pt} \\ E_g + \chi_s + \phi_m - v_p - \psi_s - V = \\ -q^2 D_{it} (\psi_s + v_p + \phi_s - \phi_0) + qN_F + \text{sign}(V) \sqrt{2KT\epsilon_s N_A} \times \\ \beta\psi_s + e^{-\beta\psi_s} - 1 + \frac{2-J}{N_A} e^{\beta\phi_s} e^{\beta\psi_s} - 1 - \beta\psi_s \end{cases} \quad (II.27)$$

Le courant total est écrit comme :

$$J_t = J_{ss} - J_{nt} - J_{pt} \quad (\text{II.28})$$

à partir de l'équation précédente :

$$J = J_{light} - J_{dark} \quad (\text{II.29})$$

avec :

•

$$J_{light} = J_{Ln} + J_{dr} \quad (\text{II.30})$$

•

$$J_{dark} = J_{ps} + J_{pt} + J_{Dn} + J_{rg} \quad (\text{II.31})$$

L'équation ressemble avec celle du courant total de jonction PN des cellules solaires [15, 16, 17, 18, 19].

II.4. Grenadeurs essentielles caractérisant une cellule solaire

La connaissance des caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque est très importante car elle fournit de nombreuses informations permettant de connaître la nature des différents pertes de courant et ainsi de calculer le rendement. En effet, une cellule solaire photovoltaïque MIS peut être schématisée de la façon suivante [20, 21] :

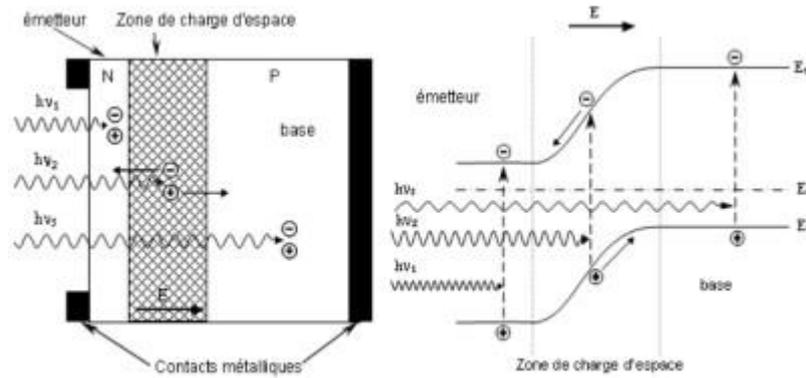


Figure II.3—Structure d'une cellule solaire photovoltaïque avec son diagramme de bande

II.4.1. Courant de court circuit I_{cc}

Le courant de court circuit I_{cc} d'une cellule solaire photovoltaïque obtenue pour une tension V est caractérisé par la quantité de sélectrons et trous libres créés G et qui traversent la jonction sans être recombinaisonnés avec les centres. Cette distance est appelée longueur de diffusion des sélectrons et trous L_n et L_p respectivement tels que :

$$I_{cc} = qG (L_n + L_p) \quad (\text{II.32})$$

II.4.2. Tension en circuit ouvert V_{oc}

Sous la condition d'obscurité $I=0$, la cellule solaire fournit un courant négatif I_{cc} au courant du circuit pour une tension, appelée tension en circuit ouvert V_{oc} , ainsi on peut écrire :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} \right) + 1 \quad (\text{II.33})$$

avec :

- I_0 : Le courant de saturation de la diode qui détermine le nombre de porteurs collectés à l'obscurité par effet de température.
- La température en degré de Kelvin.
- Le constant de Boltzmann.

II.4.3. Le facteur forme FF

Le facteur de forme en anglais "fill factor" met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule solaire photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement, il est défini par le rapport de la puissance maximale P_M et de la valeur de produit $I_{cc} \cdot V_{oc}$:

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad (\text{II.34})$$

Ce paramètre est compris entre 0 et 1, on l'exprime en pourcentage et qualifie la forme de la courbe plus ou moins rectangulaire de la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire, si celle-ci est de forme carrée le facteur de forme serait égal à 1, la puissance P_M sera égale à $I_{cc} \cdot V_{oc}$ mais généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 à 0.85.

II.4.4. Rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident P_0 [22]

$$\eta_M = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_0} = \frac{I_M V_M}{P_0} \quad (\text{II.35})$$

II.5. Caractéristique électrique d'une cellule solaire

La variation du courant I en fonction de la tension V a l'obscureté et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer les performances de la cellule solaire, la figure (II.4) montre deux exemples de caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire sans et avec éclairement.

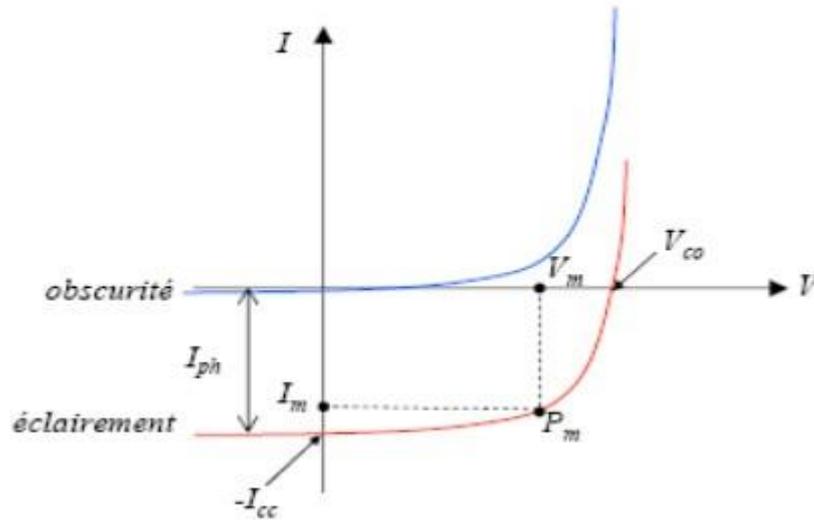


Figure II.4—Caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle analytique de la structure MIS et les équations décrivant ce modèle tels que le diagramme des bandes et les différentes expressions du courant (tunnel, bande à bande de trous, des électrons et le courant tunnel à travers les états de surface pour les trous et les électrons).

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction

Après avoir montré dans le dernier chapitre, les mécanismes de transport de charge qui peuvent simuler nos courbes (I-V) expérimentales. Dans ce chapitre, on étudie les effets des paramètres des mécanismes de conduction dans les cellules solaires MIS. La méthode de Levenberg est utilisée pour optimiser le système d'équation (II.27) pour calculer les deux paramètres essentiels ψ_s et ϕ_s dont il sert de base à tout le calcul du courant total.

III.2. Simulation

III.2.1. Le rôle de la simulation

La simulation fournit un lien entre le monde expérimental et le monde théorique. Comme le montre la figure, elle complète la théorie et l'expérimental et construit la réalité physique de la présence de certains phénomènes ou bien de la présence d'une analyse mathématique impossible.



Figure III.1 – Le rôle de simulation[10].

III.2.2. Présentation de logiciel de programmation Mathcad

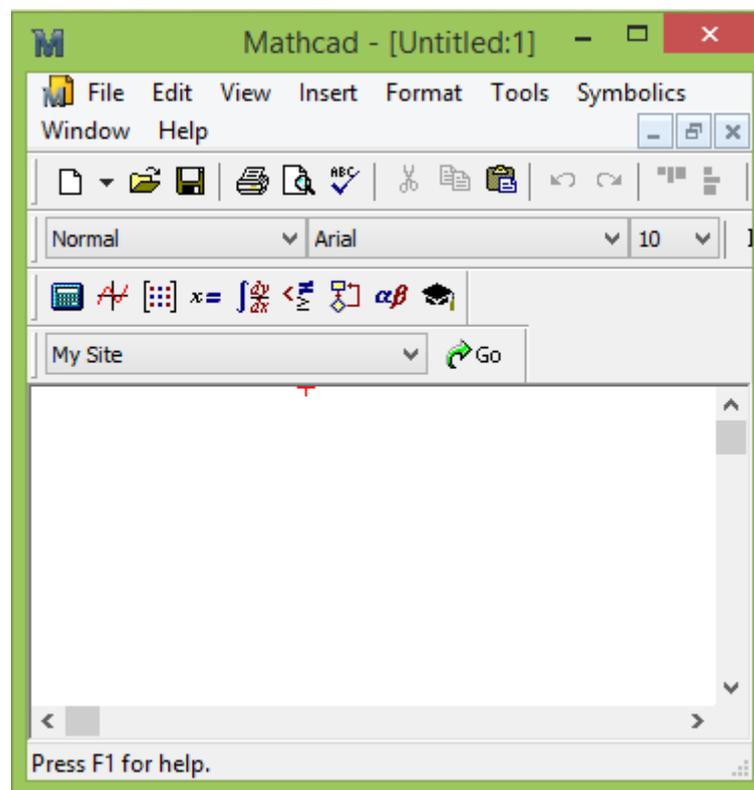


Figure III.2 – Fenêtre d'édition du logiciel Mathcad[10].

Le logiciel de simulation est basé sur le langage Mathcad (l'input est fourni par les données du matériau utilisé et les expressions établies dans les chapitres précédents). Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. D'une manière générale ce programme vise l'optimisation de la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou des systèmes linéaires, etc... Le logiciel Mathcad est un logiciel de simulation des dispositifs électroniques, il est constitué d'une gamme d'outils de simulation, il offre une interface conviviale de type tableaux

blanc, effectuée instantanément le recalcul et se repose sur une architecture ouverte qui prend en charge, NET et le format XML natif.

Ce logiciel permet d'accéder à la notation mathématique classique, et de traiter de manière complète des outils graphiques.

III.2.3. Étude des effets des différents paramètres du courant de conduction dans les cellules solaires MIS

L'organigramme de l'algorithme de calcul du courant total de la structure MIS est montré dans la figure III.3 suivante :

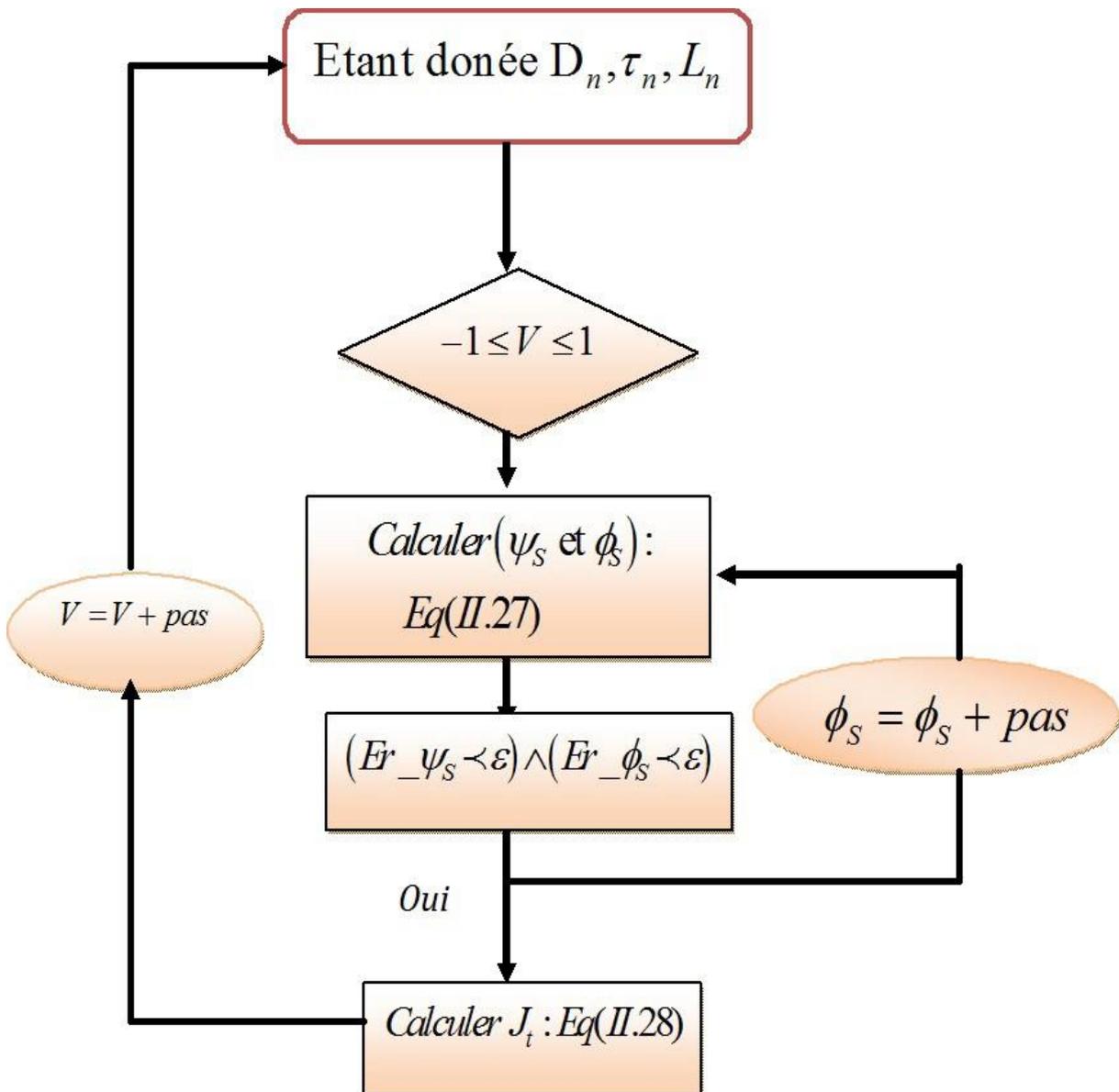


Figure III.3—Organigramme de l'algorithme de calcul de la densité de courant.

- Premièrement, On introduit les différentes grandeurs pour le calcul, tel que τ_n, D_n, L_n .
- Deuxièmement, en faisant varier la tension appliquée V_g sur $[-1, 1]$ avec un pas bien choisi et pour chaque valeur de V_g avec un potentiel de surface $\psi_s = 0$.
- Ensuite, un calcul de potentiel de surface ψ_s et ϕ_s qui vérifie l'équation (II.27).
si l'équation n'est pas vérifiée en ajoutant une quantité de variation de $\Delta\phi_s$ et on refait le calcul.
- Un fois que le système d'équation donné par l'équation (II.27) est vérifié les différents termes qui composent le courant total seront calculés.
- Enfin, on refait le calcul pour chaque valeur de tension appliquée jusqu'à ce qu'on termine la gamme de tensions souhaitée.

III.2.4. Le logiciel de traitement des résultats

Le logiciel utilisé est L'ORIGINE, ce programme est spécialisé dans le traitement des résultats obtenus soit numérique ou bien par expérience pratique, et de tracer les courbes adéquates, nous avons utilisé pour tracer des courbes.

III.2.5. Paramètre de simulation

Le tableau donne les paramètres électroniques et technologiques utilisés dans cette simulation.

Tableau III.1 – Table des différents paramètres utilisés dans le calcul [10].

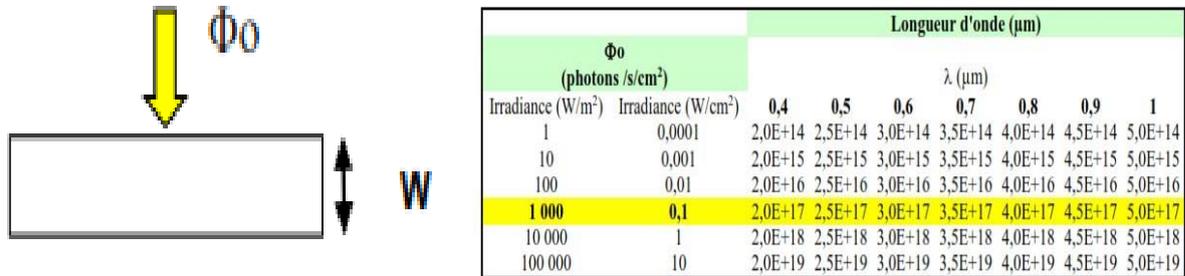
Paramètres	Signification	Valeur
q	Charge électronique	$1.6 * 10^{-19} \text{C}$
K_b	Constante de Boltzmann	$1.38 * 10^{-23} \text{J/K}$
T	température ambiante	300K
h	Constante de Planck	$6.62 * 10^{-34}$
ϵ_0	Permittivité de vide et de l'isolant	$8.85 * 10^{-14} \text{F}$
E_g	Largeur de la bande interdite	1.12 eV
ϵ_s	Permittivité de semiconducteur	$11.7 * \epsilon_0 \text{F/cm}$
χ_s	Affinité électronique de semiconducteur	4.05V
δ_n	Section de capture de électron et de trous	10^{-13}cm^{-3}
A^*	constante de Richardson des électrons	$112 \text{A}/(\text{cm}^2 \text{K}^2)$
A_p^*	Constante de Richardson des trous	$32 \text{A}/(\text{cm}^2 \text{K}^2)$
S_n	Vitesse de la recombinaison de surface	10^7cm/s
$\chi_n = \chi_p$	Hauteur de la barrière tunnel pour les électrons et les trous	0.7 eV
φ_0	Niveau de neutre	0.3 eV
τ_0	Constante du temps tunnel du métal	10^{-3}s
N_a	Densité de dopage	$2 * 10^{15} \text{cm}^{-3}$
V_{th}	Vitesse thermique des électrons	$2.29 * 10^5 \text{cm/s}$
V_{th}	Ecart entre le niveau de Fermi et le niveau de conduction	0.2359 eV
N_v	Densité effective d'état dans la bande de valence	$1.83 * 10^{19} \text{cm}^{-3}$
N_c	Densité effective d'état dans la bande de conduction	$3.25 * 10^{19} \text{cm}^{-3}$
n_i	Concentration intrinsèque des électrons	$9.65 * 10^{19} \text{cm}^{-3}$
D_{it}	Densité des états d'interface	$5 * 10^{11} \text{états}/(\text{cm}^3 \text{eV})$
N_f	Densité des charges fixes d'oxyde	$5 * 10^{11} \text{cm}^{-2}$
φ_m	Travail de sortie de métal	4.1 eV
d_i	Épaisseur de la couche d'oxyde	$20 * 10^{-8} \text{cm}$
H	Épaisseur de la cellule solaire	250 μm

La permittivité de l'oxyde est prise égale à celle du vide égale à 1.

III.2.6. Photoconductance ou Conductivité modifié / Résistivité sous éclairage

Cas d'un faisceau monochromatique.

Le flux de photons incidents pour une longueur d'onde λ et une irradiancedonnée.



λ (nm)	α (cm-1)
300	1 730 000
400	95 200
500	11 100
600	4 140
700	1 900
800	850
900	306
1000	64
1100	4

Figure III.4—

Flux de photons incidents par unité de surface et par unité de temps et Coefficient d'absorption en fonction de longueur d'onde

Les données expérimentales dans le tableau permet de prévoir les deux relations suivant pour le coefficient d'absorbance et pour l'irradiance respectivement:

$$\alpha(\lambda) = \frac{6.864 \times 10^{-5}}{\lambda} + 50.42 \lambda^{-4.5} \quad m^{-1} \quad (III.1)$$

$$F(\lambda) = 5 \times 10^{27} \lambda - 7.57 \times 10^{12} \quad s^{-1} m^{-1} \quad (III.2)$$

III.3. Discussions des résultats de simulation

Ce travail a été réalisé avec le logiciel Mathcad pour les cellules solaires MIS de type p. Les valeurs des paramètres choisis (références) sont :

- $N_a = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$: concentration de dopage.
- $D_{it} = 5 \times 10^{11} \text{ états/eV/cm}^2$: Densité des états d'interface.
- $N_f = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: Densité des charges fixes.
- $\varphi_m = 4.3 \text{ eV}$: Travail de sortie du métal.
- $d_i = 20 \text{ Angströms}$ épaisseur de l'oxyde.
- $H = 250 \text{ }\mu\text{m}$ épaisseur du substrat.

La permittivité de l'oxyde est prise égale à celle du vide égale à 1.

III.3.1. Effet de variation du travail de sortie du métal ϕ_m

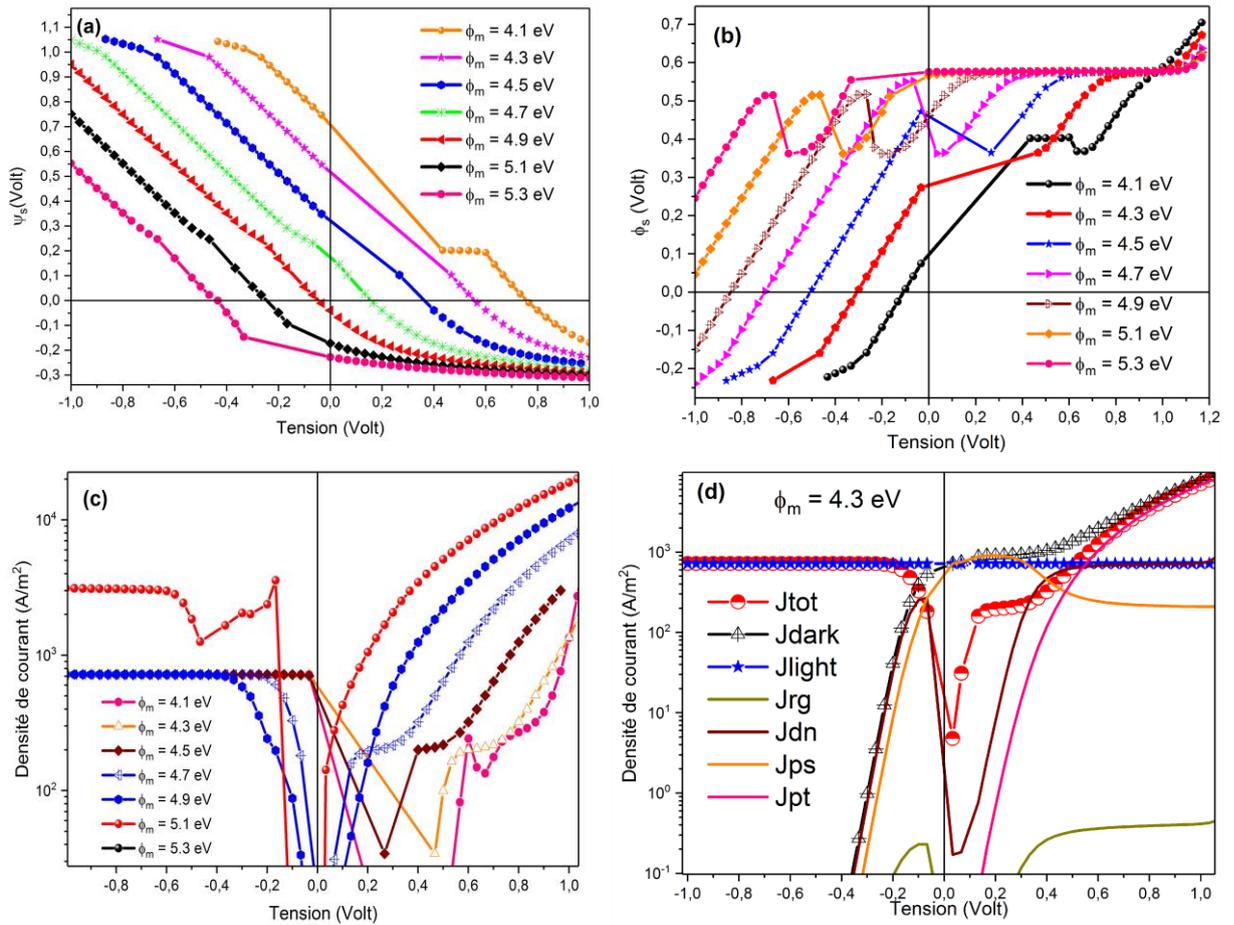


Figure III.5—La caractéristique courant-tension (I-V) de la structure MIS de type p pour différents valeurs de ϕ_m : (a) Variation du potentiel de surface, (b) Variation du potentiel d'équilibre, (c) Densité de courant et (d) Les différentes composantes du courant total

L'effet de la variation des différents métaux c'est à dire différents travaux de sortie ϕ_m sur les caractéristique I(V) du cellule solaire MIS de type p sous les condition d'obscurité est illustrés sur la figure (III.5(a,b,c et d)). Pour ϕ_m inférieur à cert a in valeur $\phi_m c$. On remarque que la caractéristique I(V) est semblable à celle d'un diode conventionnel donnée par l'équation suivante.

$$J = J_0 e^{\beta V} - 1 \quad (III.3)$$

- Pour ϕ_m ($\phi_m c$) le courant inverse prend la plus basse valeur au même temps le courant direct croît linéairement avec la tension appliquée et le courant tunnel est dû aux électrons J_{nt} figure (III.5(d)).

- Pour φ_m On remarque que le courant change complètement l'allure et l'équation ((III.3)) n'est pas valide. Dans ce cas le courant inverse prend une valeur plus grande, le courant tunnel est dû aux trous J_{pt} quand φ_m augmente le potentiel de surface diminue cette diminution conduit à la diminution du courant tunnel des électrons J_{nt} et l'augmentation du courant tunnel des trous J_{pt} devient dominante.
- Le composant est en équilibre en accumulation car φ_s suit la variation de la tension dans cette région. L'intervalle d'équilibre du système diminue en augmentant le φ_m à la sortie φ_m figure (III.5(b))

III.3.2. Effet de variation de dopage N_a

Pour observer l'effet de la concentration du dopage sur le comportement électrique sur la structure MIS, nous avons tracé les caractéristiques $I(V)$ en fonction des différentes valeurs de concentration du dopage dans la gamme $[10^{13} - 10^{18}] \text{cm}^{-3}$.

La figure (III.6(a, b, c)) montre qu'il existe une valeur critique N_{Ac} sous laquelle la caractéristique $I(V)$ suit l'équation de diode idéale équation III.3. Ce N_{Ac} se trouve autour de 10^{18}cm^{-3} au-

dessus de cette valeur la caractéristique $I(V)$ est plus compliquée. Pour $N_a(N_{Ac})$ la séparation entre les deux niveaux de Fermi des électrons et des trous φ_s varie avec la tension appliquée et l'augmentation du potentiel de surface est la même que celle de V . Cela signifie que le système est presque proche de la condition d'équilibre. La principale composante du courant d'obscurité est le courant de diffusion J_{Dn} en inverse et pour les faibles tensions de polarisation, le courant de recombinaison dans la région de déplétion J_{rg} en inverse. Les effets de courant tunnel et des états de surface sont négligeables. Le courant tunnel est dû aux porteurs minoritaires. Par conséquent pour $N_a(N_{Ac})$ le dispositif est appelé dispositif de porteurs minoritaires.

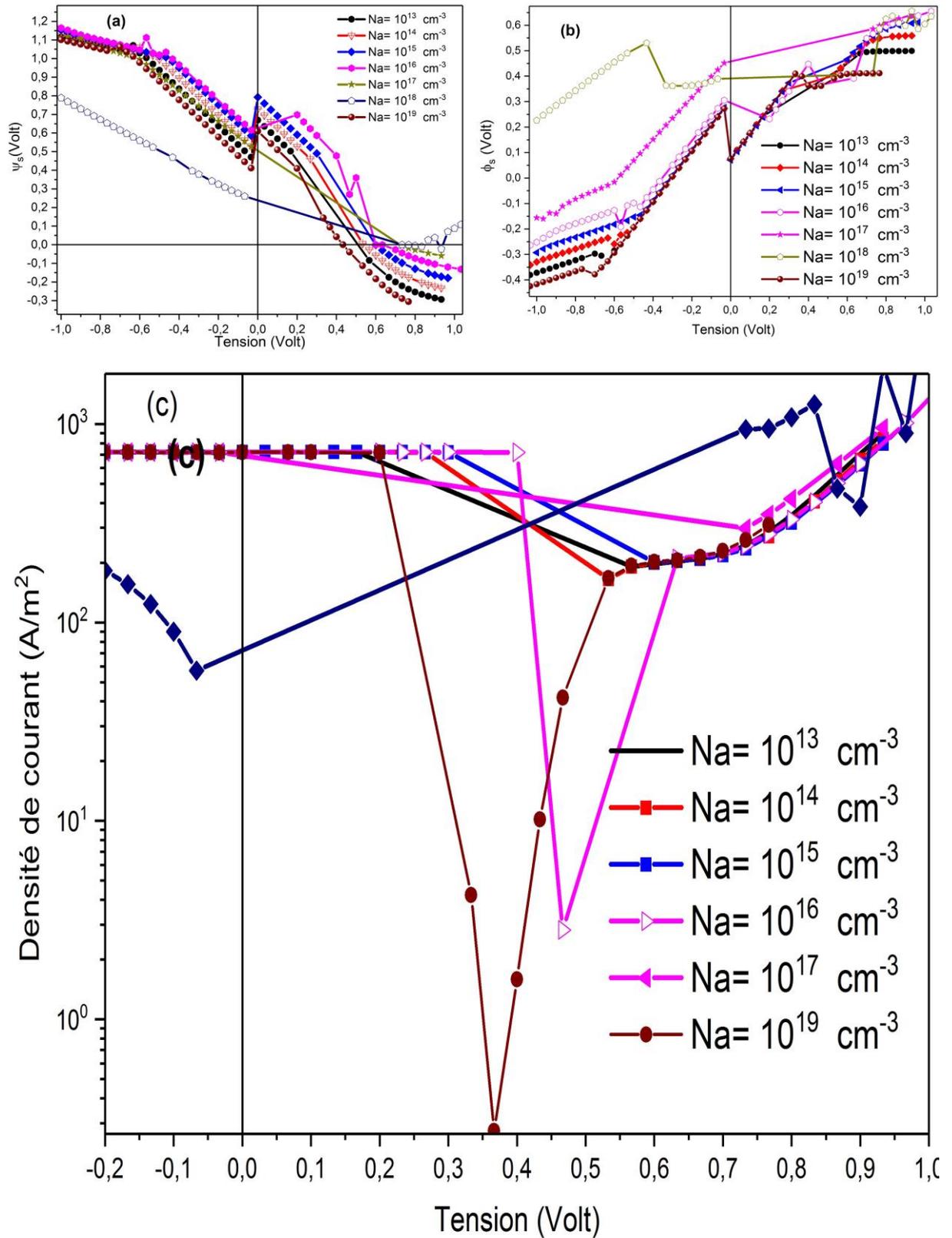


Figure III.6—La caractéristique courant-tension (I-V) de la structure MIS de type p pour différents de dopage N_a : (a) Variation du potentiel de surface, (b) Variation du potentiel d'équilibre et (c) Densité de courant.

Pour $N_a)N_{Ac}$ le système est dans l'état de déséquilibre et ϕ_s ne suit pas la tension appliquée quand $N_a \gg N_{Ac}$. La quantité ϕ_s est approximativement égale à zéro pour une inverse et une faible valeur de V . Le potentiel de surface est approximativement constant et la chute de tension appliquée se trouve dans l'oxyde. La surface du semi-conducteur ne peut pas atteindre les conditions d'inversion. Il est toujours en épuisement avec une concentration plus élevée de trous et concentration des électrons faibles.

Le passage par effet tunnel à travers l'oxyde se produit principalement par des trous en conséquence le dispositif est un dispositif majoritaire avec J_{pt} dominant à la tension de polarisation inverse et J_{ps} ainsi que J_{pt} dominant en direct, le courant de diffusion J_{Dn} et le courant de recombinaison J_{rp} peut être négligé et la caractéristique $I(V)$ ne peut pas être déterminée par une relation telle que l'équation ((III.3)).

III.3.3. Effet de variation d'épaisseur d'oxyde d_i

La figure (III.7) illustre l'effet de variation des différentes valeurs de travail de sortie du métal. On remarque que l'épaisseur de l'oxyde est un paramètre important car il affecte la caractéristique $I(V)$ de structure MIS. Son effet dépend du choix des autres paramètres. On montre que l'effet de d_i pour deux valeurs différentes de $\phi_m = 4.1 \text{ eV}$ et 4.3 eV . Si les autres paramètres sont choisis de sorte que le composant devient un dispositif de porteurs minoritaire figure (III.7), pour les faibles d_i , la tension appliquée est principalement trouvée à travers le semi-conducteur et la séparation entre les deux niveaux de Fermi ϕ_s sont égaux à V et le potentiel de surface ψ_s suit V . Les principales composantes du courant sont le courant J_{rp} (en inverse et pour une faible valeur de tension de polarisation en direct) et J_{Dn} pour une grande tension de polarisation en avant, le courant de tunnel J_{pt} est élevé lorsque que les grandes valeurs de l'épaisseur d'oxyde d_i ,

le courant tunnel J_{pt} diminue fortement et le potentiel ψ_s fait passer ϕ_s et V devient inférieur à V et le système devient loin de l'équilibre. La chute de tension à travers l'isolant augmente, les états de surface ont plus d'effets sur la caractéristique $I(V)$ jusqu'à ce que J_{pt} domine pour la tension de polarisation plus élevée.

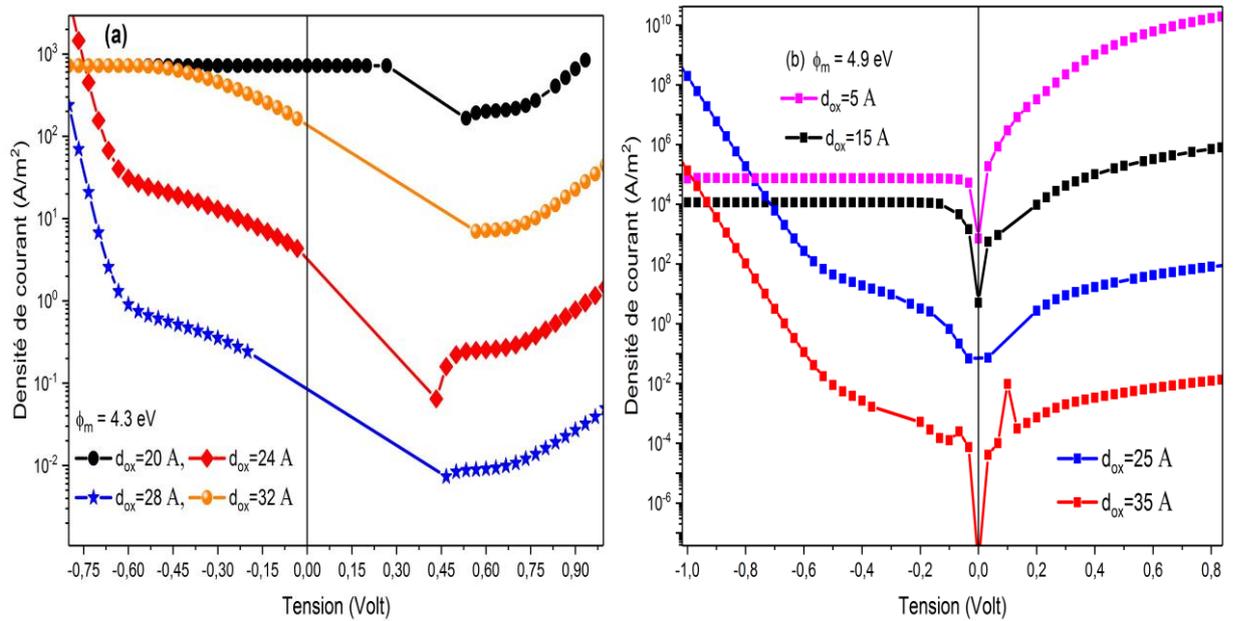


Figure III.7—La caractéristique courant-tension (I-V) de la structure MIS de type pour différents valeurs de d_{ox} : (a) $\phi_m = 4.3 \text{ eV}$ et (b) $\phi_m = 4.9 \text{ eV}$.

III.3.4. Effet de variation de la densité d'états de surface N_f

les charges fixes dans l'oxyde N_f sont localisées à l'interface isolant-semi-conducteur. Elles sont généralement des charges positives si l'on change avec le potentiel de surface et il y a un effet dynamique sur tout en illumination figure (??) contrairement sous dark où il n'y a pas d'effets dynamiques.

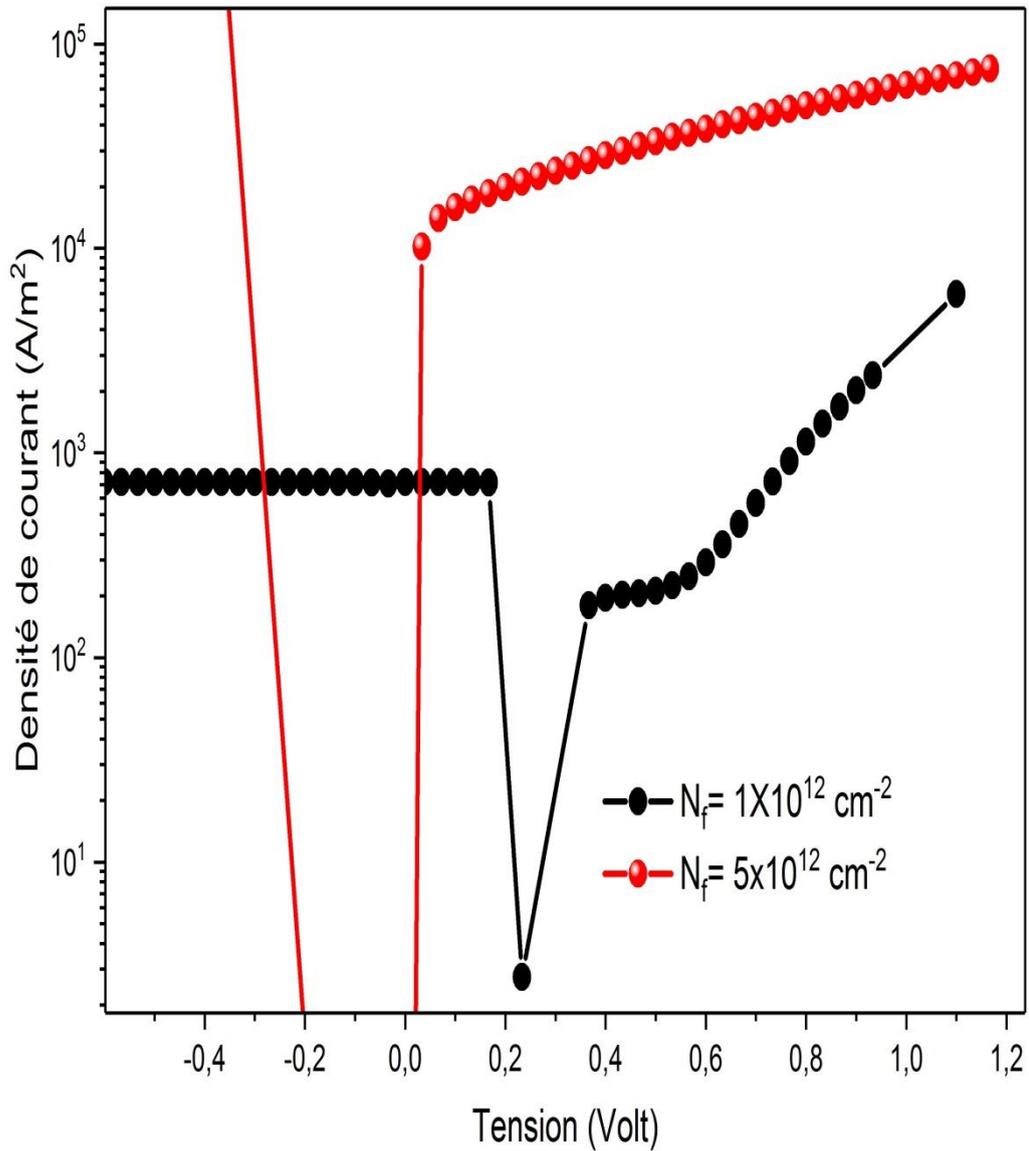


Figure III.8 – La caractéristique courant-tension $I(V)$ de la structure MIS de type p pour deux valeurs de charges fixes N_f .

III.3.5. Effet de variation de la densité des états d'interface D_{it}

La figure (III.9(a,b,c)) montre les caractéristiques $I(V)$ de la structure MIS pour différentes densités d'état de surface D_{it} .

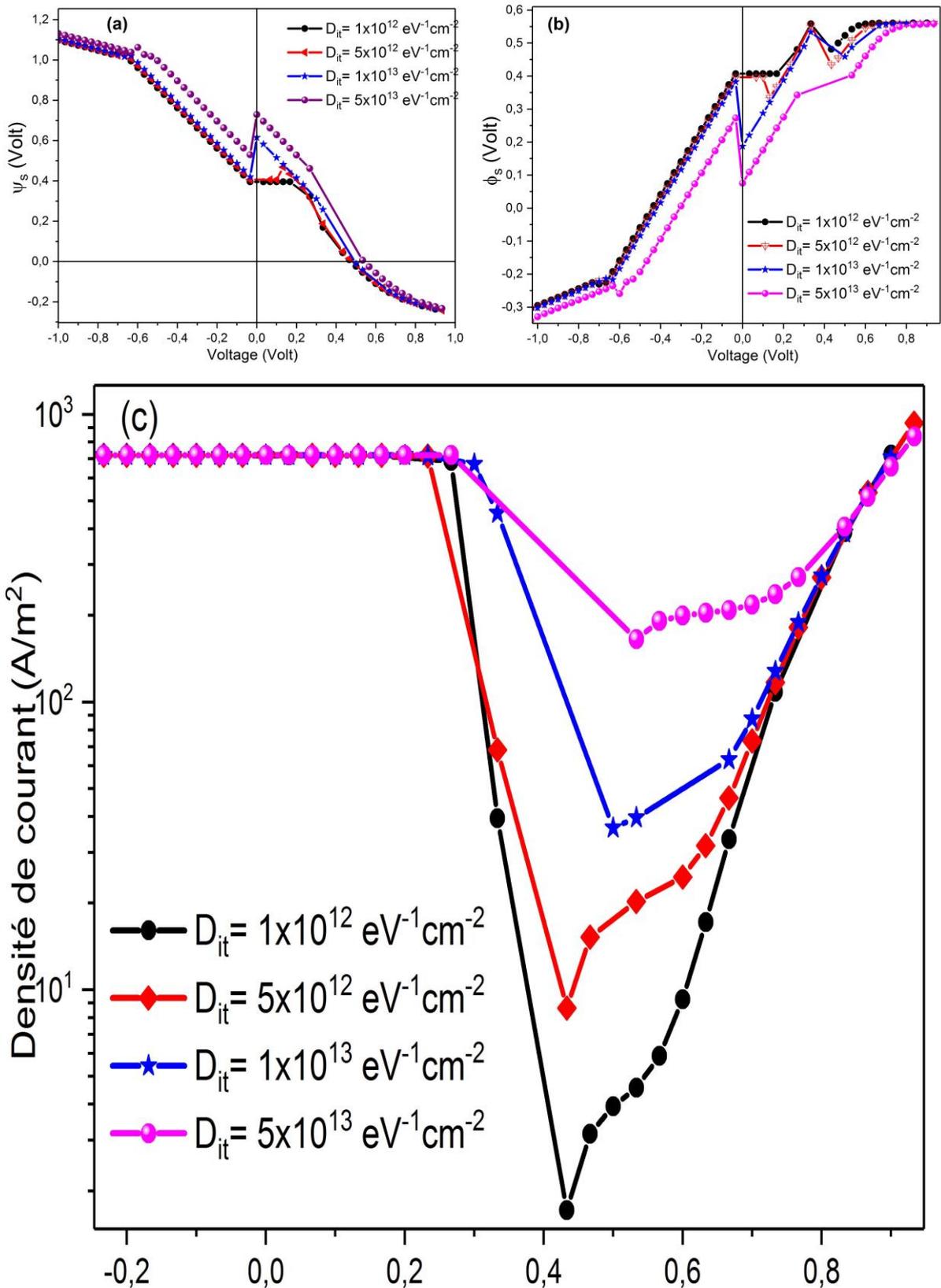


Figure III.9—La caractéristique courant-tension (I-V) de la structure MIS de type p pour différents de dopage D_{it} : (a) Variation du potentiel de surface, (b) Variation du potentiel d'équilibre et (c) Densité de courant.

On peut voir dans cette figure (III.9(c)) qu'il y a deux régions différentes pour l'état de surface D_{it} (10^{12} états/cm²/ev et D_{it}) 10^{12} états/cm²/ev. Les effets de la densité d'états de surface D_{it} dépendent principalement sur le choix des autres paramètres $\phi_m, N_A, N_D, d_i, \dots$. En choisissant des paramètres presque optimaux, le semiconducteur, la surface peut être inverse ϕ_s suit la tension appliquée; le périphérique est un périphérique numérique minoritaire et le courant tunnel principale est due aux électrons, l'effet des états de surface J_{ps} et du tunnel majoritaire, le courant J_{pt} sont négligeables. La caractéristique $I(V)$ dans ce cas se représente par l'équation du diode III.3.

L'augmentation de la densité d'états de surface D_{it} diminue de la bande flexion en raison des charges négatives dans l'accepteur d'états de surface ce qui entraîne une augmentation de la différence de potentiel à travers l'isolant et une diminution en ψ_s . Cette réduction de ψ_s augmentera l'obscurité de composant et diminue le courant tunnel des porteurs minoritaires J_{nt} . Lorsque D_{it} dépasse un certain niveau appelé D_{itc} , l'effet des états de surface agit comme des centres de recombinaison, les conditions proches de l'équilibre de cellule solaire conduit la forte inversion et l'épuisement, la concentration de trous à la surface augmente et la recombinaison du courant de trous courant à travers les états de surface J_{ps} et le trou le courant tunnel J_{pt} augmente de manière significative. En conséquence ($q\phi_s = E_{fn} - E_{fp}$) augmentera rapidement avec si le courant d'obscurité augmente aussi considérablement comme si augmente encore, le courant J_{rg} à travers la surface états J_{ps} devient très grand et domine le dispositif actuel.

III.3.6. Effet de variation de l'épaisseur de la cellule solaire H

L'épaisseur de cellule solaire a un effet négligeable sur la caractéristique $I(V)$ de structure MIS comme indiqué à la figure (III.10) le changement de courant dépend de la valeur relative de l'épaisseur H par rapport à la longueur de diffusion L_n

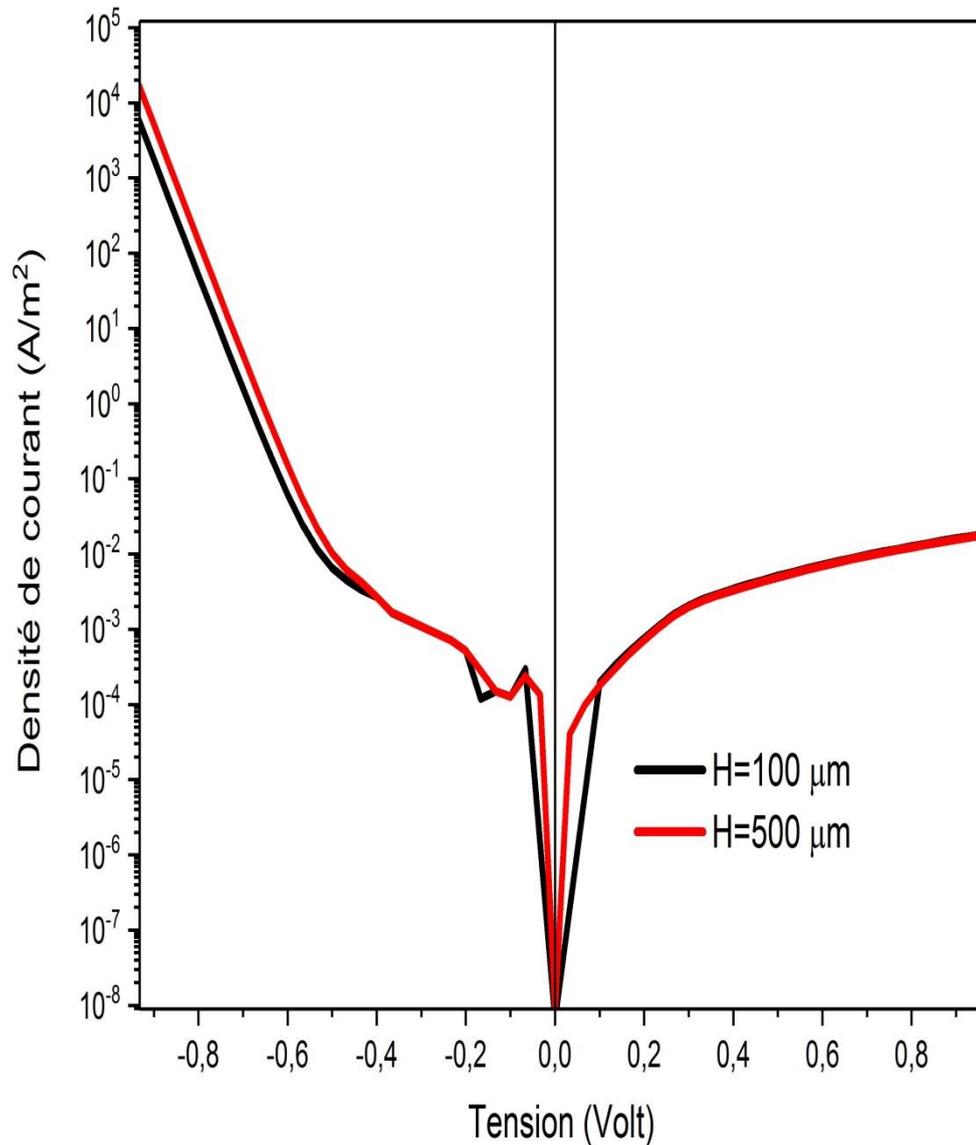


Figure III.10—La caractéristique courant-tension $I(V)$ de la structure MIS de type p pour deux valeurs de H .

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté les résultats obtenus par l'utilisation du modèle simulé de la caractéristique courant-tension des structures MIS. Ceci nous a permis d'étudier les effets des paramètres des mécanismes de conduction dans ces structures. Aussi, l'état d'équilibre du dispositif a été discuté par la variation du paramètre ϕ_s en fonction de la tension V .

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif assigné à ce travail est l'étude du comportement électrique des cellules solaires de structures Métal-isolant-semiconducteur (MIS) et spécialement la caractéristique électrique courant-tension (I-V) sous illumination c'est à dire lorsqu'il existe un photocourant. Pour atteindre ce but, nous avons abordé, dans le cadre de ce travail, les points suivants:

- Une description d'une cellule solaire et plus précisément le diagramme de bande d'énergie de la structure Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS) dont l'épaisseur de l'interface n'exède pas 50\AA , les mécanismes de conduction qui peuvent intervenir lorsque ses composants sont soumis à une tension de polarisation.
- Cette dernière étude nous a permis de présenter un modèle de calcul du courant à travers cette structure MIS: L'algorithme présenté dans ce manuscrit nous a permis de calculer les deux paramètres importants ϕ_s et ψ_s intervenant dans le calcul du courant à travers ces structures.
- Aussi ce modèle nous a permis d'étudier les effets des différents paramètres (travail de sortie du métal ϕ_m ; la concentration du dopage N_a , la densité des états d'interface D_{it} et l'épaisseur de l'isolant d_i) sur le courant total
- De même, le modèle utilisé nous a permis d'analyser l'état d'équilibre du composant lorsque l'un des paramètres cités variera.

Notre contribution à l'étude des cellules solaires MIS réside dans le modèle théorique

utilisé pour étudier les effets des différents paramètres caractérisant la caractéristique courant-tension (I - V). Afin de parvenir à tirer des conclusions définitives sur la validité de ce modèle, il est important de comparer avec d'autres modèles qui existent dans la littérature.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sandrine Bernardini. *Modélisation des structures Métal-Oxyde-Semiconducteur (MOS): Applications aux dispositifs mémoires*. PhD thesis, Université de Provence-Aix-Marseille I, 2004.
- [2] Kaoutar Kenza Hachemi and Kamel Guergouri. Simulation numérique de la charge totale de semi-conducteur dans une structure mos. 2013.
- [3] Mathieu Henry and Fanet Hervé. *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, volume 5. Dunod Paris, 2001.
- [4] Simon M Sze and Kwok K Ng. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons, 2006.
- [5] Abdelghani Rahal. *Modélisation et simulation des phénomènes de transport dans la structure métal-isolant-semiconducteur (MIS)*. PhD thesis, 2018.
- [6] L B Freeman and W E Dahlke. Theory of tunneling into interface states. *Solid-State Electronics*, 13(11) : 1483–1503, 1970.
- [7] H C Card and E H Roderick. Studies of tunnel MOS diodes. i. interface effects in silicon schottky diodes. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 4(10) : 1589, 1971.
- [8] H C Card and E H Roderick. Studies of tunnel MOS diodes. ii. thermal equilibrium considerations. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 4(10) : 1602, 1971.

- [9] MOHAMED YEHYA DOGHISH AND FAT DUEN HO. A comprehensive analytical model for metal-insulator-semiconductor (mis) devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 39(12) :2771–2780, 1992.
- [10] Mohamed Yehya Doghish and Fat Duen Ho. A comprehensive analytical model for metal-insulator-semiconductor (mis) devices: A solar cell application. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40(8) :1446–1454, 1993.
- [11] K K Ng and H C Card. A comparison of majority- and minority-carrier silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 27(4) :716–724, 1980.
- [12] M A Green, F D King, and J Shewchun. Minority carrier tunnel diodes and their application to electron and photo-voltaic energy conversion theory. *Solid State Electronics*, 17(6) :551–561, 1974.
- [13] Larry C Olsen. Model calculations for metal-insulator-semiconductor solar cells. *Solid-State Electronics*, 20(9) :741–751, 1977.
- [14] H C Card. Photovoltaic properties of mis-schottky barriers. *Solid State Electronics*, 20(12) :971–976, 1977.
- [15] A G O'Neill. An explanation of the asymmetry in electron and hole tunnel currents through ultra-thin SiO_2 films. *Solid State Electronics*, 29(3) :305–310, 1986.
- [16] J Shewchun, R Singh, and M A Green. Theory of metal-insulator-semiconductor solar cells. *Journal of Applied Physics*, 48(2) :765–770, 1977.
- [17] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, and Benjamin Faraggi. *Cellules solaires-5e éd. : Les bases de l'énergie photovoltaïque*. Dunod, 2010.
- [18] Larry C Olsen. Model calculations for metal-insulator-semiconductor solar cells. *Solid State Electronics*, 20(9) :741–751, 1977.
- [19] P Viktorovitch and G Kamarinos. Improvement of the photovoltaic efficiency of a metal-insulator-semiconductor structure: Influence of interface states. *Journal of Applied Physics*, 48(7) :3060–3064, 1977.

-
- [20] Salaheddine Bensalem. *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires*. PhD thesis, 2018.

- [21] Hocine Allem. *Etude de l'influence de la couche d'oxyde interfaciale sur les paramètres d'une cellule solaire à conversion photovoltaïque du type MIS*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2009.
- [22] Benjamin Paris, Julien Eynard, Frédéric Thiéry, Adama Traoré, Monique Polit, and Thierry Talbert. *Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment enr. J3eA*, 8 :1006, 2009.