

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département: Sciences de la Matière



MEMOIRE DE MASTER

Domaine: Sciences de la Matière

Filière: Physique

Option: Physique des matériaux

Thème:

Etude des effets des paramètres du courant de conduction "la caractéristique (I-V)" des structures MIS

Présenté par:

Abidi Larbi Et Dris Khelil

Devant le jury :

M. Bouhelel	M.C.A	Université de Tébessa	Président
N. Rouag	M.C.A	Université de Tébessa	Rapporteur
I. Saouane	M.A.A	Université de Tébessa	Examineur

Date de soutenance : 27/05/2018

ملخص

إن تطبيق المركبات (معدن-عازل-شبه ناقل) في الإلكترونيك يعتمد على فهم وإدراك تطور مفهوم هذه المركبات. على العموم توجد طرق للمحاكاة والنمذجة لا تسمح فقط بفهم عمل هذه المركبات ولكن أيضا لتحكم في الإعدادات المحددة لأدائها. تم استعمال نموذج يحاكي الميزة الكهربائية تيار-توتر (I-V) لنقل الشحنة في البنية MIS حتى يتم فهم أثر مختلف الوسائط المتكاملة في هذه الميزة الكهربائية.

Abstract :

The application of components in electronics of metal-insulator-semiconductor (MIS) is based on the understanding and development of the concept of these devices.

Generally, there are tools for simulation and modelling to understand not only the work of these components but also and specially to determine the parameters limiting the performance of these components.

In order to understand the effects of different parameters in electrical characteristics current-voltage (I-V) for MIS devices, we have used a model simulating these characteristics in operating mode.

Résumé :

L'application des composants Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS) en électronique est basée sur la compréhension et le développement du concept du dispositif électronique.

Toutefois, il existe des outils de simulation et modélisation permettant de comprendre non seulement la maîtrise des composants mais aussi et surtout de maîtriser les paramètres limitatifs des performances de celles-ci.

Afin de comprendre les effets des différents paramètres décrivant la caractéristique courant-tension(I-V) pour les structures MIS, un modèle simulant cette caractéristique I-V est utilisé en mode obscurité.

REMERCIEMENTS

Notre remerciements vont tout premièrement

À tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qui nous avons donné pour Terminer ce mémoire.

Nous remercions Monsieur. Nouari Rouag qui nous fait l'honneur de nos encadrer.

Nous tenons à remercier aussi à Bouhelel Mouna. d'avoir accepté d'être président du jury.

Nous tenons à remercier aussi à Monsieur Saoaune Izzeddine.

Nous remercions aussi tous les enseignants d'avoir répondu a Aimablement afin de juger ce travail en participant au jury de mimore.

Particulièrement toutes notre reconnaissances pour nos avoir fait Bénéficiaire de ses compétences scientifiques, ses qualités Humaines et sa constante disponibilité.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à La réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que : Nous dédions cette mémoire de master à :

A Notre très chers défunts Pères : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime, le dévouement et le respect que nous avons toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour notre éducatons et notre bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que vous avez consentis pour notre éducatons et notre formations le long de ces années.

A Notre tendres Mères : Vous représentez pour notre la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de nos encourager. Vous avez fait plus que deux mères puissent faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leurs vies et leurs études.

À tous notre frères et soeurs, ainsi que leurs enfants

À toute la famille de ABIDI eT DRIS.

À tous notre amis et collègues.

À tous les étudiants de la promotion 2017/2018.

A tous ceux qui, par un mot, nous avons donné la force de continuer....

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Unité	Signification
$q\phi_m$	eV	Travail de sortie du métal
$q\phi_s$	eV	Travail de sortie du semiconducteur
E_{FM}	J(ou eV)	Niveau de fermi d'un métal.
E_{FS}	J(ou eV)	Niveau de fermi d'un semiconducteur.
q	(J ou eV)	L'affinité électronique du semiconducteur.
E_C	eV	Bas de bande de la conduction du semiconducteur.
E_V	eV	Bas de bande de la valence du semiconducteur.
V_b	eV	Le potentiel de barrière.
V_i	eV	La différence de potentiel de part et d'autre de l'isolant.
V_s	eV	Le potentiel à l'interface isolant semiconducteur.
E_d	J(ou eV)	Niveau d'énergie des «états donneurs».
V_d	eV	La tension de diffusion.
q_e	C	Valeur absolue de la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
ϕ_{ms}	eV	La différence entre les travaux de sorties métal-semiconducteur.
ψ_b	eV	La différence entre le niveau de Fermi E_F et le niveau intrinsèque
Q_m	C	La charge dans le métal.
Q_s	C	La charge dans le semiconducteur.
x_d	m	la largeur de la zone de charge d'espace dans le semiconducteur.
N_d	m^{-3} (ou cm^{-3})	Concentration on impuretés (dopant) de type donneur.
Q_n	C	La charge d'inversion.
x_{d1}	m	L'épaisseur de la zone désert.
V_G	V	Tension entre grille et substrat ou (Tension de la porte).
\bar{j}	Am^{-2}	Densité de courant.
m_e^*	kg	La masse effective des électrons.
\bar{j}	Am^{-2}	Densité de courant.
I_0	Am^{-2}	La densité de courant du saturation.
K_B	JK^{-1}	Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$).
V	V	La tension appliquée.
T	K	Température absolue.
E_i	eV	Niveaux d'énergie intrinsèque.
n		Le facteur de d'idéalité.
A^*	$A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$	La constant de Richardson.
ϕ_b	J ou eV	Barrière (de potentiel) dit de Shottky.
E_F	eV	Niveaux de Fermie.
$m_{e,p}$	kg	Masse effective des électrons(e) ou des trous (p).
A_n^*, A_p^*	$A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$	La constant effective de Richardson des porteurs.
ϕ_{BPO}	eV	Barrière de Schottky optique à l'équilibre thermique.
U_{RP}	$m \cdot s^{-1}$	La vitesse thermique dans le flux de courant .
N_V	m^{-3} (ou cm^{-3})	La concentration du dopage du substrat.

Q_{it}	C	La charge des états de surface.
D_{it}	$eV^{-1}cm^{-2}$	La densité des états de surface à l'interface du contact MS.
E_{fn}	Joule	Quasi niveau de Fermi des électrons
E_{ss}	Joule	Niveau des états chargés de surfaces
ϕ_0	eV	Niveau au dessous de laquelle les états de charges sont rempli à
N_a	m^{-3} (ou cm^{-3})	Concentration on impuretés (dopant) de type accepteur.
χ_P	eV	La hauteur de la barrière de potentiel du trou.
χ_n	eV	La hauteur de la barrière de potentiel des électrons.
E_{V0}	Joule	Niveau haut de la bande de valence
E_{Fm}	Joule	Niveau de Fermi du métal
E_{Fn}, E_{Fp}	eV	La variation du tension de polarisation.
E_{C0}	Joule	Niveau bas de la bande de conduction
v_{th}	$m.s^{-1}$	Vitesse thermique du porteurs.
\bar{A}_n, \bar{A}_p	m^2	Les sections efficaces de capteur des électrons et des trous.
F_t		La probabilité d'occupation des états de surface.
n_s, p_s	C (ou cm^{-3})	Les quasi-densités d'états de surface des électrons et des trous
n_1, p_1	m^{-3} (ou cm^{-3})	Les concentration des électrons et des trous.
N_C	m^{-3} (ou cm^{-3})	Densité d'états équivalente dans la BC, ramenée en E_C .
F_m		la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie égale à E_{ss} dans le
τ_s	s	La constant de temps due au passage par effet tunnel des porteurs.
τ_t	s	La constant de temps tunnel caractérisant d'échange des porteurs.
τ_0	s	Le temps maximas.
F_0		la fonction d'occupation des états de surface.
$D_{n,p}$	$m^2.s^{-1}$	Coefficient de diffusion des électrons (indice n) ou des trous (indice
n_{p0}	m^{-3} (ou cm^{-3})	Concentration d'électron dans la région neutre du semiconducteur.
F_1, F_2		Fonction de diffusion du courant.
S_n, S_p	$cm.s^{-1}$	La vitesse de recombinaison dans les bords du substrat.
L_n	m	Longueur de diffusion.
τ_n	s	La durée de vie des porteurs minoritaires.
D_n	$cm^2.s^{-1}$	Le coefficient de diffusion.
H	m	L'épaisseur de substrat.
W	m	Largeur de la région de déplétion.
J_{rg}	$A.m^{-2}$	La densité du courant de recombinaison.
J_{dn}	$A.m^{-2}$	La densité du courant de diffusion.
J_{ns}	$A.m^{-2}$	La densité du courant des états d'interface des électrons.
J_{ps}	$A.m^{-2}$	La densité du courant des états d'interface des trous.
J_{nt}	$A.m^{-2}$	La densité du courant des électrons de tunnel.
J_{pt}	$A.m^{-2}$	La densité du courant des trous de tunnel.
N_{ac}	m^{-3} (ou cm^{-3})	La concentration du dopage.
h	J.s	Constante de Planck ($6.62 \times 10^{-34} J.s$).
C_i	eV	Capacité surfacique de l'isolant.
V_{FB}	V	Tension de bandes plates.
N_F	m^{-3} (ou cm^{-3})	Densité des ions fixes
Q_F	C	Charge des ions fixes

TABLE DES FIGURES

1.1 Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique d'une structure MS	4
1.2 Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS	5
1.3 Structure de bande MS.	6
1.4 Structure de bande MS à l'équilibre thermodynamique.	7
1.5 Le dispositif Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS)	8
1.6 Le diagramme de bande énergétique du structure MIS non polarisée. . .	9
1.7 Le diagramme de bande énergétique d'une structure MIS polarisée. . . .	10
2.1 Diagramme des bandes d'énergie d'une structure MIS type P	14
2.2 Algorithme de calcul de $J=f(V)$, $\phi_s=f(V)$ et $\psi_s=f(V)$	20
3.1 La caractéristique électrique J-V sous la condition d'obscurité des contacts MIS pour différents travaux de sortie du métal.	27
3.2 (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différents travaux de sortie.	28
3.3 La caractéristique électrique J-V sous la condition d'obscurité des contacts MIS pour différentes concentration de dopage.	30
3.4 (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différentes concentration de dopage.	32
3.5 La caractéristique électrique J-V sous la condition d'obscurité des contacts MIS pour différentes concentration de d'états d'interface.	33
3.6 (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différentes concentration de densité d'états de surface.	34

3.7	(a) Caractéristique J-V pour le cas $\phi_m = 4.1$ eV), (b) Caractéristique J-V pour le cas $\phi_m = 4.9$ eV)	35
3.8	(a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation du potentiel ϕ_s en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'épaisseur pour le cas $\phi_m = 4.1$ eV)	36
3.9	(a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation du potentiel ϕ_s en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'épaisseur pour le cas $\phi_m = 4.9$ eV)	37

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	i
1 Généralités sur les structures MIS	3
1.1. Introduction	3
1.2. Affinité électronique	4
1.3. Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS	5
1.4. Structure Métal-Semiconducteur (MS)	6
1.4.1. Description de la structure	6
1.4.2. Structure de bande énergétique :	6
1.5. Structure Métal - Isolant - Semiconducteur (MIS)	7
1.5.1. Description de la structure	7
1.5.2. Structure MIS Idéale	8
1.5.3. Bandes d'énergie dans une structure MIS	8
1.5.4. Structure MIS réelle	10
1.6. Caractéristique courant et tension (I-V)	11
1.7. Conclusion	11
2 Modélisation de la caractéristique électrique I-V des structures MIS	13
2.1. Introduction	13
2.2. Modélisation de la caractéristique électrique I-V des contacts métal-isolant-semiconducteur	14
2.2.1. Densité de courant tunnel	15
2.2.2. Densité de courant des états d'interface	16
2.2.3. Densité de courant de diffusion et de recombinaison	18
2.2.4. Densité de courant total	19
2.3. Méthode d'optimisation utilisé	21

2.3.1. Introduction	21
2.3.2. La méthode de Levenberg-Marquardt	22
2.4. Conclusion	23
3 Résultats et Discussion	24
3.1. Introduction	24
3.2. Calcul et discussions des résultats	24
3.2.1. Effet de changement du travail de sortie	25
3.2.2. Effet de changement de la concentration de dopage N_a	29
3.2.3. Effet de changement de la densité des états d'interface	31
3.2.4. Effet de changement de l'épaisseur de l'interface d_i	34
3.3. Conclusion	36
Bibliographie	40

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En dehors de ces applications classique en détection HF (Haute Fréquence), redressement à fort courant ou commutation dans les circuits analogiques, le contact métal-Semiconducteur (MS) constitue un moyen puissant pour l'étude des semiconducteurs.

La réalisation de tels contacts se fait par déposition de couches métalliques très minces sur des substrats semiconducteurs, dont la surface recevant le dépôt est bien traité. Toutefois, les procédés usuels d'élaboration de ces structures laissent une couche entre le métal et le semiconducteur, dont l'épaisseur peut y aller jusqu'à 50 Å, introduisant des états de surfaces à l'intérieur de la bande interdite. ces états affectent beaucoup les propriétés électrique de ces dispositifs. Pour comprendre les mécanismes qui contrôlent ces propriétés, une étude du comportement électrique des structures Métal-Isolant-Semiconducteur à été (MIS), au point de l'isolant ne dépasse pas 50 Å est nécessaire.

Ce travail porte sur l'étude du comportement électrique et spécialement la caractéristique courant-tension (I-V) des structures MIS. Notre travail s'inscrit dans le cadre de la simulation et modélisation des propriétés électriques des structures métal-isolant-semiconducteur (MIS). Spécialement, il porte sur l'étude des effets des paramètres tels que le travail du 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). Pou 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 la structure MIS. On s'est concentré sur la description de sa structure de bande et sur les phénomènes de transport de charge des ces structures.

Dans Le deuxième chapitre ; on présente le modèle de simulation de la caractéristique électrique courant-tension I-V des structures MIS et la technique d'optimisation utilisé pour ce modèle qui est la méthode de Marquadt Levenberg.

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

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES STRUCTURES MIS

1.1. Introduction

La structure Métal-Semi-conducteur est le dispositif unipolaire qui est la base d'un grand nombre de structures électroniques.

Un dispositif unipolaire signifie un seul type de porteurs (électrons ou trous) participe de façon importante à la conduction du courant et détermine les conditions de fonctionnement du dispositif. Souvent, l'application d'une tension sur une structure méta semiconducteur (MS) produit une caractéristique courant-tension (I-V) non symétrique, la structure peut se comporter comme un redresseur (diode Schottky [1]). La diode Schottky réelle n'est qu'une structure MIS, dont l'isolant ne dépasse pas les 50 Å est un autre exemple d'hétérostructure, les caractéristiques essentielles d'une telle structure sont présentés [2].

1.2. Affinité électronique

Pour comprendre le fonctionnement des jonctions métal semi conducteur, on devra comparer la valeur du travail de sortie du métal $q\phi_m$ qui représente l'énergie à fournir à un électron de conduction d'un métal pour qu'il quitte le métal vers le vide sans énergie cinétique.

L'affinité électronique du semi-conducteur $q\chi$ représente l'énergie fournie à un électron du bas de la bande de conduction pour se placer dans le vide. C'est une caractéristique du matériau semiconducteur.

Le travail de sortie du semi-conducteur représente l'énergie fournie à un électron du semiconducteur pour qu'il passe du niveau de Fermi au vide. Cette caractéristique dépend du matériau (affinité électronique) et du dopage[3, 4].

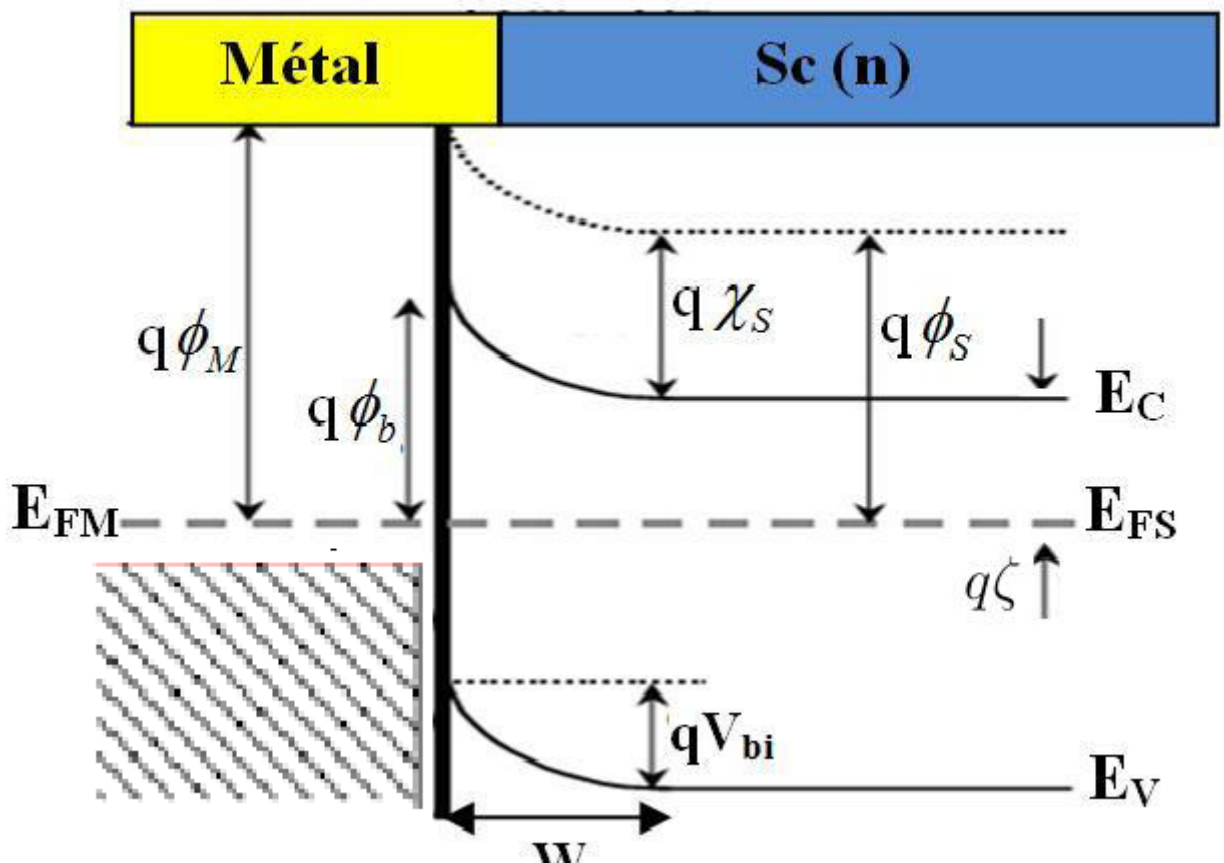


Figure 1.1 – Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique d'une structure MS

1.3. Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS

Soit un métal dans le travail de sortie $q\phi_m$ et un semi-conducteur dans le travail de sortie $q\phi_s$ séparé par un isolant constitué par une épaisseur de vide relativement faible.

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 les différences des travaux de sortie apparaît figure(1.2).

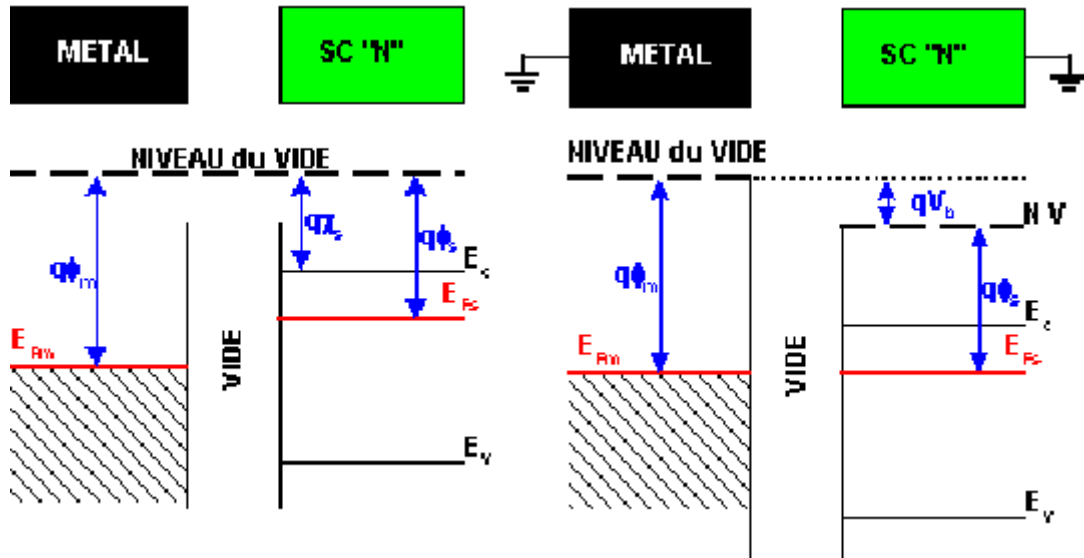


Figure 1.2 – Diagramme de bande d'énergie d'une structure MIS

Suivant les valeurs de $q\phi_m$ et de $q\phi_s$, $q\phi_b$ peut être positif ou négatif.

Le potentiel de barrière V_b 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 diminue, la capacité augmente.

La charge dans le métal est égale et de signe opposé à celle dans le semiconducteur. Compte tenu, des très grandes différences de densités d'états disponibles entre le métal et le semiconducteur, cette charge sera confinée sur une fraction de couche atomique dans le métal (épaisseur supposé nulle).

La charge dans le semiconducteur 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 désertion de porteurs majoritaires.

1.4. Structure Métal-Semiconducteur (MS)

1.4.1. Description de la structure

Lorsqu'un métal et un semiconducteur sont en contact, il existe à l'interface une barrière de potentiel donnée par la relation suivante :

$$E_d = q\phi_m - q\chi \quad (1.1)$$

$q\phi_m$: représente le travail de sortie du métal.

$q\chi$: représente l'affinité électronique du semiconducteur.

1.4.2. Structure de bande énergétique :

Le diagramme énergétique de bande plate est établi lorsque $q\phi_m = q\phi_s$ dans la figure(1.3).

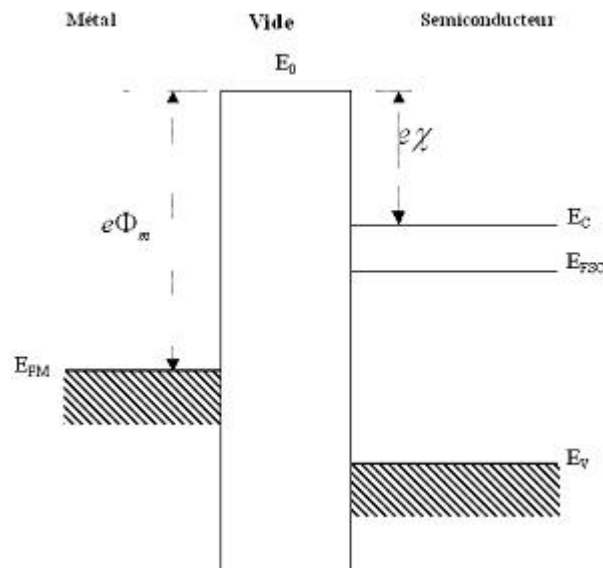


Figure 1.3 – Structure de bande MS.

On considère un semiconducteur de type n, avec $q\phi_m > q\phi_s$. Le travail de sortie du métal est plus grand que le travail de sortie du semiconducteur, les électrons traversent le

semiconducteur vers le métal. Le régime d'équilibre du système est défini par l'alignement des niveaux de Fermi. Il nous donne une courbure des bandes vers le haut, puisque le niveau de Fermi reste horizontal à l'équilibre Figure (1.4).

Dans le cas du métal, il apparaît une accumulation d'électrons à l'interface. Il résulte un champ électrique et une tension de diffusion V_d comme le cas de la jonction p-n, qui équilibrent les forces de diffusion et déterminent l'état d'équilibre [5].

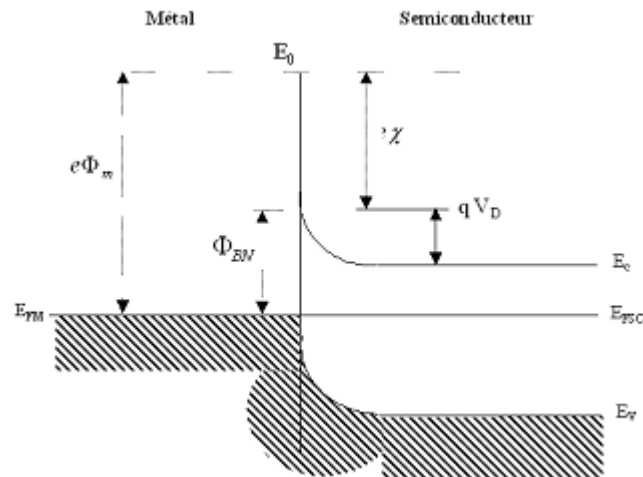


Figure 1.4 – Structure de bande MS à l'équilibre thermodynamique.

Une structure Métal-semiconducteur idéal n'existe pas, car les méthodes de fabrication de ces structures laissent toujours, une interface peut y aller à partir de 5 Å jusqu'à 40 Å. On parle de structure MIS mieux que du diode Schottky.

1.5. Structure Métal - Isolant - Semiconducteur (MIS)

1.5.1. Description de la structure

la fabrication d'un composant MIS est donnée par les trois étapes suivantes :

- Croissance d'une couche diélectrique à la surface d'un semiconducteur.
- Dépôt d'une électrode métallique, dite barrière à la surface diélectrique.
- Elaboration sur le semiconducteur d'un «contact ohmique» permettant de polariser le semiconducteur par rapport à la barrière.

L'isolant doit être assez épais pour interdire toute circulation du courant à travers le diélectrique. Il en résulte que, même si une polarisation est appliquée entre la barrière et

contact ohmique, le semiconducteur est toujours en équilibre thermique. alors le niveau de Fermi est « plat ».

On va étudier la structure MIS «idéale» pour laquelle :

- Les bandes du semiconducteur sont "plates" lorsque la polarisation appliquée est nulle.
- l'isolant ne contient des charges électriques.
- à l'interface semiconducteur - isolant ne trouve pas d'état électronique.

1.5.2. Structure MIS Idéale

La figure (1.5) représente une structure MIS où d est l'épaisseur de l'isolant et V la tension appliquée au métal.

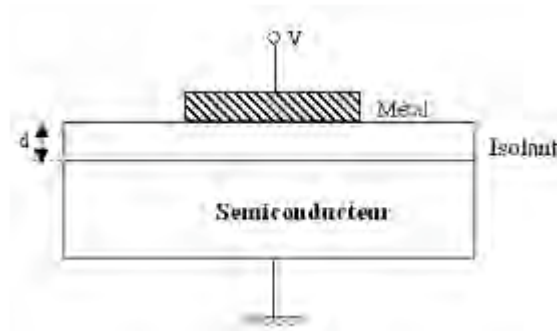


Figure 1.5 – Le dispositif Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS)

Une structure MIS idéale c'est à dire une structure telle que le métal et le semiconducteur ont des travaux de sortie identiques, dont l'interface isolant-semiconducteur contient des états énergétiques qui se localisent dans la bande interdite du semiconducteur, et dont l'isolant constitue un diélectrique parfait. Dans ces conditions la position relative des bandes est inchangée.

1.5.3. Bandes d'énergie dans une structure MIS

Dans le cas d'absence de polarisation extérieure ($V=0$), on aura un régime de bande plate, les niveaux de Fermi sont alignés.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_b \right) = 0 \text{ type n} \quad (1.2)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_b \right) = 0 \text{ type p} \quad (1.3)$$

avec :

$q\phi_m$: Le travail de sortie du métal.

$q\phi_{ms}$: La différence entre les travaux de sorties métal-semiconducteur.

$q\chi$: L'affinité électronique du semiconducteur.

$q\psi_b$: La différence entre le niveau de Fermi E_F et le niveau intrinsèque E_i .

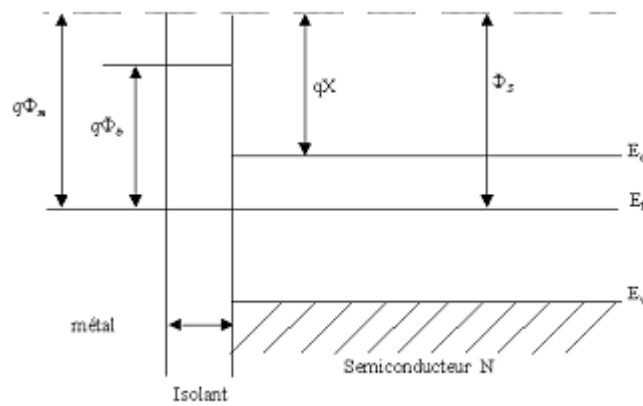


Figure 1.6 – Le diagramme de bande énergétique du structure MIS non polarisée.

A la polarisation d'un structure MIS il existe trois phénomènes. La valeur et le signe de la tension appliquée étudiant le cas où le substrat est de type n.

Régime d'accumulation : Lorsque la tension appliquée est positive par rapport au substrat semiconducteur, on trouve un accumulation, attirons des porteurs majoritaires vers la surface à cause de le champ électrique $Q_m = -Q_s$ figure (1.7).

Régime de depletion :Lorsque la tension appliquée est légèrement négative $Q_m = qN_d X_d$ figure (1.7).

Où X_d : Largeur de la zone de charge d'espace dans le semiconducteur.

Régime d'inversion : On applique une tension extrêmement négative, elle a pour effet d'attirer les porteurs minoritaires vers la surface du semiconducteur, la densité des trous est sur une couche mince à la surface du semiconducteur. Elle va devenir donc supérieure à la densité des électrons. On peut dire qu'il y'a formation d'une couche d'inversion à la surface. On dit aussi qu'il y'a une forte inversion si le potentiel de surface ψ_s est égal à double V_b figure (1.7). Donc, l'égalité de charges dans la structure est donnée par :

$$Q_m = -Q_n + qN_d X_{d1} \tag{1.4}$$

Avec : Q_n : est la charge d'inversion et X_{d1} : est l'épaisseur de la zone déserte.

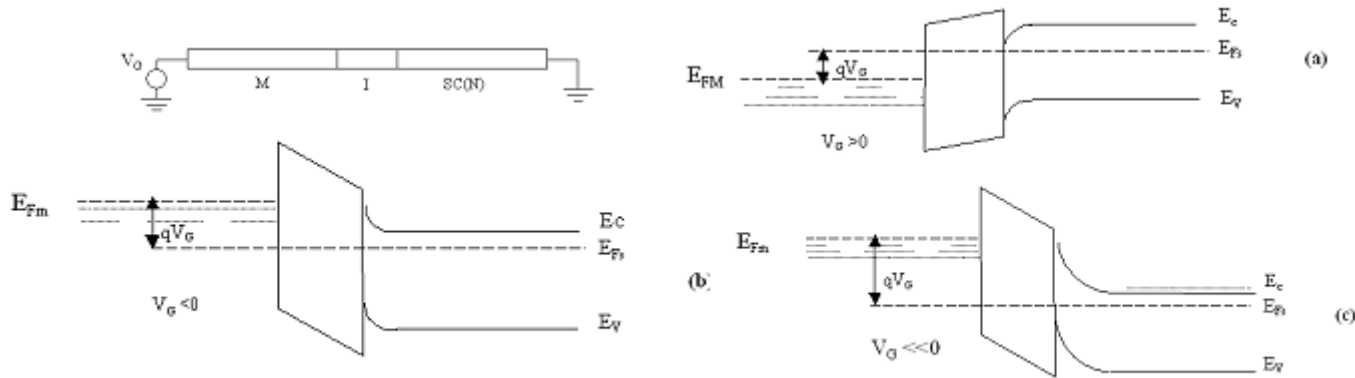


Figure 1.7 – Le diagramme de bande énergétique d'une structure MIS polarisée.

1.5.4. Structure MIS réelle

Dans une structure MIS réelle, les états d'interfaces existent et leurs niveaux énergétiques situées dans la bande interdite du semiconducteur. Ces états donnent lieu à une charge d'interface qui contribue à la courbure de 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 ses charges a une forme de bandes non plate. Pour rétablir un régime de bande plate, il faut appliquer une tension positive (type n) ou

négative (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 en introduisant ou bien en éliminant des états électroniques [6].

1.6. Caractéristique courant et tension (I-V)

Lorsque on met en contact un métal avec un semiconducteur, il résulte un courant dû aux déplacement des porteurs majoritaires à trvetrs l'interface entre le semiconducteur et le métal. Donc ; on va y avoir un émission thermoélectronique par-dessus de la barrière de potentiel [7]. L'équation de la densité de ce courant peut s'écrire [8] :

$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV}{nK_B T}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

Où :

V : la tension appliquée, k_b est la constante de Boltzmann, T est la température, n est le facteur d'idéalité et J_0 : la densité de courant de saturation.

$$J_0 = A^* T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_b}{K_B T} \right)} \quad (1.6)$$

où :

A^* : est la constante de Richardson.

donné par :

$$A^* = \frac{4\pi q m_e K^2}{n^3} \quad (1.7)$$

$$J_p = A_p^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{BP,0}}{K_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{-qV_i}{K_B T}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{K_B T}\right) - 1 \right] \quad (1.8)$$

1.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les diagrammes de bande d'énergie et les mécanismes de transport de charge qui interviennent dans les structures MIS.

Ces derniers sont essentielles à comprendre afin de modéliser mathématiquement la caractéristique électrique courant-tension (I-V) des composants de type MIS et qui feront l'objet d'étude du prochain chapitre.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION DE LA CARACTÉRISTIQUE ÉLECTRIQUE I-V DES STRUCTURES MIS

2.1. Introduction

La caractéristique courant-tension d'une structure MIS joue un rôle important pour la compréhension des propriétés des semi-conducteurs et des condensateurs MIS, dont l'analyse permet d'obtenir des informations sur leurs performances. Le fonctionnement de telles composant est influencé par les paramètres de chaque mécanisme intervenant dans le courant total. Ces mécanismes sont : la densité du courant de recombinaison (J_{rg}), la densité du courant de diffusion (J_{dn}) et la densité du courant des états d'interface (J_{ns}), la densité du courant de tunnel (J_{pt}). Dans ce chapitre, nous présentons les mécanismes de transport de charge dans les structures MIS et le modèle mathématique utilisés pour modéliser la caractéristique I-V

2.2. Modélisation de la caractéristique électrique I-V des contacts métal-isolant-semiconducteur

-Modèle théorique :

La figure(2.1) montre le diagramme des bandes d'énergie d'un contact MIS de type P en présence d'une couche interrassiale d_i .

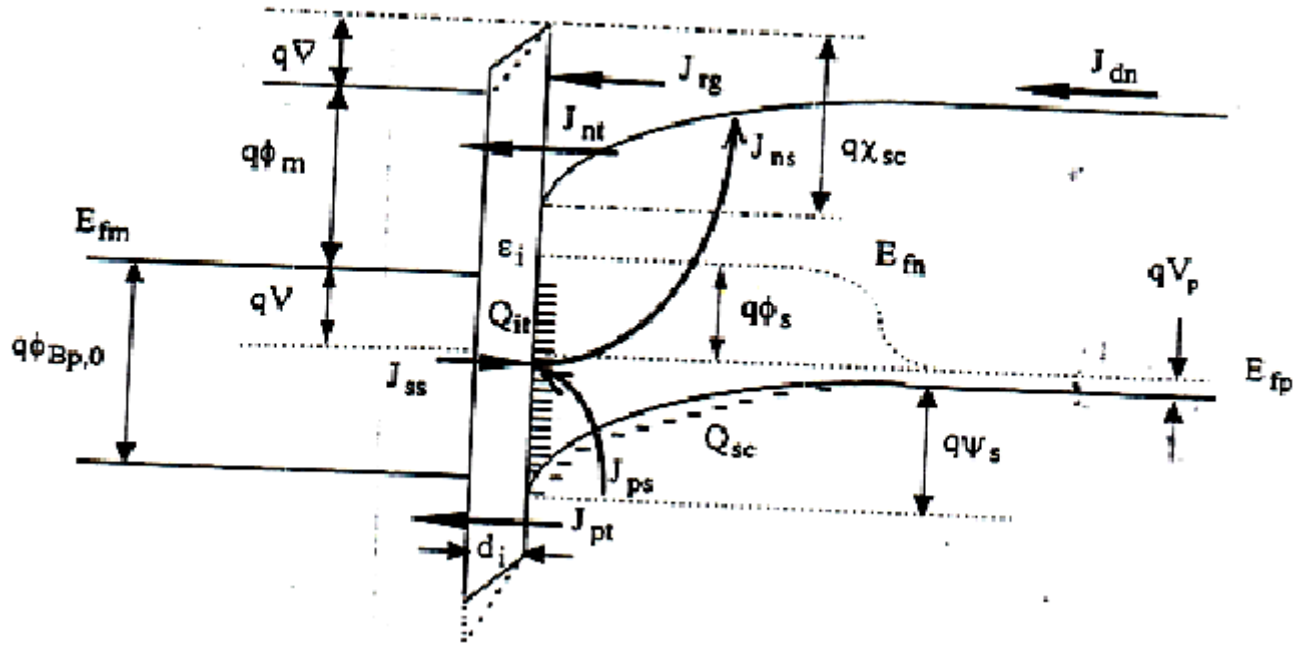


Figure 2.1 – Diagramme des bandes d'énergie d'une structure MIS type P

On suppose que la couche d'interface est due à la supposition des deux quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous. Ils sont séparés d'une énergie égale à $q\phi_s$ dans le semiconducteur figure(2.1). Sachant que, dans le cas d'un contact intime et à l'équilibre thermodynamique, le quasi-niveau de Fermi des électrons dans le semiconducteur (porteurs minoritaire) est aligné avec le niveau de Fermi du métal. A partir de la figure(2.1) la chute de tension ∇ qui se produit à travers la couche d'interface est :

$$\nabla 1 = \frac{E_g}{q} + \chi_{sc} - \phi_m - V_p - \psi_s - V \quad (2.1)$$

En utilisant la loi de Gauss, on peut réécrire cette dernière expression comme :

$$\nabla^2 = \frac{d_i}{\varepsilon_i} (Q_{sc} + Q_{it} + Q_f) \quad (2.2)$$

Q_{it} est la charge des états de surface résultante à l'interface. Si on suppose que ces états sont distribués dans la bande interdite du semiconducteur d'une façon homogène alors on peut écrire que :

$$Q_{it} = qD_{it} (E_{Fn} - E_{ss}) = -q^2 D_{it} (\psi_s + V_p + \phi_s - \phi_0) \quad (2.3)$$

et Q_{sc} : est la charge du semiconducteur.

Du fait que la charge du semiconducteur est due soit à un régime de déplétion, d'accumulation ou d'inversion suivant la tension de polarisation appliquée, alors la charge Q_{sc} s'écrit comme :

$$Q_{SC} = \mp \sqrt{2K_B T \varepsilon_0 N_a} \left[\beta \psi_s + e^{-\beta \psi_s} - 1 + \frac{n_i^2}{N_a} \left\{ e^{\beta \psi_s} [e^{\beta \psi_s} - 1] - \beta \psi_s \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Q_f : est la charge de l'oxyde.

et la charge Q_f s'écrit aussi :

$$Q_f = q.N_f \quad (2.5)$$

Les différentes façons selon lesquelles un électron est transporté à travers une jonction MIS sont montrés dans la figure(2.1) . On se contente ici de donner uniquement les différentes expressions de leurs composants illustrés sur cette figure(2.1).

2.2.1. Densité de courant tunnel

Selon Card et RHoderick [9, 10], l'expression de la densité de courant tunnel des porteurs majoritaire (ici les trous) est donnée par l'équation suivant :

$$J_{pt} = A_p^* T^2 e^{\chi_p^{\frac{1}{2}} d_i} \left[e^{-\frac{(E_{fp} - E_{vo})}{K_B T}} - e^{-\frac{(E_{fm} - E_{vo})}{K_B T}} \right] \quad (2.6)$$

qui peut être réécrite comme :

$$J_{pt} = A_p^* T^2 e^{\chi_p^{\frac{1}{2}} d_i} e^{-\beta(\psi_s + V_p)} \left[1 - e^{-\beta V} \right] \quad (2.7)$$

De la même façon, on peut écrire l'expression de la densité de courant tunnel pour les électrons minoritaires comme :

$$J_{nt} = A_n^* T^2 e^{\chi_n^{\frac{1}{2}} d_i} \left[e^{-\frac{(E_{co} - E_{fn})}{K_B T}} - e^{-\frac{(E_{co} - E_{fn})}{K_B T}} \right] \quad (2.8)$$

qui peut être réécrite comme :

$$J_{nt} = A_n^* T^2 e^{\chi_n^{\frac{1}{2}} d_i} e^{\frac{-E_g}{K_B T}} e^{\beta(\psi_s + V_p)} \left[e^{\beta V} - e^{\beta \phi_s} \right] \quad (2.9)$$

φ_p et φ_n sont respectivement les barrières de potentiel que présentent la couche d'isolant au passage des trous et des électrons du semiconducteur vers le métal et vis versa.

2.2.2. Densité de courant des états d'interface

Suivant l'approche utilisée par freeman et Dahlke[11], l'expression de la densité du courant due au passage des électrons de la bande de conduction vers les états de surface J_{ns} est donnée par :

$$J_{ns} = q D_{it} V_{th} \sigma_n ((1 - F_t) n_s - F_t n_1) \quad (2.10)$$

De même, celle due au passage des trous de la bande de valence vers les états de surface J_{ps} est donnée par :

$$J_{ps} = q D_{it} V_{th} \sigma_p (F_t P_s - (1 - F_t) P_1) \quad (2.11)$$

La densité de courant totale J_{ss} due aux états de surface est donc :

$$J_{ss} = J_{ns} - J_{ps} = \frac{q D_{it}}{\tau_s} (F_t - F_m) \quad (2.12)$$

F_t représente la probabilité d'occupation des états de surface en présence du courant tunnel à travers les états de surface, exprimée par :

$$F_t = \frac{\tau_t F_{to} + \tau_s F_m}{\tau_t + \tau_s} \quad (2.13)$$

avec :

$$\tau_s = \frac{1}{V_{th} [(n_s + n_1) \sigma_n + (p_s + p_1)]} \quad (2.14)$$

$$\tau_t = \tau_o e^{\varphi^{\frac{1}{2}} d_i} \quad (2.15)$$

et

$$F_m = \frac{1}{1 + e^{-\frac{(E_{ss} - E_{fm})}{K_B T}}} \quad (2.16)$$

τ_s : est la constante de temps due au passage par effet tunnel des porteurs (électrons ou trous) piégés par les états de surface vers le métal.

τ_t : est la constante de temps tunnel caractérisant le taux d'échange des porteurs entre la bande de valence et les états de surface.

et

F_m : est la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie égale à E_{ss} dans le métal.

Selon la statistique de SRH, l'expression de la fonction d'occupation des états de surface F_{to} en absence du courant tunnel à travers les états de surface est donnée par :

$$F_{to}(E, V_s) = \frac{\sigma_n n_s + \sigma_p p_1}{\sigma_n (n_s + n_1) + \sigma_p (p_s + p_1)} \quad (2.17)$$

σ_n et σ_p sont respectivement les sections efficaces de capture des électrons et des trous.

Aussi n_s et p_s sont respectivement les quasi-densités d'états de surface des électrons et des trous, définies par :

$$n_s = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{co}}{K_B T}\right) \quad (2.18)$$

et

$$p_s = N_v \exp\left(\frac{E_{fp} - E_{vo}}{K_B T}\right) \quad (2.19)$$

n_1 et p_1 sont respectivement les concentrations des électrons et des trous correspondant au quasi-niveau de Fermi E_F .

$$n_1 = N_c \exp\left(\frac{E - E_{co}}{K_B T}\right) \quad (2.20)$$

et

$$p_1 = N_v \exp\left(\frac{E_{vo} - E}{K_B T}\right) \quad (2.21)$$

2.2.3. Densité de courant de diffusion et de recombinaison

Dans le cas d'un contact MIS réel, élaboré sur un substrat semiconducteur d'épaisseur H , l'expression de la densité du courant de diffusion J_{dn} est donnée par :

$$J_{dn} = \frac{qD_n}{L_n} n_{po} \frac{F_2(H_a)}{F_1(H_a)} \left[e^{\beta\phi_s} - 1 \right] \quad (2.22)$$

avec :

$$F_1(H_a) = \frac{S_n L_n}{D_n} sh \frac{H_a}{L_n} + ch \frac{H_a}{L_n} \quad (2.23)$$

et

$$F_2(H_a) = \frac{S_n L_n}{D_n} ch \frac{H_a}{L_n} + sh \frac{H_a}{L_n}$$

$$\beta = \frac{q}{K_B T} \quad (2.24)$$

avec $H_a = H - W$: H est l'épaisseur du substrat et W est la largeur de la région de déplétion.

La densité de courant de génération est donnée par l'expression suivante :

$$J_{rg} = \frac{qn_i W}{\tau_n} \left[e^{\frac{\beta\phi_s}{2}} - 1 \right] \quad (2.25)$$

τ_n : représente la durée de vie des porteurs minoritaire (électrons) dans la région de déplétion.

2.2.4. Densité de courant total

L'expression de la densité du courant total J_t à travers un contact métal-isolant-semiconducteur(MIS) pratique est :

$$J_t = J_{nt} + J_{pt} - J_{ns} + J_{ps} \quad (2.26)$$

On appelle J_t : courant total d'obscurité (J_{dark}) afin de le différentier du courant généré dans le structure MIS pratiques Lorsqu'elles sont sous illumination [12].

Dans une structure MIS idéale et à l'équilibre thermique, l'effet des différents composants du courant due aux porteurs minoritaires dans la bande de conduction sur le courant total est négligeable, ce qui revient à écrire que :

$$J_{rg} + J_{dn} + J_{ns} - J_{nt} = 0 \quad (2.27)$$

En utilisant ces deux dernières équations avec l'équation(2.23), donc on peut exprimer la densité de courant total selon la forme de l'équation suivant :

$$J_t = J_{ps} + J_{pt} + J_{dn} + J_{rg} \quad (2.28)$$

Les deux équations(2.1) et (2.2), sont utilisé pour déterminer deux paramètres principales le potentiel de surface Ψ_s et le potentiel des états de surface ϕ_s en utilisant l'algorithme suivant :

L'algorithme proposé pour déterminer la potentiel de surface et le potentiel des états de surface consiste à calculer chaque tension :

ΔV : Pas de tension.

D_n : Le coefficient de diffusion. Donnée par la relation suivante :

$$D_n = \frac{D_0}{1 + \left[\frac{N_a(d)}{10^{17}} \right]^{0.6}} + A_0 \quad (2.29)$$

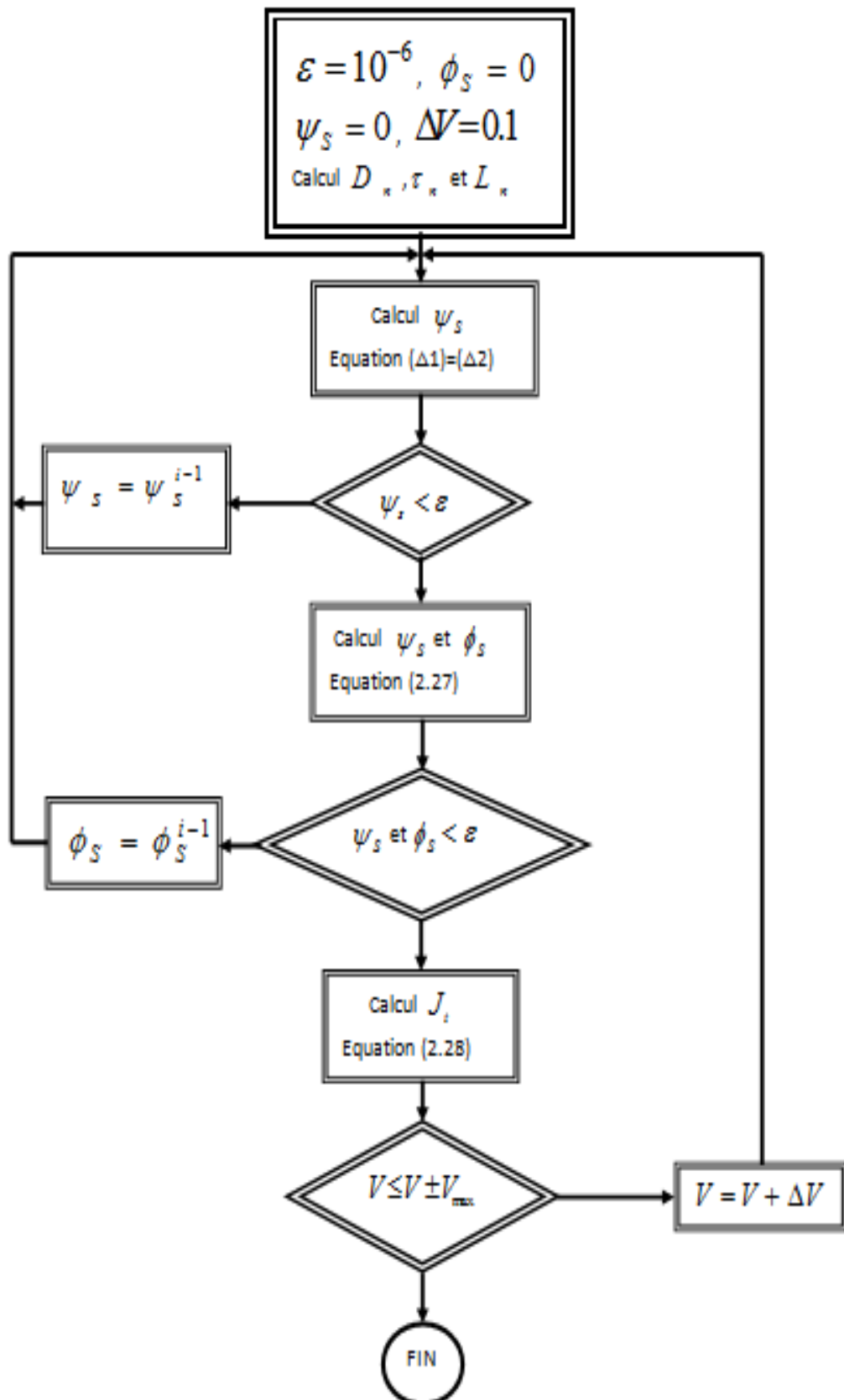


Figure 2.2 – Algorithme de calcul de $J=f(V)$, $\phi_s=f(V)$ et $\psi_s=f(V)$

τ_n : La durée de vie des porteurs minoritaires. Donnée la relation suivante.

$$\tau_n = \left[28410 + 1.67 \times 10^{-26} \times N_a^{1.67} \right]^{-1} \quad (2.30)$$

L_n : La longueur de diffusion. Donnée par la relation suivante :

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.31)$$

On calcul le potentiel Ψ_s obéissant à l'égalité des equation(2.1) et (2.2).

Si : $\psi_S < Erreur = 10^{-6}$.

On calcul le potentiel ψ_S selon à l'équation (2.27). Donc, ψ_s et ϕ_s devrait vérifie le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \nabla 1 = \nabla 2 \\ J_t = 0 \end{cases}$$

2.3. Méthode d'optimisation utilisé

2.3.1. Introduction

Il existe deux types de méthode d'optimisation déterministes et non déterministes. Parmi les méthodes déterministe, on cite les méthodes la méthode du Gradient Conjugate, la méthode Quasi-Newton et la méthode de Marquardt levenberg. Cette dernière est utilisé dans notre travail car c'est une méthode de d'optimisation très robuste.

Formellement, une méthode déterministe calcule une fonction mathématique, une fonction ayant une valeur unique pour n'importe quelle entrée dans son ensemble de définition, la méthode produit cette valeur en sortie. Contrairement au cas des méthode déterministes dans les méthodes non déterministes on peut y'avoir plusieurs états initiaux et plusieurs valeurs en sortie avec la même erreur.

2.3.2. La méthode de Levenberg-Marquardt

La procédure de l'algorithme est itérative. On suppose un minimum, et qui constituera le vecteur p de départ.

Dans beaucoup de cas, un paramètre de départ « standard », tel que $P^T = (1, 1, \dots, 1)$ fonctionnera sans problème. Dans certains cas, il n'y a convergence que si le vecteur de départ n'est pas trop éloigné de la solution [13, 14, 15].

À chaque itération, on remplace p par une nouvelle estimation $p+q$. Afin de déterminer q les fonctions $f_i(p+q)$ sont approchées en étant linéarisées :

$$f(p+q) = f(p) + J_q \tag{2.32}$$

Où on a noté J la jacobienne de f en p .

à un minimum de la somme des carrés S , on a $\nabla_q S = 0$. En dérivant le carré de l'expression de droite [16], qui s'annule donc, et en posant $Y = f(p+q)$, on obtient [13, 16] :

$$(J^T J) q = J^T (Y - f(p)) \tag{2.33}$$

d'où l'on tire q en inversant $J^T J$. Dans l'inversion matricielle, tout va dépendre du rapport entre la valeur propre la plus grande en norme, et la valeur propre la plus petite, ce rapport, appelé conditionnement de matrice, va concrètement refléter la robustesse de l'algorithme face au bruit.

On s'est approché suffisamment d'un minimum, la procédure se termine et renvoie le paramètre p comme estimation de la solution [17].

L'utilisation de la méthode de Levenberg-Marquardt est une amélioration de la méthode classique de Gauss-Newton dans la résolution des problèmes de régression non-linéaire des moindres carrés, donné par l'équation (2.28) du chapitre 2 nécessite un bon estimé initiale proche de la solution. La méthode peut diverger Lorsqu'on introduit vecteur estimé loin de la solution. C'est la raison que dans nos calculs nous avons utilisé les paramètres obtenus par les fonctions auxiliaires.

2.4. Conclusion

Cette étude nous a permis de bien comprendre les phénomènes qui interviennent dans la conduction de la structure MIS. L'algorithme établi dans ce chapitre est utilisé pour étudier les différents effets des paramètres caractérisant la caractéristique courant-tension I-V et qui fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Introduction

Après avoir montrés 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 structures MIS. La méthode de levenberg est utilisé pour optimiser le système d'équation (2.27) pour calculer les deux paramètres ψ_s et ϕ_s intervenant dans le calcul du courant total.

3.2. Calcul et discussions des résultats

Le système d'équation (2.27) est utilisé pour déterminer la caractéristique courant-tension (I-V) des contacts MS pratiques. Dans le calcul, on suppose qu'à la surface arrière du dispositif, la vitesse de recombinaison S_n est égale à la vitesse thermique : $S_n = v_{th} = 10^7 \text{ cm/s}$. Les valeurs de χ_n et χ_p sont prises égale à 0.7 eV [18]. Le coefficient de diffusion D_n est déterminé à partir de la relation (2.29)[19].

avec : $D_0 = 35 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ et $A_0 = 1.8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

Pour le cas d'un semiconducteur silicium de type P. Nous avons utilisé pour déterminer la durée de vie des porteurs minoritaire τ_n , donné par la relation (2.30) [20].

La procédure de calcul du courant total d'obscurité est donnée par l'algorithme que montre la figure(3.1). En fait, La procédure consiste à considérer qu'à chaque tension de polarisation V appliquée aux bornes du dispositif, la différence de potentiel entre les deux quasi-niveau de Fermi dans le semiconducteur est prise initialement égale à zéro. Cette quantité est augmenté par un pas égale à $\Delta\phi_s \ll V$ à chaque fois qu'on constate que le courant total des porteurs minoritaire diminue. La valeur du potentiel ϕ_s considérée donc est celle qui correspond à la plus petite valeur du courant total des porteurs minoritaires qu'on peut attendre. A cette étape, on peut donc évaluer le courant total qui circule à travers la structure MIS.

Cet algorithme est utilisé pour étudier d'une part les effet des paramètres suivants sur la performance des contacts MIS pratiques :

ϕ_m :le travail de sortie du métal.

N_{ac} :la concentration du dopage du substrat.

D_{it} :la densité des états de surface à l'interface du contact MIS.

d_i :l'épaisseur de l'isolant.

Lorsqu'on varie l'un de ces paramètres, les autres seront maintenus fixes on prend ($\phi_m = 4.17eV$, $N_a = 2 \times 10^{15}cm^{-3}$, $D_{it} = 5 \times 10^{11}eV^{-1}cm^{-2}$, $d_i = 20A^0$ et $H = 250\mu m$).

Les valeurs des constantes effectives de Richardson sont discutées par RHoderick [9, 10] et prennent pour valeurs $A_n^* = 112A.cm^{-2}.K^{-2}$ et $A_p^* = 32A.cm^{-2}.K^{-2}$. D'autre part, on étudie également par cet algorithme l'état d'équilibre du dispositif. En effet, si le terme $q\phi_s$ représentant la différence ($E_{fn} - E_{fp}$) suit la variation de la tension de polarisation alors le système est en état d'équilibre et la condition donnée par l'équation(2.27) est satisfaite. Hormis ce cas, le système est hors d'état d'équilibre et le courant du aux porteurs minoritaire est non négligeable.

3.2.1. Effet de changement du travail de sortie

L'effet du choix des métaux avec différents travaux de sortie sur la caractéristique électrique I-V des structure MS réelles est montré sur la figure (3.1) . On peut aisément remarquer que pour ϕ_m inférieur à une certaine valeur ϕ_{mc} , la caractéristique électrique courant-tension (I-V) est semblable à celle d'une diode conventionnelle :

$$J = J_0 (e^{\beta V} - 1) \quad (3.1)$$

et au delà de cette valeur (i.e pour $\phi_m > \phi_{mc}$), l'expression précédent n'est plus applicable.

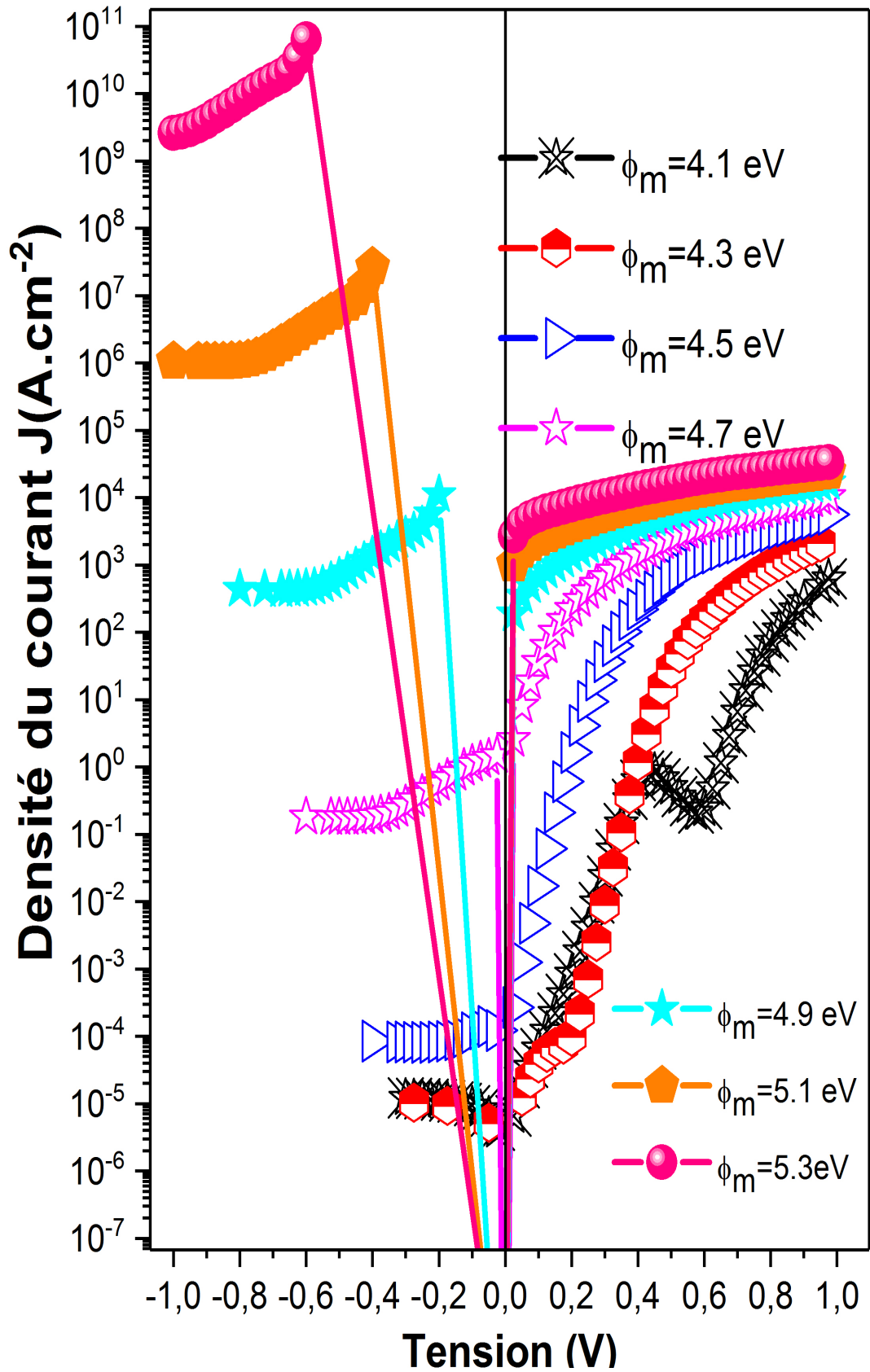


Figure 3.1 – La caractéristique électrique J-V sous la condition d’obscurité des contacts MIS pour différents travaux de sortie du métal.

Les figures (3.2) (a et b) montrent respectivement la variation du potentiel de surface et celle de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée V pour différentes valeurs de ϕ_m .

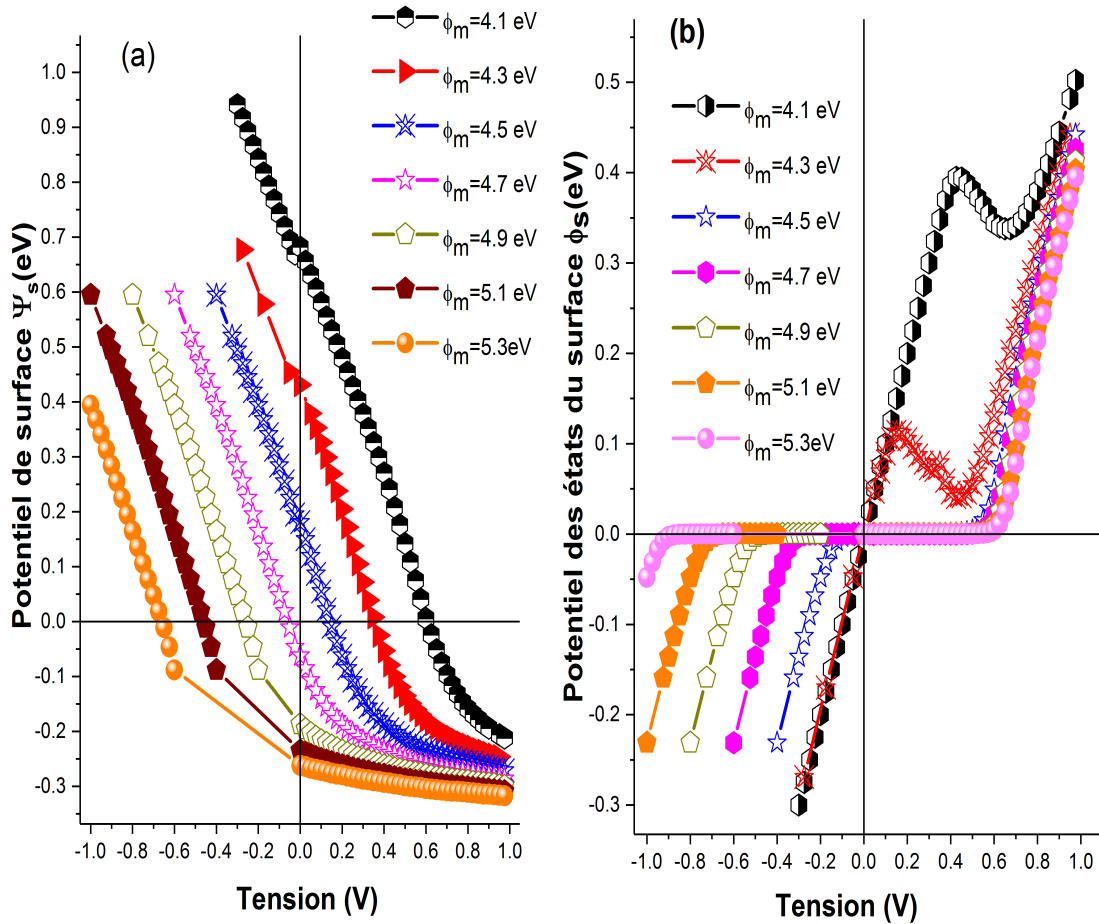


Figure 3.2 – (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différents travaux de sortie.

On remarque bien que pour les faibles valeurs de travail de sortie et où le potentiel de surface Ψ_s est positif, $q\phi_s$ suit la variation de la tension de polarisation V figure (3.2)(b). Cependant, pour les grandes valeurs de tension positif et où le potentiel de surface devient négative, ϕ_s ne suit plus la variation de la tension de polarisation. On constate aussi que pour les faibles valeurs de ϕ_m , le courant total est très faible car dans cette intervalle, la surface du semiconducteur est en régime d'inversion.

La valeur de ϕ_{mc} sera tout simplement obtenue en écrivant l'expression donnant la tension d'établissement du régime de bandes plates. Elle est donnée pour le cas d'un semiconducteur de type P et en présence des états de surface par[21] :

$$V_{FB} = - \left((\phi_m - \phi_{sc}) - \frac{Q_{ss}}{C_i} \right) \quad (3.2)$$

Selon cette dernière équation, pour avoir un dispositif à l'équilibre thermique en régime de déplétion, il faut donc choisir un matériau dont le travail de sortie $\phi_m < 4.8$ eV.

Dans la région où $\phi_m < 4.8$ eV, le semiconducteur est en régime de déplétion ou en régime de fort inversion ($\phi_m < 4.3$ eV). Le courant total dans cette région est dû essentiellement au courant de diffusion (compensant J_{dn}) pour les tensions de polarisation inverse et pour les basses tension positives. L'état du courant de la structure MIS est proche de l'équilibre et le courant total est d'autant plus faible que le dispositif est en régime de fort inversion. Dans ce cas, le courant total obéit à la relation donnée par l'équation(2.27) et le facteur d'idéalité dépend seulement de la composante J_{rg} .

Pour les grandes valeurs de tension de polarisation directe et où le potentiel de surface devient négatif, le courant dû aux états de surface est important. La condition d'équilibre est non satisfaite (figure 3.2b)) et la relation entre courant-tension est très compliquée.

Dans la région ($\phi_m > 4.8$ eV), le potentiel de surface diminue avec l'augmentation de ϕ_m . La concentration des électrons à la surface diminue, par contre, celle des trous augmente. La composante dominante du courant total est celle qui passe à travers les états d'interface J_{ps} ($\phi_m > \phi_{mc}$). Le courant tunnel dû aux porteurs majoritaire J_{pt} devient important seulement pour les très grandes valeurs de ϕ_m ($\phi_m \gg \phi_{mc}$). Le courant de diffusion J_{dn} est négligeable. Lorsque, le dispositif est hors d'état d'équilibre le courant qui passe à travers les états d'interface contrôle la performance de ces dispositifs dans cette région. L'expression de ce courant en fonction de la tension V est complexe. Il en résulte que la relation(3.1) est non satisfaite.

3.2.2. Effet de changement de la concentration de dopage N_a

L'effet de choix des différentes concentrations de dopage sur la caractéristique électrique I-V est schématisé sur la figure(3.3).

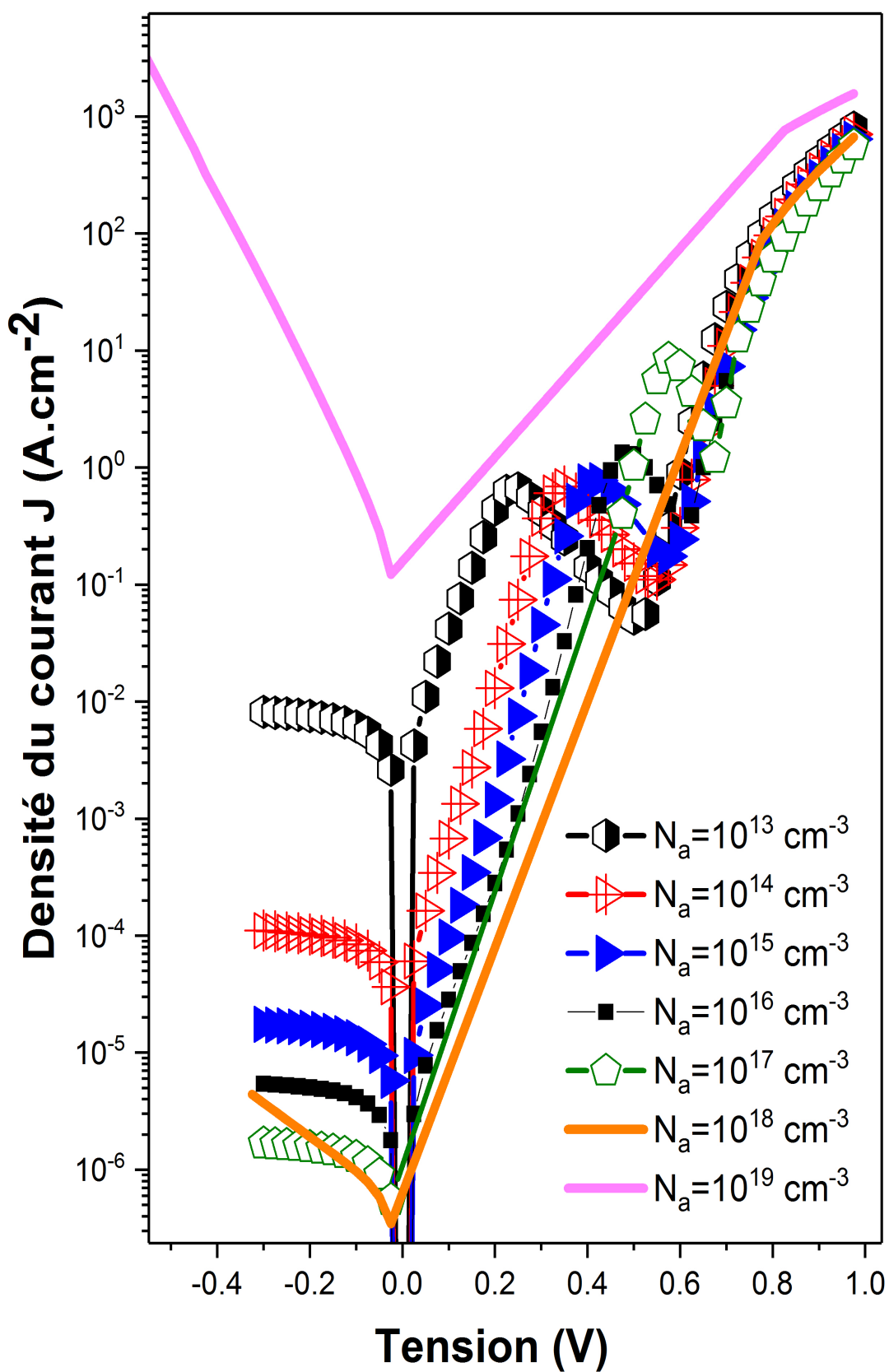


Figure 3.3 – La caractéristique électrique J-V sous la condition d’obscurité des contacts MIS pour différentes concentration de dopage.

Il est intéressant de remarquer qu'il existe une densité N_{ac} qu'on appelle concentration critique au delà de laquelle la relation entre courant tension I-V n'obéit pas à celle donnée par l'équation(3.1) (celle d'une diode idéale). la valeur de N_{ac} ainsi obtenue est autour de $10^{17} cm^{-3}$. Au dessus de cette valeur la caractéristique I-V est très complexe.

Pour $N_a < N_{ac}$, la différence d'énergie entre les deux quasi-niveau de Fermi des électrons et des trous varie avec la tension appliquée V et le potentiel de surface Ψ_s augmente lorsque N_a diminue (voir aussi figure3.4 (a) et (b)). Ceci est équivalent au système proche de l'état d'équilibre. Le courant total est dû principalement aux courants de diffusion J_{dn} dans l'intervalle des tensions négatives, les courants de diffusion J_{dn} et de génération recombinaison J_{rg} dominant le courant total. Le courant tunnel des états de surface est négligeable dans cette région.

Cependant, pour $N_a > N_{ac}$, le système est loin d'être en état d'équilibre est la différence d'énergie $q\phi_s$ ne suit pas la variation de la tension V appliquée au bornes du dispositif surtout lorsque $N_a \gg N_{ac}$. La variation du potentiel de surface Ψ_s en fonction de la tension de polarisation devient insignifiante figure(3.3) et la chute de tension se produit presque entièrement à travers la couche d'isolant. La surface du semiconducteur ne peut pas atteindre le régime d'inversion. Elle se trouve en régime de déplétion avec une grande concentration des trous et une faible concentration des électrons.

Il en résulte que la composante J_{pt} domine dans la gamme des tensions négatives et les composants J_{ps} et J_{pt} dans l'intervalle des tensions positives. Les densités du courants de diffusion J_{dn} et celle de génération recombinaison J_{rg} sont négligeable et la caractéristique électrique I-V ne peut pas être déterminer par l'équation(3.1).

3.2.3. Effet de changement de la densité des états d'interface

La figure(3.5) montre la caractéristique I-V des contacts MS réelle pour différentes valeurs de densités d'états d'interface D_{it} . On peut observer l'existence de deux régions ($D_{it} < 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$ et $D_{it} \gg 10^{12} eV^{-1} cm^{-2}$).

En fait, l'effet de la la densité des états de surface sur le comportement de la caractéristique électrique I-V dépend du choix des autres paramètres tels que ϕ_m , N_a et d_i . En choisissant les valeurs optimales de ces paramètres, le semiconducteur peut atteindre le

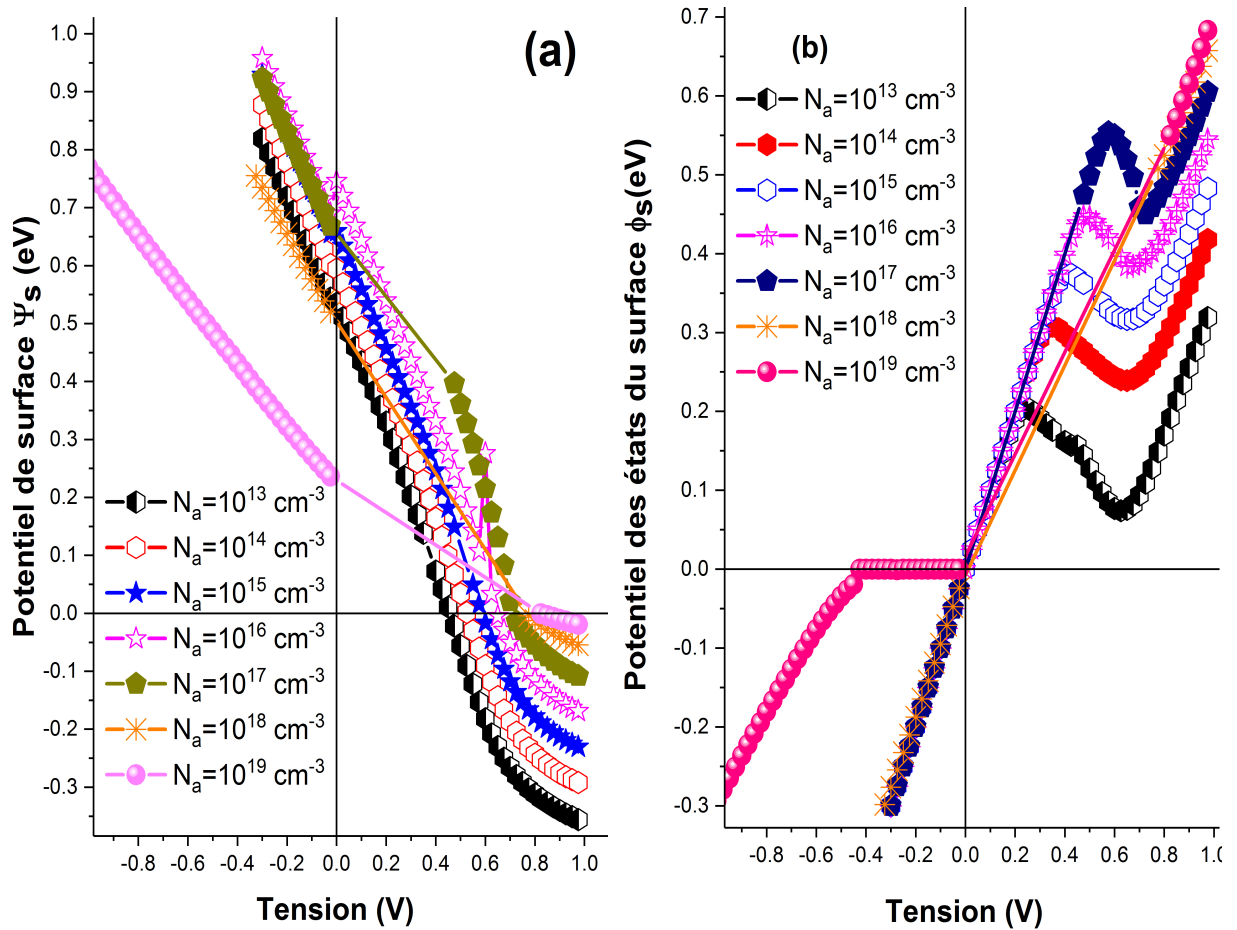


Figure 3.4 – (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différentes concentration de dopage.

régime de déplétion ou d'inversion et par conséquent ϕ_s suit la variation de V figure(3.6 (a) et (b)). Dans ce cas, le courant tunnel des porteurs majoritaire J_{pt} est dominant. Par contre, le courant des états de surface J_{ps} est négligeable. La caractéristique électrique I-V peut être représenter par l'équation(3.3).

En augmentant D_{it} ($D_{it} > 10^{11} \text{ cm}^{-3}$), la courbure des bandes diminue figure(3.5) (d). Ceci conduit à une augmentation de la chute de tension à travers la couche d'isolant. Il en résulte que le courant des états de surface J_{ps} augmente. Par contre, celui dû aux porteurs minoritaires J_{nt} diminue.

Lorsque D_{it} dépasse un certain niveau ($D_{it} > 6 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), le dispositif est s'éloigne de l'état d'équilibre figure(3.5) (d). Ceci étant principalement dû à l'augmentation considérable du courant des états de surface J_{ps} et du courant tunnel J_{pt} . Suite à cet effet, la concentration des porteurs majoritaire est grande et le potentiel de surface Ψ_s diminue avec l'augmentation de le densité des états de surface.

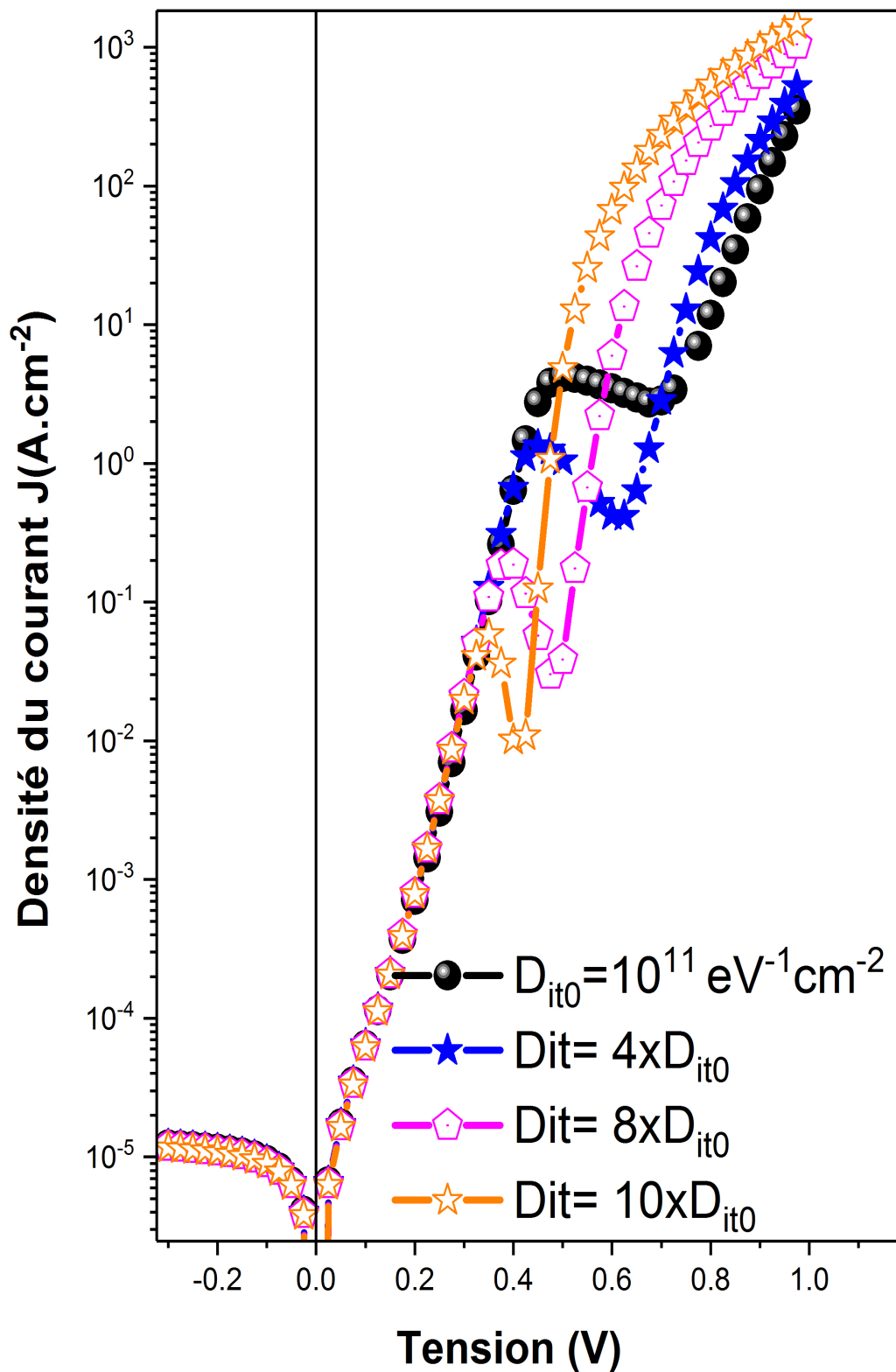


Figure 3.5 – La caractéristique électrique J-V sous la condition d'obscurité des contacts MIS pour différentes concentration de d'états d'interface.

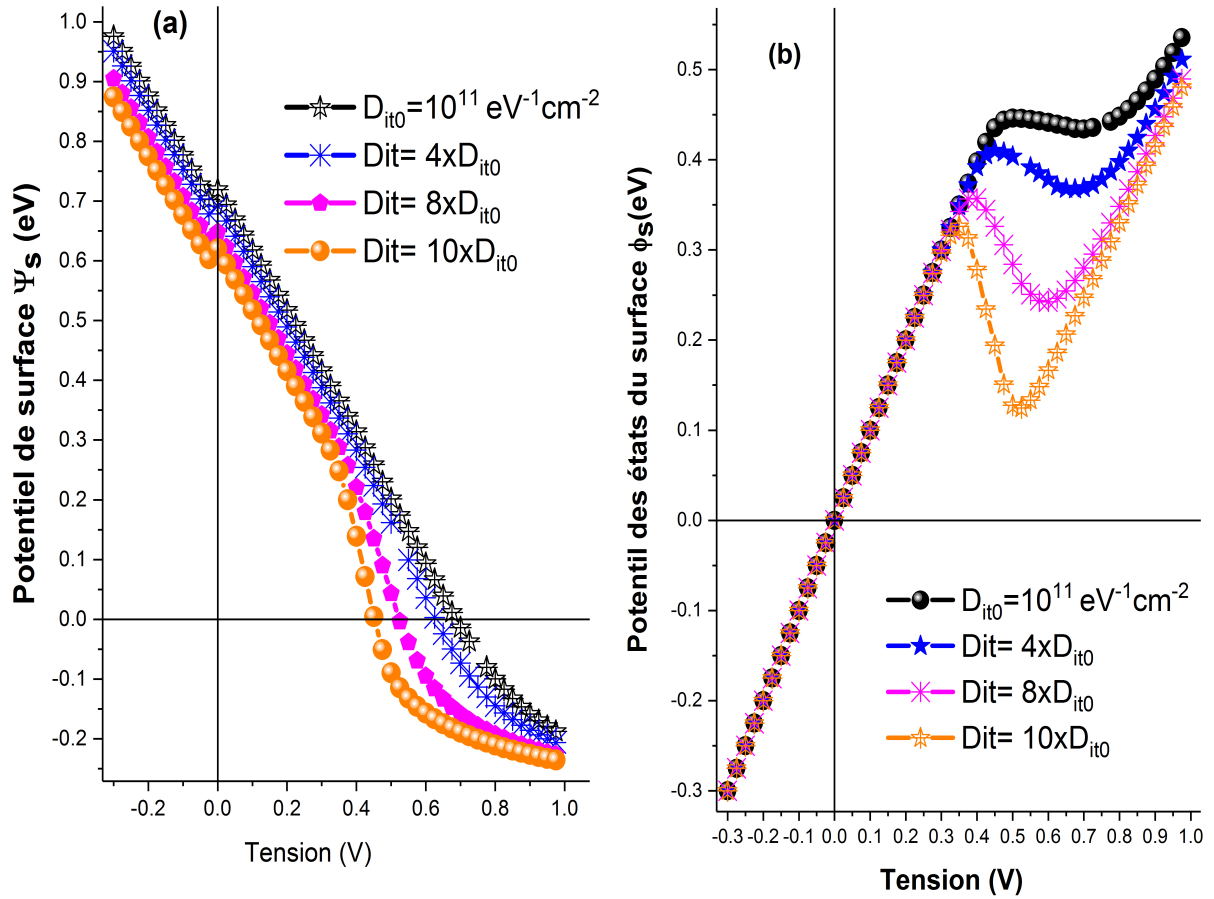


Figure 3.6 – (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation de la différence d'énergie $q\phi_s$ en fonction de la tension appliquée pour différentes concentration de densité d'états de surface.

3.2.4. Effet de changement de l'épaisseur de l'interface d_i

L'épaisseur de l'interface est un paramètre très important qui peut affecter la caractéristique électrique I-V des structures MIS. Son effet dépend lui aussi du choix des autres paramètres : ϕ_m , N_a et D_{it} . Par exemple les figures(3.7 (a) et (b)) montrent la caractéristique électrique I-V pour différentes valeurs travail de sortie ($\phi_m = 4.1 \text{ eV}$, $\phi_m = 4.9 \text{ eV}$).

Si les autres paramètres sont choisis de telle sorte que le dispositif est un dispositif à porteurs minoritaires figures(3.8 (b) et (c)) et figures(3.9 (b) et (c)), alors, pour les faibles valeurs de d_i , la chute de tension se produit presque entièrement à travers la région de déplétion du semiconducteur et la différence d'énergie ϕ_s est égale à la tension V figure(3.7).

Le potentiel de surface ψ_s varie avec la tension de polarisation V . Les composantes

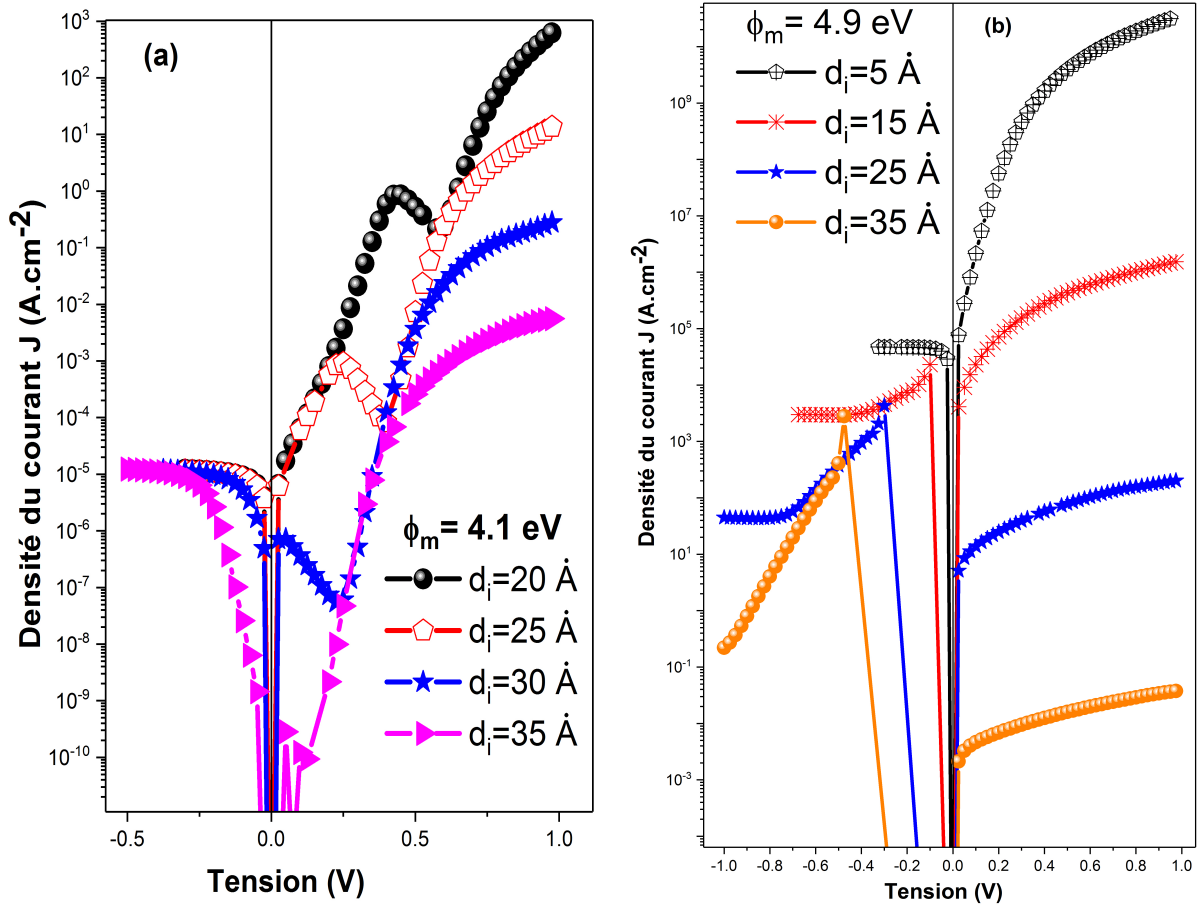


Figure 3.7 – (a) Caractéristique J-V pour le cas $\phi_m = 4.1 \text{ eV}$, (b) Caractéristique J-V pour le cas $\phi_m = 4.9 \text{ eV}$

principales du courant total sont : La composante J_{rg} (pour les grandes tensions inverse et les faibles tensions positives) et la composante J_{dn} (pour les grandes tensions positives). Le courant des états de surface J_{ps} est assez important mais faible en comparaison avec J_{dn} .

En augmentant l'épaisseur de la couche d'isolant d_i , le courant des états de surface des porteurs majoritaires J_{ns} augmente considérablement et ϕ_s devient plus faible que la tension V . Par conséquent, le système s'éloigne de l'état. la chute de tension à travers la couche d'interface augmente. Le courant dû aux états de surface a un effet très important jusqu'à ce que le courant des porteurs majoritaire J_{pt} domine pour les grandes valeurs de tensions positives.

Cependant, si le dispositif est un dispositif à porteurs majoritaires figure(3.9) (b). Le système est hors de l'état d'équilibre quelle que soit la polarisation positive ou négative figure(3.9) (c). Dans ce cas, l'effet de l'augmentation de l'épaisseur devient significatif

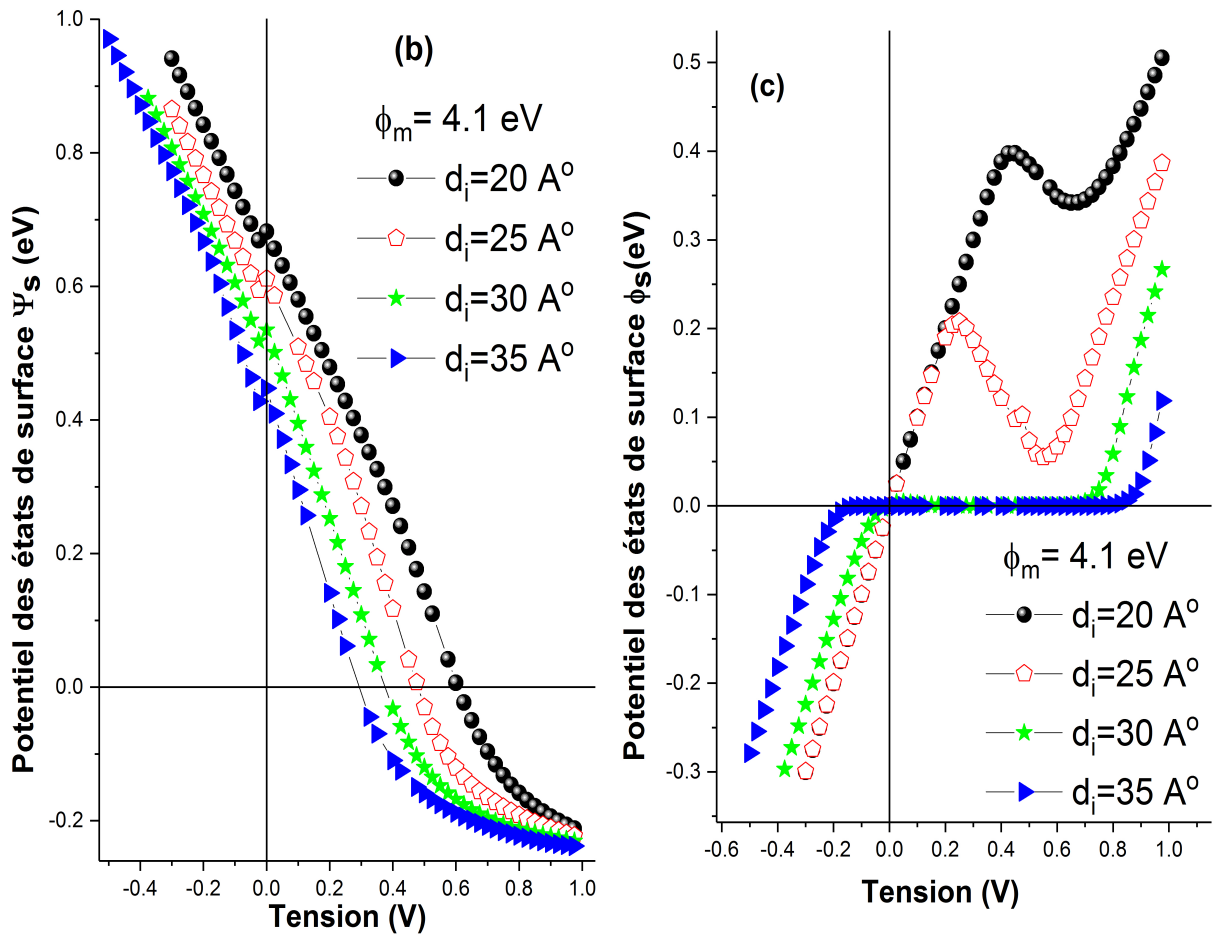


Figure 3.8 – (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation du potentiel ϕ_s en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'épaisseur pour le cas $\phi_m = 4.1$ eV) .

pour les différentes conditions de polarisation.

En augmentation l'épaisseur de l'interface, le courant total J_t en inverse augmente. Ceci est dû au fait que dans cet intervalle de tension inverse, le courant des porteurs minoritaire J_{nt} domine l'ensemble des mécanismes de transport des charges dans ces structures. Par contre, dans l'intervalle des tensions positives, le courant total suite à l'augmentation du courant des états de surface des porteurs majoritaires J_{ps} .

3.3. Conclusion

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

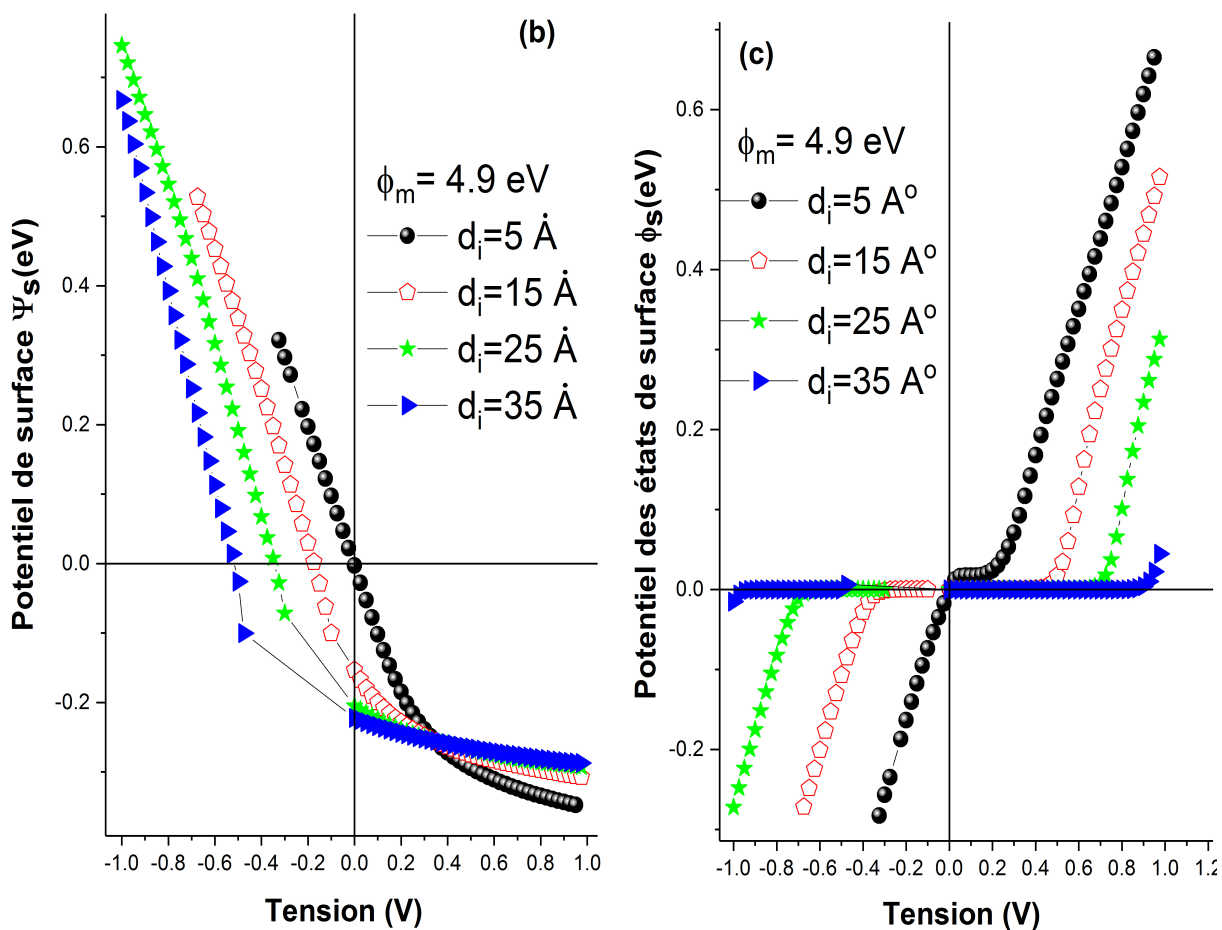


Figure 3.9 – (a) Variation du potentiel de surface et (b) Variation du potentiel ϕ_s en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs d'épaisseur pour le cas $\phi_m = 4.9$ eV) .

fonction de la tension V.

CONCLUSION GÉNÉRALE

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

- Le diagramme de bande d'énergie de la structure Métal-Isolant-Semiconducteur (MIS) dont l'épaisseur de l'interface n'excède pas 50 \AA , les mécanismes de conductions qui peuvent intervenir lorsque se composant est 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 cité variera.

Notre contribution à l'étude des structures MIS réside dans le modèle théorique utilisé pour étudier les effets des différents paramètres caractérisant la caractéristique

courant-tension (I-V). Afin de parvenir de tirer des conclusion définitives sur la validité de ce modèle il est important de comparer avec d'autres modèles qui existent dans la littérature.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Farid Bourouba. *Modelisation et Simulation des Contacts Metal-Semiconducteur A Barriere Inhomogene*. PhD thesis, 2015.
- [2] Charles Kittel. *Introduction à la physique de l'état solide : maîtrise de physique*. 1972.
- [3] Marie-Thérèse Saliba, NAIM OUAINI, Jacques Ginestié, and Pierre Nonnon. Tic et enseignement de la chimie : au-delà des discours, quels dispositifs d'enseignement pour quels apprentissages. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 6(2) :17–40, 2012.
- [4] Osamu Tabata, Ken Kawahata, Susumu Sugiyama, and Isemi Igarashi. Mechanical property measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes. *Sensors and actuators*, 20(1-2) :135–141, 1989.
- [5] P Viktorovitch. Passivation des semiconducteurs iii-v. *Revue de Physique Appliquée*, 25(9) :895–914, 1990.
- [6] J Joseph, A Mahdjoub, and Y Robach. Propriétés électriques des structures mis sur inp passivé par un oxyde. *Revue de physique appliquée*, 24(2) :189–194, 1989.
- [7] Toumi Sihem. *Etudes Des Composants Electroniques (Cellules Solaires, Diodes Schottky) en Utilisant Les Algorithmes Genetioues et le Langage vhdl ams*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.

- [8] Simon M Sze and Kwok K Ng. *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons, 2006.
- [9] P Blood. Capacitance-voltage profiling and the characterisation of iii-v semiconductors using electrolyte barriers. *Semiconductor Science and technology*, 1(1) :7, 1986.
- [10] LJ Brillson. The structure and properties of metal-semiconductor interfaces. *Surface Science Reports*, 2(2) :123–326, 1982.
- [11] Ajeet Rohatgi and P Rai-Choudhury. Design, fabrication, and analysis of 17-18-percent efficient surface-passivated silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(5) :596–601, 1984.
- [12] AG O’Neill. An explanation of the asymmetry in electron and hole tunnel currents through ultra-thin sio2 films. *Solid-state electronics*, 29(3) :305–310, 1986.
- [13] Donald W Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2) :431–441, 1963.
- [14] Manolis IA Lourakis. A brief description of the levenberg-marquardt algorithm implemented by levmar. *Foundation of Research and Technology*, 4(1) :1–6, 2005.
- [15] Kaj Madsen, Hans Bruun Nielsen, and Ole Tingleff. *Methods for non-linear least squares problems*. 1999.
- [16] Kenneth Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2) :164–168, 1944.
- [17] N Rouag, Z Ouennoughi, M Rommel, K Murakami, and Lothar Frey. Current conduction mechanism of mis devices using multidimensional minimization system program. *Microelectronics Reliability*, 55(7) :1028–1034, 2015.
- [18] AG O’Neill. An explanation of the asymmetry in electron and hole tunnel currents through ultra-thin sio2 films. *Solid-state electronics*, 29(3) :305–310, 1986.
- [19] 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.

- [20] Luigi Passari and Enrichetta Susi. Recombination mechanisms and doping density in silicon. *Journal of applied physics*, 54(7) :3935–3937, 1983.
- [21] Manel Bouhouche. Contribution à l'étude du transistor bipolaire à hétérojonction tbh pour les applications hautes fréquences. 1958.