



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique

Option : Microélectronique et hyperfréquence

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Caractéristiques électriques d'une diode à barrière de Schottky (SBD) avec et sans couche isolante SiO₂ à la température ambiante (300K)

Présenté par :

GHACHAME Samah

Soutenu le : 04 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Ghedbane Hatem

Maître de Conférences A

Président

SAADOUE Achour

Maître de Conférences B

Encadreur

TERGHINI Ouarda

Maitre-assistant A

Examineur

Année universitaire : 2013/2014

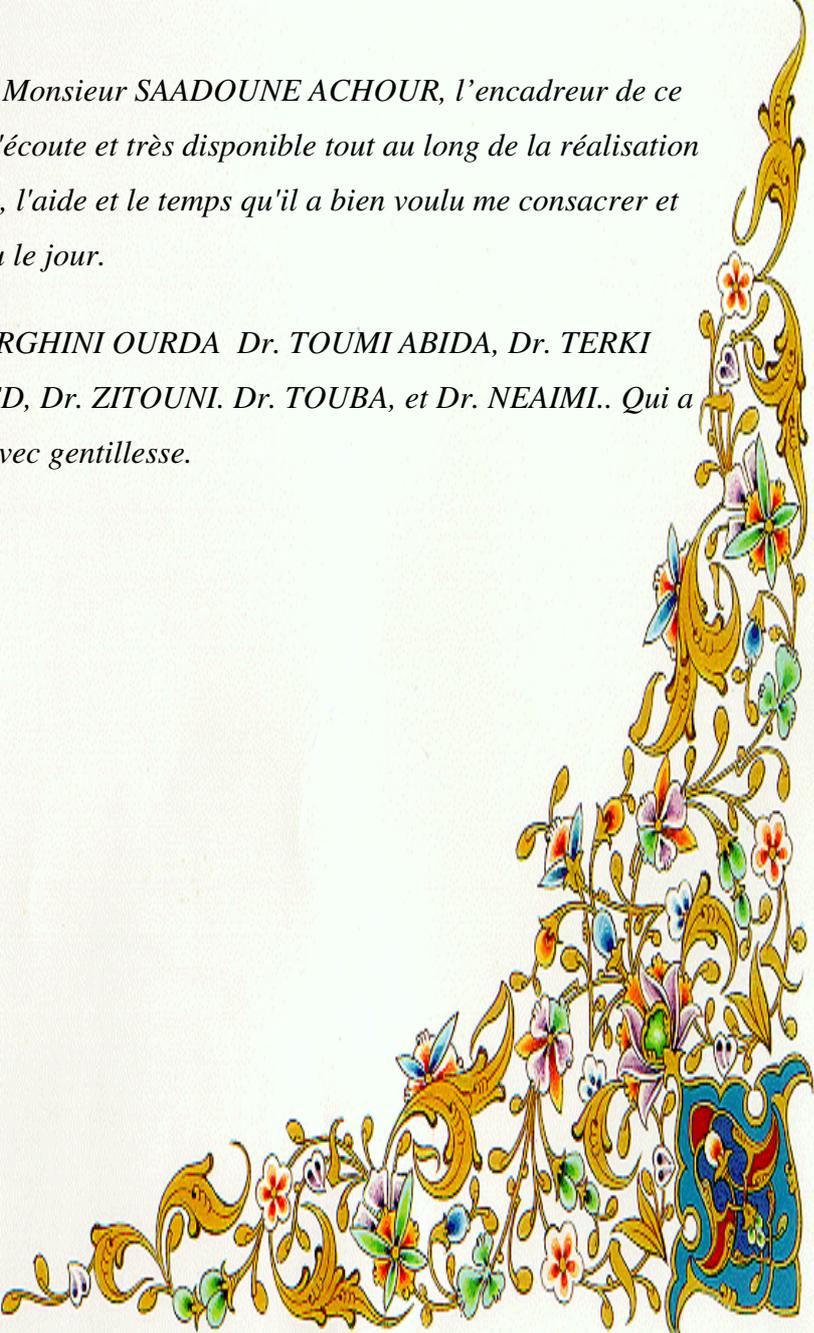


REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur SAADOUNE ACHOUR, l'encadreur de ce mémoire, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

J'exprime ma gratitude à Dr. TERGHINI OURDA Dr. TOUMI ABIDA, Dr. TERKI NADJIBA, Dr. BAKHOUCHE KHALED, Dr. ZITOUNI. Dr. TOUBA, et Dr. NEAIMI.. Qui a accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Merci à tous et à toutes.





Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

" Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère Louisa

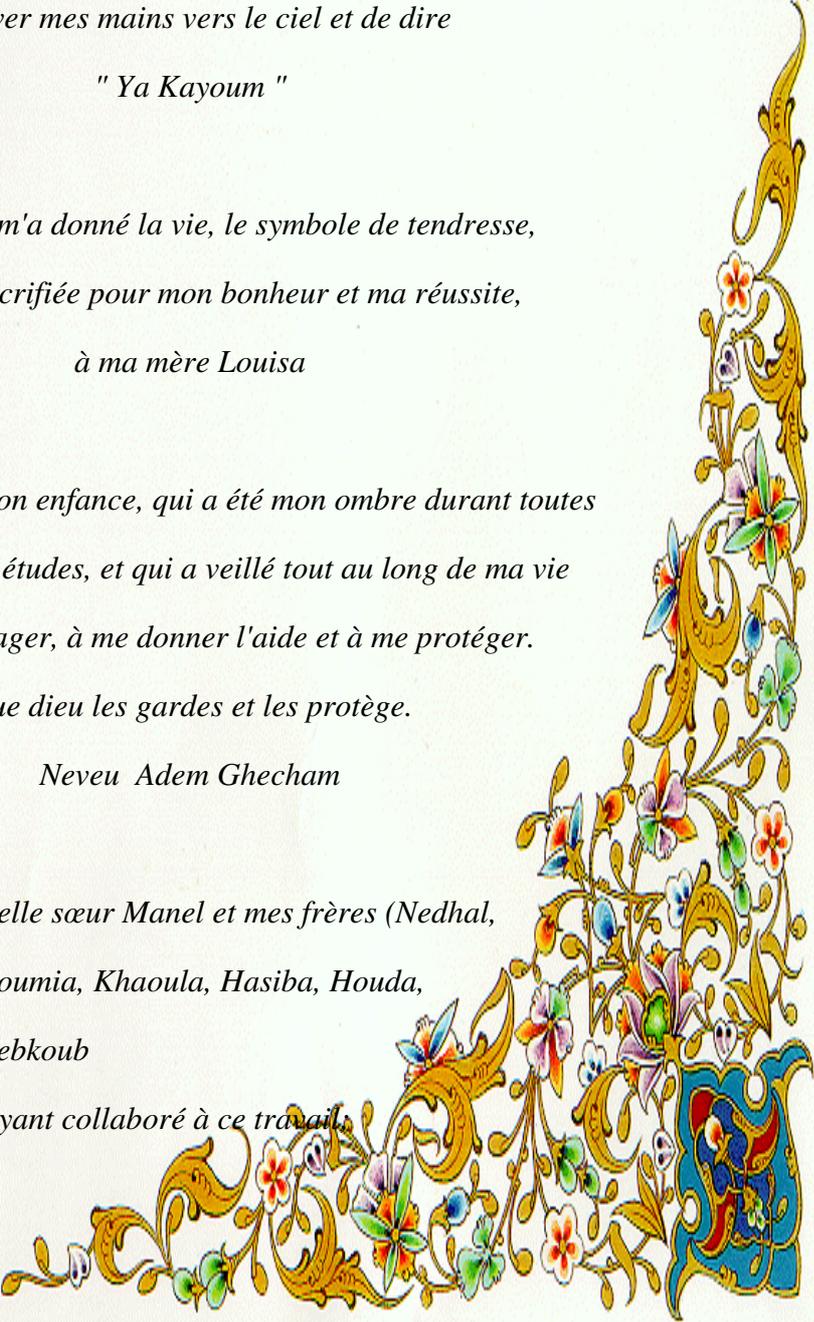
A mon père Nour El Dinne, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

Neveu Adem Ghecham

A mes Sœurs (Rodina, Khensa) et ma belle sœur Manel et mes frères (Nedhal, Iheb, Yasser, et Racim) et mes amis (Soumia, Khaoula, Hasiba, Houda, Nachda, Warda), et ma cousin Lotfi Kebkoub

mes proches et à toute personne ayant collaboré à ce travail.



Résumé

L'objectif du présent travail est la modélisation et simulation par le simulateur SILVACO ATLAS TCAD (Technology computer Aided Design) les propriétés électriques courant-tension et capacité-tension d'une diode à barrière de Schottky (SBD) formée sur l'arséniure de gallium de type n (n-GaAs) en vue d'une étude comparative d'une diode sans et avec couche d'isolons (SiO₂) à température ambiante [300 K]. On utilise la caractéristique courant-tension pour extraire les principaux paramètres qui caractérisent la diode Schottky tel que le facteur d'idéalité, la hauteur de la barrière, le courant de saturation, la résistance série.

Table des Matières

Dédicace	i
Remerciement	ii
Résumé	iii
Tables des matières.	iv
Introduction générale	2

Chapitre I : Concepts théoriques sur le contact MS et le contact MIS

I.1	Introduction	4
I.2	Affinité électronique d'un semi conducteurs et travail de sortie d'un métal	4
I.3	Formation de la barrière Schottky	5
I.4	<i>Jonction métal-semiconducteur</i>	6
I.4.1	<i>Cas d'un métal avec un semiconducteur dopé N</i>	7
I.4.1.a	<i>Cas où $\Phi_m = \Phi_s$</i>	7
I.4.1.b	<i>Cas où $\Phi_m > \Phi_s$. À l'équilibre</i>	8
I.4.1.c	<i>Cas où $\Phi_m > \Phi_s$ sous polarisation</i>	9
I.4.1.d	<i>Cas où $\Phi_m < \Phi_s$. à l'équilibre</i>	9
I.4.1.e	<i>Cas où $\Phi_m < \Phi_s$. Sous polarisation</i>	10
I.4.1.f	Cas d'un métal avec un semiconducteur dopé P	11
I.4.1.g	Semiconducteur de type p sous polarisation	12
I.5	Zone de charge d'espace	12
I.6	Capacité	14
I.7	Caractéristique courant-tension	15
I.8	<i>Jonction Métal-oxyde-semiconducteur</i>	16
I.8.1	<i>Jonction à l'équilibre</i>	16
I.8.2	<i>Jonction polarisée</i>	17
I.8.2.a	<i>Pour une tension de grille VG positive</i>	17
I.8.2.b	<i>Pour une tension de grille VG négative</i>	18
I.9	L'Arséniure de Gallium (GaAs)	20
I.9.1	Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)	20
I.9.2	Propriétés électriques et physiques du GaAs	20

I.9.3	Avantages et inconvénients du GaAs	21
I.10	Conclusion	22

Chapitre II : Logiciel de simulation et méthode d'extraction des paramètres

I.1	Introduction	24
I.2	Le rôle de la simulation	24
I.3	Présentation du logiciel SILVACO	24
I.4	La VWF: (virtual wafer Fab)	24
I.4.1	ATHENA	25
II.4.2	ATLAS	25
II.4.3	Deckbuild	26
II.4.4	Tonyplot	27
II.5	La simulation des composants semi-conducteurs	28
II.6	Structure de fichier d'entrée	28
II.7	Spécification de la structure étudiée	29
II.7.1	Maillage	29
II.7.2	Régions	30
II.7.3	Electrodes	31
II.7.4	Dopage	32
II.7.5	Spécification du modèle et du matériau	33
II.7.5.a	Matériau	33
II.7.5.b	Modèles	33
II.7.5.c	Contact	36
II.7.5.d	Interface	37
II.8	Méthodes numérique à sélectionner	37
II.9	Spécification de Solution	38
II.9.a	Log	38
II.9.b	Solve (<i>Résoudre</i>)	38
II.9.c	Load et Save (<i>chargement et sauvegarde</i>)	39
II.10	Analyse des résultats	39
II.11	Méthode de Moindre Carré	39
II.11.1	Introduction	39

II.11.2	METHODES DE CALCUL	40
II.12	Conclusion	42

Chapitre II : Résultats et Discussions

III.1	Introduction	44
III.2	La structures de diode M/S et MIS	
III.3	Paramètres de simulation	
III.4	La différence entre métal/semiconducteur et métal/isolant/semiconducteur	
III.5	les caractéristiques courant-tension (I-V)	
III.6	Extraction des paramètres par la méthode moindre carrée	
III.6.1	L'effet d'épaisseur d'isolant sur courant de saturation I_s [A]	
III.6.2	L'effet d'épaisseur d'isolant sur facteur d'idéalité n	
III.6.3	L'effet d'épaisseur d'isolant sur Barrière de potentiel	
III.6.4	L'effet d'épaisseur d'isolant sur Résistance série	
III.6.5	L'effet d'épaisseur d'isolant sur tension de seuil	
III.7	Les caractéristiques capacité-tension (C-V)	
III.8	Conclusion	
	Conclusion Générale	

Tableaux des figures

Figure I.1: Définition du travail de sortie et de l'affinité électronique dans un semiconducteur	5
Figure I.2: Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique d'une structure	6
Figure I.3: Contact métal-semiconducteur avec $\phi_m = \phi_s$	7
Figure I.4: Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m > \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique	8
Figure I.5 : Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m > \phi_s$ sous polarisation	9
Figure I.6: Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m < \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique	10
Figure I.7 : Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ sous polarisation	11
Figure I.8: Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique	11
Figure I.9 : Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ sous polarisation	12
Figure I.10: Intégrations successives de la densité de charge dans une diode Schottky de type	14
Figure I.11 : Variation de la capacité avec la tension	15
Figure I.12: Relation courant-tension	16
Figure I.13: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N a thermodynamique	17
Figure I.14: Bande d'énergie de métal isolant Sc type P a thermodynamique	17
Figure I.15: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N $\Phi_m < \Phi_s$ sous polarisée	19
Figure I.16: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N $\Phi_m > \Phi_s$ sous polarisée	19
Figure I.17. Structure Cristalline du GaAs	20

Figure II.1 : Le rôle de simulation	24
Figure II.2 : les entres et les sorties de Atlas	26
Figure. II.3 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution	26
Figure. II.4 : L'environnement Tonyplot	27
Figure II.5 : Groupes de commandes	28
Figure II.6 : Maillage à deux dimensions (x,y)	29
Figure II.7 : Définition des régions	30
Figures II.8 : Les régions et les matériaux	31
Figure II.9 : Définition des électrodes	32
Figure II.10 : Types de dopage	32
Figure. II.11 : Mécanisme de recombinaison SRH	34
Figure II.12: représentation locale du taux de production de tunnel du modèle de tunnel Schottky universel	35
Figure II.13: Affichage graphique des résultats par « TonyPlot »	38

Figure III-1 : Diode Schottky Au/n-GaAs.	43
Figure.III.2 : Résultat de simulation de la caractéristique courant-tension de diode Scottky MS.	44
Figure III.3 : Résultat de simulation de la caractéristique courant-tension pour différents épaisseursde SiO2.	45
Figure III.4 :Effet de l'apaisseur d'isolant sur courant pour tension fixe.	45
Figure III.5 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur le courant de saturation I_s .	47
Figure III.6 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur facteur d'idéalité n. Le facteur d'idéalité n augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant SiO2.	47
Figure III.7 : Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la barrière de potentiel Φ_{bi}	48
Figure III.8 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur résistance série	48
Figure III.9 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur tension de seuil.	49
Figure III.10 : La caractéristique capacité-tension(C-V).	50

Tableaux des abréviations

Tableaux des abréviations

Φ_{b0}	barrière de potentiel de la diode Schottky à $V=0V$ (SBH)
Φ_m	travail de sortie du métal
$e\chi$	affinité électronique
E_C	énergie de la bande de conduction
E_F	énergie du niveau de Fermi
E_g	Energie de gab
A^*	constante de Richardson de l'émission thermoïonique
T	température
m^*	masse effective de l'électron
h	constante de Planck
V	tension appliquée
ϵ	permittivité électrique du semiconducteur.
I_s	Courant de saturation.
n_i	concentration des porteurs intrinsèques
Φ_s	Travail de sortie de semiconducteur
K	constante de Boltzmann
A	surface de la diode
R_s	résistance série
n	facteur d'idéalité
W	Zone de charge.
C	Capacité

Introduction Générale

Une diode Schottky (nommée d'après le physicien allemand Walter H. Schottky) est une diode qui a un seuil de tension directe très bas et un temps de commutation très rapide. Ceci permet la détection des signaux HF faibles et hyperfréquences, la rendant utile par exemple en radioastronomie [1].

L'objectif du présent travail est la modélisation et simulation par le simulateur SILVACO ATLAS TCAD (Technology computer Aided Design) de l'effet de l'isolateur (oxyde) sur les propriétés électriques courant-tension et capacité-tension d'une diode à barrière de Schottky (SBD) formée sur l'arséniure de gallium de type n (n-GaAs). Extraction des principaux paramètres qui caractérisent la diode Schottky tel que, le facteur d'idéalité, la hauteur de la barrière, la résistance série et le courant de saturation.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons rappelé concepts théoriques sur le contact MS et le contact MIS.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté le logiciel Silvaco utilisé dans notre simulation des propriétés électriques courant-tension et capacité-tension, nous avons présenté aussi la méthode des moindres carrés utilisé pour extraire les paramètres essentielles.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de notre simulation avec discussions.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

I.1 Introduction

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

Un dispositif unipolaire signifie qu'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 M/Sc produit une caractéristique courant-tension ($I-V$) non symétrique, la structure se comporte comme un redresseur: c'est une diode Schottky [2].

La structure Métal-Oxyde-Semiconducteur (également appelée capacité MOS ou Structure MIS) est un autre exemple d' hétérostructure. Nous reviendrons sur les caractéristiques essentielles d'une telle structure [3].

I.2 Affinité électronique d'un semi conducteurs et travail de sortie d'un métal

Pour comprendre le fonctionnement des jonctions métal semi conducteur, on devra comparer la valeur :

Du travail d'extraction du métal ($e.\phi_m$) qui représente l'énergie à fournir à un électron de conduction d'un métal pour qu'il quitte l'influence de ce métal et se retrouve dans le vide sans énergie cinétique.

De l'affinité électronique du semi-conducteur qui représente l'énergie à fournir à un électron du bas de la bande de conduction pour l'extraire du semi-conducteur et le placer dans le vide. C'est une caractéristique du matériau.

Du travail de sortie du semiconducteur qui représente l'énergie à fournir à un électron du semiconducteur pour qu'il passe du niveau de Fermi au vide sans énergie cinétique. Cette caractéristique dépend du matériau (affinité électronique) et du dopage (position de E_F). Le tableau suivant donne quelques exemples de travaux de sortie et d'affinités électroniques pour quelques matériaux usuels [4].

Tableau. I.1: Définition du travail de sortie et de l'affinité électronique dans un semiconducteur [4].

Métal	Travail de sortie ϕ_m (eV)	Semiconducteur	Affinité χ (eV)
Fe	4,4	Si	4,01
Al	4,1	Ge	4,13
Cu	4,4	GaP	4,3
Ag	4,3	GaAs	4,07
Au	4,8	InAs	4,9
Pt	5,3	ZnS	3,9

I.3 Formation de la barrière Schottky

Lorsque les deux matériaux sont mis en contact, et quand le travail de sortie du semiconducteur est inférieur à celui du métal ($q\Phi_M < q\Phi_S$), les électrons passent du semiconducteur vers le métal. Il apparaît dans le semiconducteur une charge d'espace positive et le niveau de Fermi s'éloigne de EC et se rapproche donc de EV au voisinage de la jonction. Cette charge positive est compensée à la surface du métal par une charge négative. Du fait de la très forte concentration électronique dans le métal, l'extension de la zone de charge d'espace coté métal s'effectue sur une fraction de monocouche atomique. Le régime d'équilibre est alors défini par l'alignement des niveaux de Fermi des deux matériaux. Le diagramme énergétique du contact métal/semiconducteur (type n) à l'équilibre thermodynamique est représenté à la figure (I.1).

Dans le cas idéal d'absence d'états d'interfaces, ce contact crée une discontinuité de potentiel en surface appelée barrière de potentiel $q\Phi_b$, qui est donnée en règle générale par la différence du travail de sortie du métal et de l'affinité électronique du semiconducteur :

$$q\Phi_b = q(\Phi_M - \Phi_S) \quad (I.1)$$

Il est clair que la création d'une barrière d'énergie va limiter la conduction à travers la structure métal/semiconducteur. Un effet diode peut être attendu [5].

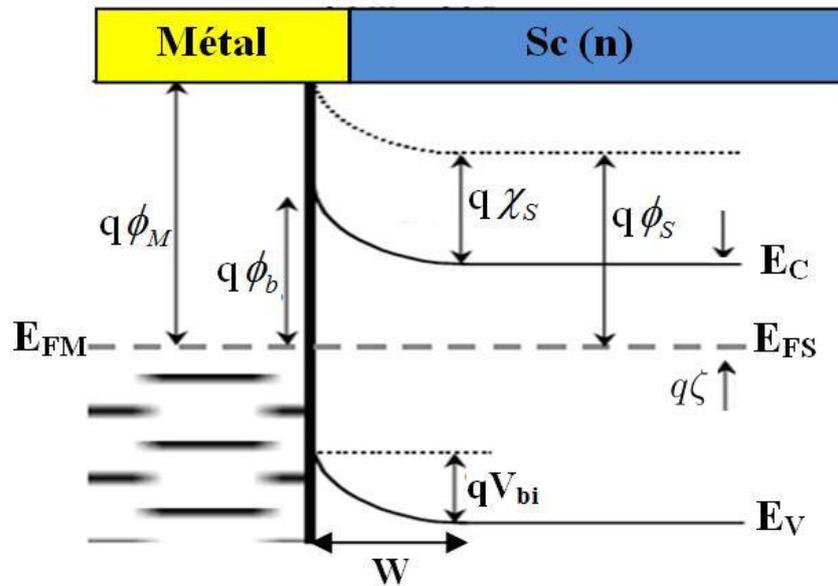


Figure I.1: Diagramme des bandes d'énergie à l'équilibre thermodynamique d'une structure M/Sc [5].

1.4 Jonction métal-semiconducteur

Remarques générales sur l'association de matériaux différents.

Cas 1 : Tant que les deux matériaux sont séparés (sans influence l'un sur l'autre), les niveaux de Fermi dans chacun d'entre deux sont horizontaux, mais à priori différents car il n'y a pas de référence commune. Si les matériaux sont électriquement neutres, seule l'énergie d'un électron dans le vide sans énergie cinétique est commune.

Cas 2 : Une fois les matériaux au contact, le niveau de Fermi sera le même et constant dans chacun d'eux, tant que le système n'est pas soumis à un champ électrique extérieur. C'est alors le niveau du vide qui ne sera plus constant et qui évoluera dans l'espace en fonction des redistributions de charges, notamment au voisinage des interfaces. Lors de la mise en contact des deux matériaux, l'élément qui a vu son niveau de Fermi décalé vers le haut recevra des électrons alors que l'autre en perdra [4].

I.4.1 Cas d'un métal avec un semiconducteur dopé N

On considère un métal initialement placé suffisamment loin d'un matériau semi-conducteur dopé N. On appelle $e\Phi_m$ l'énergie nécessaire pour arracher un électron du métal, du haut du niveau défini par la distribution de Fermi, pour le placer dans le vide sans énergie cinétique. On appelle de même $e\Phi_s$ l'énergie nécessaire pour arracher un électron, du niveau de Fermi, à l'influence de son atome dans le semiconducteur et on appelle $e\chi$ l'énergie nécessaire pour arracher un électron du semi-conducteur, du bas de la bande de conduction à l'influence de son atome de semiconducteur. Si on représente le niveau d'énergie pour les électrons, on va considérer trois cas [4]:

I.4.1.a Cas où $\Phi_m = \Phi_s$

Dans ce cas, les niveaux de vide étant identiques quand les deux matériaux sont séparés, il en est de même pour les niveaux de Fermi. Une barrière d'énergie s'établit à l'interface métal/semiconducteur et aucun échange d'électrons ne se fait entre les matériaux puisque le niveau de Fermi n'a pas été modifié (système en régime de bandes plates) [4].

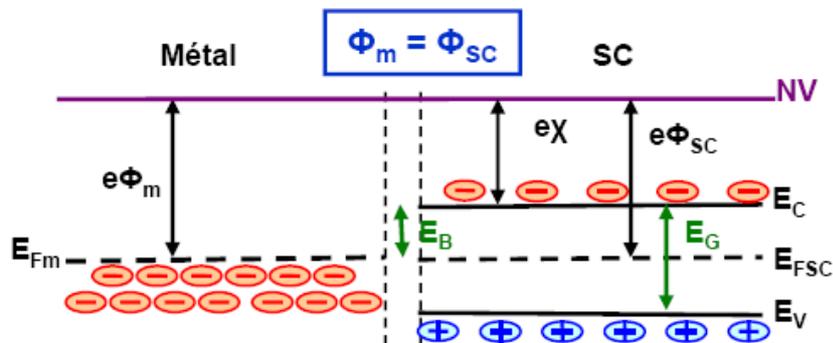


Figure I.2: Contact métal-semiconducteur avec $\phi_m = \phi_s$ [6].

I.4.1.b Cas où $\Phi_m > \Phi_s$. À l'équilibre

Le travail de sortie des électrons du métal est supérieur à celui du semi-conducteur. Pour égaliser les niveaux de Fermi lors de la mise en contact des deux éléments, il faut baisser le niveau de Fermi du semiconducteur par rapport à celui du métal. Des électrons quittent le semiconducteur pour le métal. Si le semiconducteur est dopé N, une zone de charge d'espace se crée dans le semiconducteur avec des ions fixes positifs et la bande de conduction s'éloigne du niveau de Fermi dans cette zone puis qu'il y a moins de porteurs. La courbure des bandes est alors orientée vers le haut. Dans le métal, il y a une accumulation d'électrons à l'interface. Les densités d'état dans le métal de l'ordre de 10^{22} cm^{-3} alors que les densités de donneurs sont de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} à 10^{18} cm^{-3} dans le semi-conducteur, Les charges

occupent donc davantage d'espace dans le semiconducteur, alors qu'elles sont bien concentrées en surface dans le métal.

A ces deux zones chargées, on va pouvoir associer une tension de diffusion V_0 qui va équilibrer les forces de diffusion et conduire à un état d'équilibre. Le niveau de Fermi s'éloigne de la bande de conduction au voisinage de la jonction, ce qui indique un déficit en électrons dans cette zone par rapport au reste du semiconducteur [4].

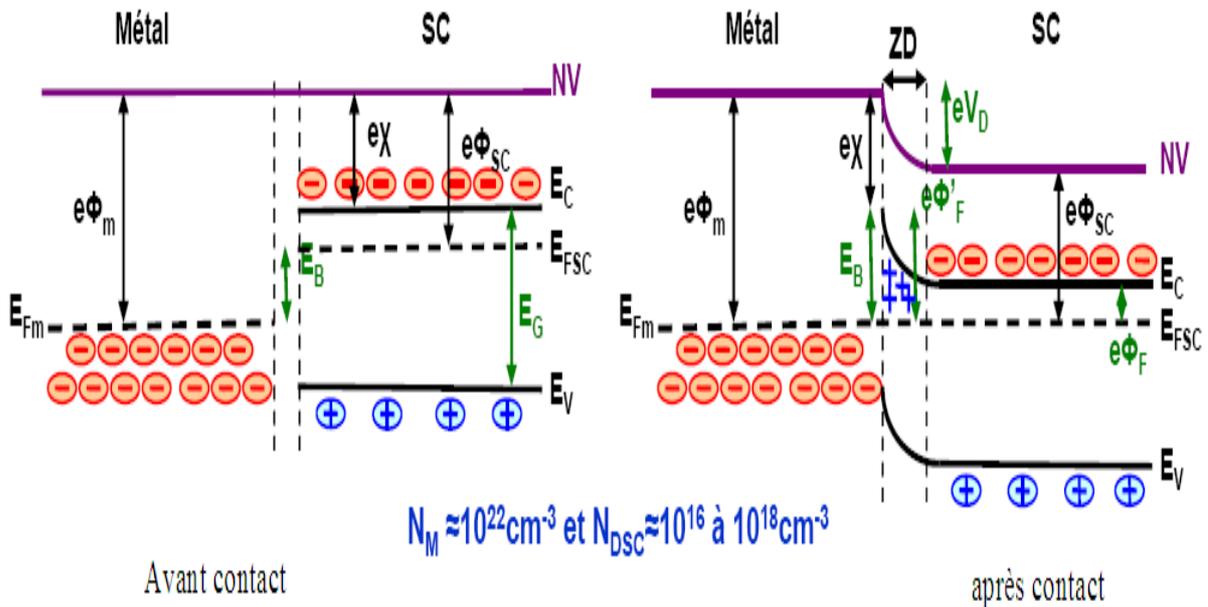


Figure I.3: Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m > \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique [6].

1.4.1.c Cas où $\Phi_m > \Phi_s$ sous polarisation

Si on polarise positivement le métal par rapport au semiconducteur de V , on va décaler le niveau des bandes d'énergie du semiconducteur vers le haut de $[e.V]$. La courbure dans le semiconducteur, à la jonction va s'atténuer.

La barrière énergétique du semiconducteur vers le métal diminue, alors qu'elle reste inchangée en sens inverse. Des électrons du semiconducteur vont diffuser plus facilement vers le métal. Un courant positif apparaît orienté du métal vers le semiconducteur. C'est une configuration de diode polarisée en direct, Quand V sera égal à V_0 , on se retrouve dans le régime de bandes plates.

Si on polarise positivement le semiconducteur par rapport au métal de V , on va décaler le niveau des bandes d'énergie du semiconducteur vers le bas de $e.V$. On augmente la barrière

qui s'oppose à la diffusion des électrons vers le métal. C'est une configuration de diode polarisée en inverse.

Finalement, quand $\Phi_m > \Phi_s$, avec un semiconducteur dopé N, la structure a le comportement d'une diode appelée diode Schottky [4].

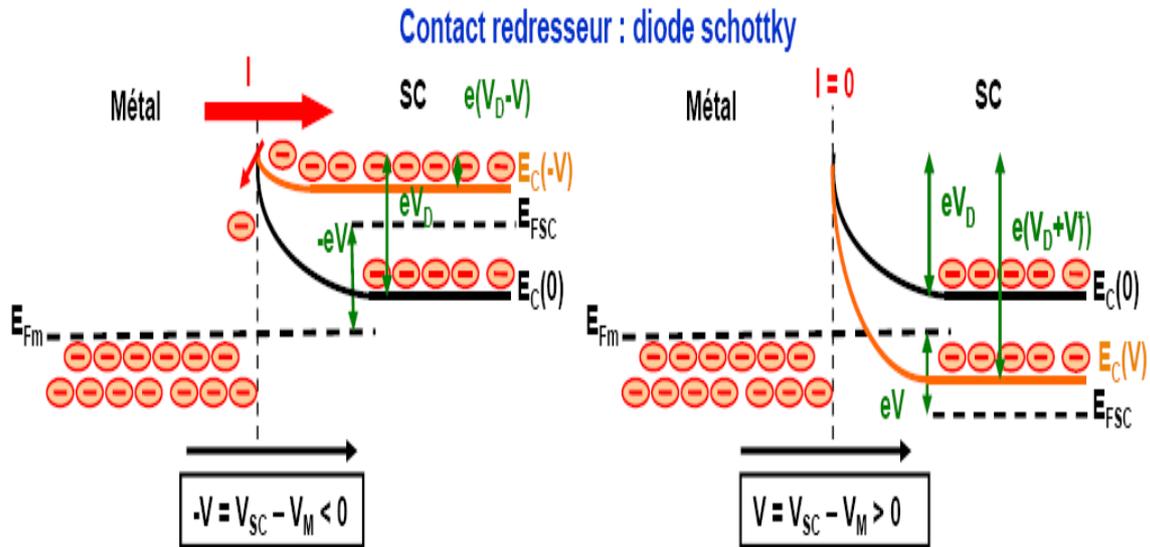


Figure I.4 : Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m > \phi_S$ sous polarisation [6].

1.4.1.d Cas où $\Phi_m < \Phi_s$. à l'équilibre

En égalisant les niveaux de Fermi et en conservant l'affinité électronique au voisinage de la jonction, on constate que le niveau énergétique pour les électrons est plus faible du côté du semiconducteur au voisinage de la jonction. Des électrons vont donc diffuser du métal vers le semiconducteur. Il apparaît donc un déficit d'électrons du côté du métal localisé à la surface et une accumulation d'électrons un peu plus étalée dans le semiconducteur, mais beaucoup moins que si on était en régime de déplétion. On a donc une zone de charge d'espace positive dans le métal et négative dans le semi-conducteur. La différence avec le cas précédent, c'est que la zone de charges d'espace dans le semi-conducteur correspond à un régime d'accumulation et non de déplétion.

Il n'y a plus de zone isolante à la jonction et la tension va se distribuer sur toute la zone semiconductrice qui comporte de nombreux porteurs libres [4].

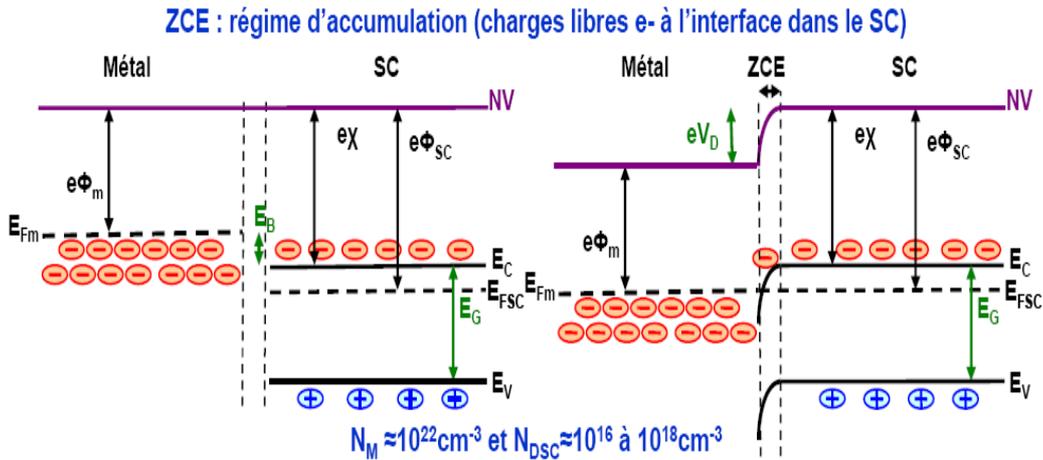


Figure I.5: Contact métal-semiconducteur(n) avec $\phi_m < \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique [6]

I.4.1.e Cas où $\Phi_m < \Phi_s$. Sous polarisation

Quand on va polariser la structure, la polarisation va se distribuer dans tout le semiconducteur qui est beaucoup plus résistif que le métal. Le comportement du semiconducteur est résistif. La jonction a un comportement ohmique.

Un électron qui arrive à l'interface passe librement du métal au semiconducteur ou inversement. En effet, il n'y a plus de zone isolante à l'interface et la tension appliquée n'est plus localisée dans une zone de déplétion, mais répartie dans toute la zone semiconductrice. On aura donc dans cette zone un champ électrique, orienté du métal vers le semiconducteur si V est négative et du semiconducteur vers le métal si V est positive.

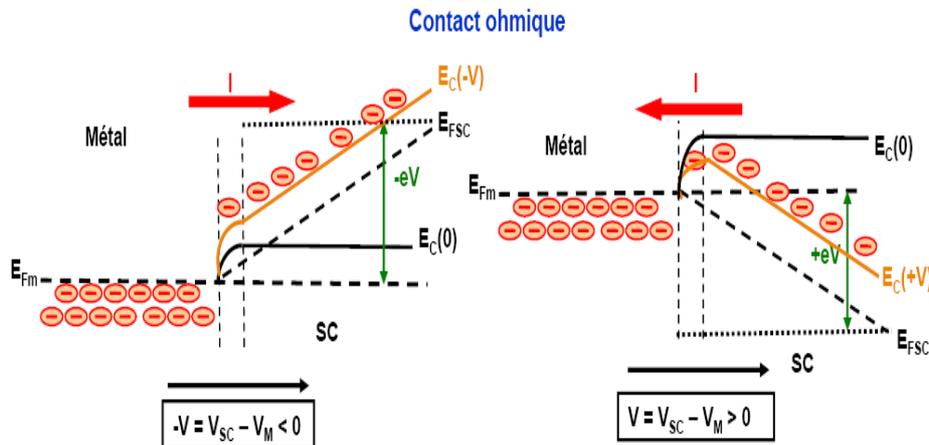


Figure I.6 : Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ sous polarisation [6].

Pour un semiconducteur polarisé négativement par rapport au métal les électrons iront du semiconducteur vers le métal et le courant ira en sens inverse.

Pour un semiconducteur polarisé positivement par rapport au métal, les électrons iront du métal vers le semi conducteur et le courant ira en sens inverse.

I.4.1.f Cas d'un métal avec un semiconducteur dopé P

Quand $\Phi_m < \Phi_s$, on constate que la jonction aura un comportement de diode Schottky.

Avant le contact le diagramme énergétique est représenté sur la figure (I.7).

Lorsque les deux matériaux sont mis au contact, le travail de sortie du métal étant inférieur à celui du semiconducteur, les électrons sortent du métal pour entrer dans le semiconducteur. Le système évolue jusqu'à alignement des niveaux de Fermi. Le diagramme énergétique est différent suivant le type de semiconducteur [7].

ZD : régime de déplétion (absence de charges libres, présence d'ions < 0 à l'interface dans le SC)

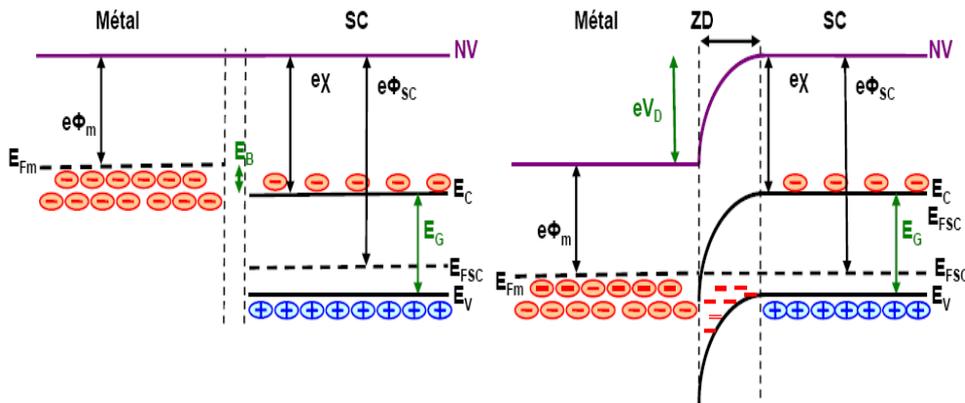


Figure I.7: Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ à l'équilibre thermodynamique [6].

I.4.1.g Semiconducteur de type p sous polarisation

Les électrons passent du métal dans le semiconducteur. Il apparaît un déficit d'électrons à la surface du métal. Dans le semiconducteur, les électrons qui viennent du métal se recombinent avec les trous créant une zone de déplétion due à la présence des ions N_a^- qui ne sont plus compensés par les trous. Il apparaît ainsi une zone de charge d'espace étalée dans le semiconducteur. Le système évolue jusqu'au moment où le champ et la tension de diffusion résultants, arrêtent la diffusion des électrons (Figure I.8).

La hauteur de la barrière d'interface, que voient les trous pour passer du semiconducteur au métal, est alors donnée par [7] :

$$E_b = E_g + e\chi - e\phi_m \quad (I.2)$$

Contact redresseur : diode schottky

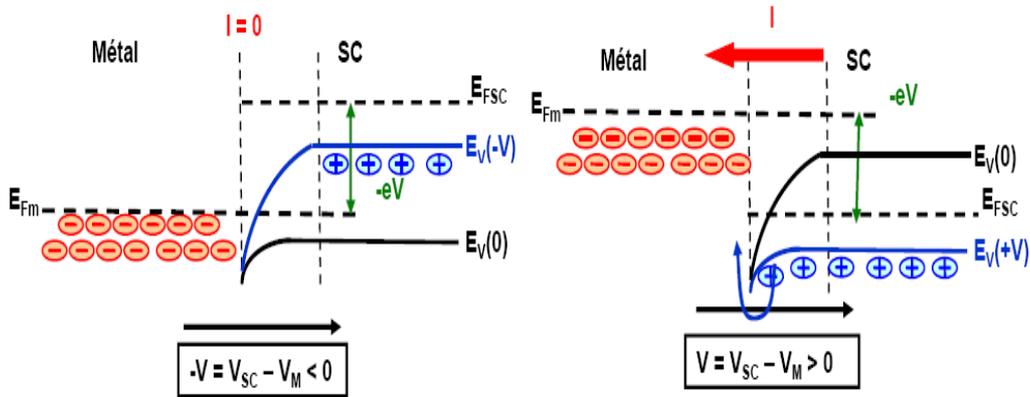


Figure I.8 : Contact métal-semiconducteur(p) avec $\phi_m < \phi_s$ sous polarisation.[5]

1.5. Zone de charge d'espace

Champ potentiel électrique

Considérons la structure métal-semiconducteur de type n, avec $\Phi_m > \Phi_s$.

On obtient la distribution du potentiel dans la zone de charge d'espace en intégrant l'équation de Poisson. Nous supposons que le semiconducteur est homogène. Avec une densité de donneurs N_d .

Nous admettrons que tous les donneurs sont ionisés à la température ambiante. Nous ferons l'hypothèse de la zone de charge d'espace vide de porteurs et nous appellerons W la largeur de cette zone. Ainsi la densité de charge dans le semiconducteur (figure I.9) s'écrit :

$$0 < x < W \quad \rho(x) = e N_d$$

$$x > W \quad \rho(x) = 0$$

L'équation Poisson s'écrit

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon} = \frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} (x - W) \tag{I.3}$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = -E(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} (x - W) \tag{I.4}$$

Le champ électrique est négatif et varie linéairement dans la zone de charge d'espace (figure I.9), sa valeur à l'interface est :

$$E_s = \frac{eN_d}{\epsilon_s} W \tag{I.5}$$

En intégrant une deuxième fois en prenant l'origine des potentiels à l'interface, on obtient (figure I.9).

$$V(x) = -\frac{eNd}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) \tag{I.6}$$

La tension de diffusion résulte de la différence des travaux de sortie du métal et du semiconducteur $V_d = \Phi_m - \Phi_s$. Cette tension correspond à la différence de potentiel entre la surface du semiconducteur et son volume, c'est-à-dire aux bornes de la zone de charge d'espace

$$V_d = V(x=W) - V(x=0) = -\frac{eNd}{\epsilon} \left(\frac{W^2}{2} - W^2 \right) = \frac{eNd}{2\epsilon_s} W^2$$

D'où l'expression de la largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre [7]

$$W^2 = \frac{2\epsilon_s}{eNd} V_d = \frac{2\epsilon_s}{eNd} (\Phi_m - \Phi_s) \tag{I.7}$$

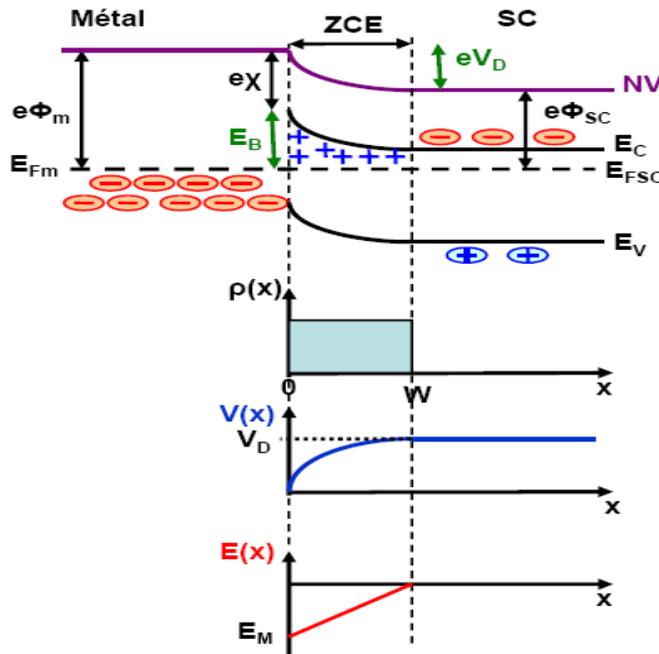


Figure I.9: Intégrations successives de la densité de charge dans une diode Schottky de type N [6].

La densité de porteurs est plus importante qu'à l'équilibre et ces porteurs sont mobiles.

L'apparition de ces porteurs crée un champ qui modifie leur répartition. Il faut résoudre de manière auto-cohérente l'équation de Poisson, ce qui nécessite des outils numériques.

Comme dans le cas de la jonction PN, l'établissement de l'équilibre résulte d'une diffusion de porteurs et donc d'un courant de diffusion associé.

Ce dernier est contré par un courant inverse. A l'équilibre, deux courants inverses se compensent à chaque instant. Nous allons étudier quels sont les courants existants à l'équilibre [7].

I.6 Capacité

Si la structure est polarisée par une tension V , supposée positive dans le sens direct c'est-à-dire quand le métal est polarisé positivement par rapport au semiconducteur, la barrière de potentiel devient $V_d - V$ et la largeur de la zone de charge d'espace devient

$$W^2 = \frac{2\epsilon_s}{eN_d} (V_d - V) \quad (\text{I.8})$$

Comme dans la jonction pn toute variation de V entraîne une modulation de $W(V)$ et par suite une modulation de la charge totale développée dans le semiconducteur. Il en résulte que la structure présente une capacité différentielle.

La charge d'espace est donnée par

$$Q_{sc} = -Q_m = eN_d W = (2\epsilon_s e N_d (V_d - V))^{1/2} \quad (\text{I.9})$$

La capacité est équivalente à celle d'un condensateur plan d'épaisseur W . On peut écrire l'expression de $C(V)$ sous la forme

$$C^{-2}(V) = \frac{2\epsilon_s}{\epsilon_s e N_d} (V_d - V) \quad (\text{I.10})$$

La courbe représentant $C^{-2}(V)$ est une droite dont la pente permet de déterminer la densité de donneurs N_d , et dont l'abscisse à l'origine permet de déterminer la hauteur de barrière V_d (figure I.10). Si le dopage du semiconducteur n'est pas homogène, la courbe représentant $C^{-2}(V)$ n'est plus une droite [7].

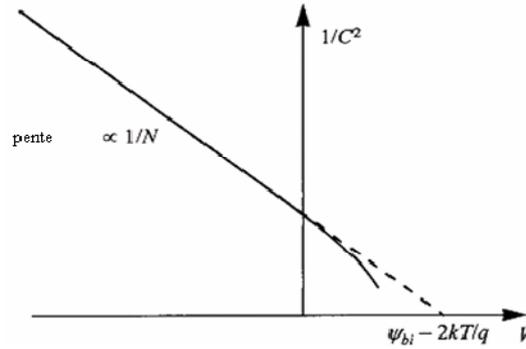


Figure I.10 : Variation de la capacité avec la tension [8].

I.7 Caractéristique courant-tension

Courant d'émission thermoélectronique

Le courant est dû aux porteurs majoritaires. A l'interface entre le métal et le semiconducteur, il y a émission thermoélectronique par-dessus de la barrière de potentiel. Nous allons considérer une structure métal-semiconducteur de type n, avec $\Phi_m > \Phi_s$ [8].

La densité de courant dans une jonction métal-semiconducteur peut s'écrire :

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-E_b}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.11})$$

Où A^* est la constante de Richardson donnée par :

$$A^* = \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} \quad (\text{I.12})$$

Et E_b est la barrière de potentiel donnée par

$$E_b = E_{\Phi_m} - e\chi = V_d + e\Phi_F \quad (\text{I.13})$$

Où $e\Phi_F = E_c - E_f$

On peut écrire :

$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.14})$$

$$\text{Avec } J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-E_b}{KT}\right) \quad (\text{I.15})$$

La caractéristique J-V représentée sur la figure(I.11) [7].

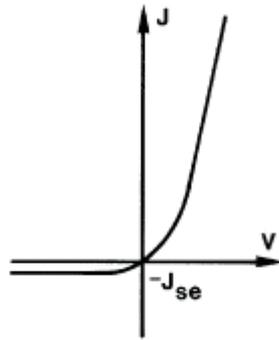


Figure I.11: Relation courant-tension [7].

1.8 Jonction Métal-oxyde-semiconducteur

Dans les jonctions présentant un isolant, ce dernier est en général de l'oxyde de silicium (SiO₂). Cet isolant présente un gap E_{gi} et une affinité électronique χ_i.

1.8.1 Jonction à l'équilibre

Les figures sont alors légèrement modifiées par rapport au cas précédent. Si on relie les deux faces les plus éloignées des semi-conducteurs par un fil conducteur avec de l'oxyde de silicium comme isolant entre les deux autres faces, on se retrouve dans la configuration suivante pour un semiconducteur dopé N [3]:

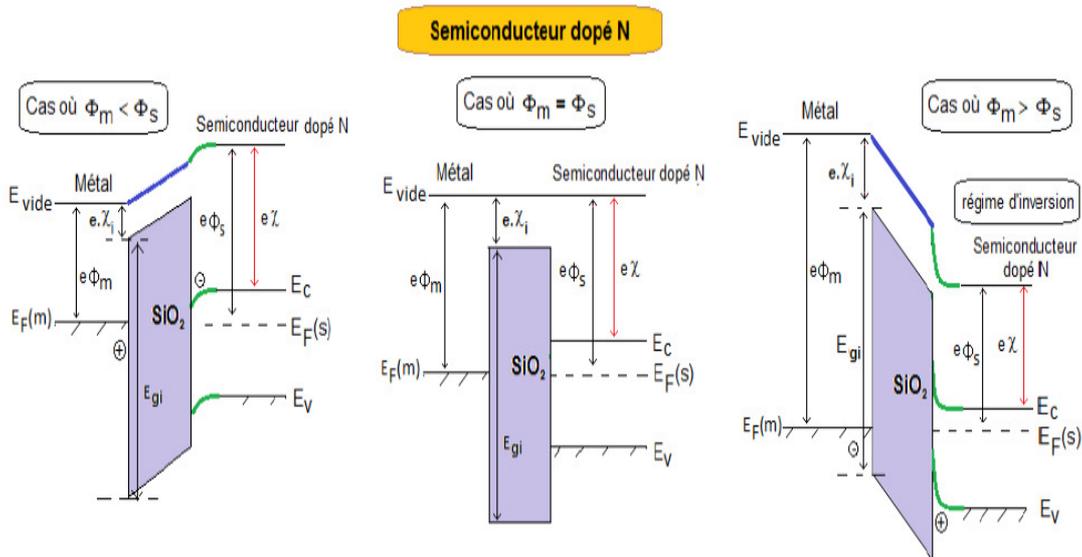


Figure I.12: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N a thermodynamique [3].

Pour un semiconducteur dopé P, on a de la même façon les configurations suivantes:

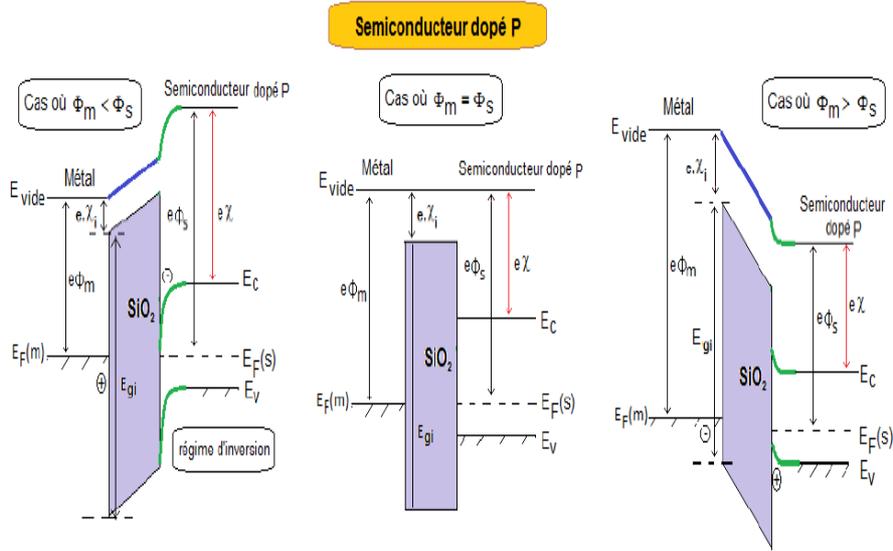


Figure I.13: Bande d'énergie de métal isolant Sc type P a thermodynamique [3].

I.8.2 Jonction polarisée

En présence de polarisation, contrairement à la jonction métal-semiconducteur, la zone isolante ne permet pas de comportement ohmique. Excepté au voisinage de l'interface isolant-semiconducteur, le niveau des bandes va rester constant dans le semiconducteur. Si on applique une différence de potentiel V_G au barreau métallique appelé grille, par rapport au semiconducteur, la polarisation va alors contribuer à atténuer ou amplifier les effets vus précédemment en l'absence de polarisation. En jouant sur la valeur de V_G , on pourra passer d'un régime d'accumulation à un régime d'inversion, ou inversement.

Le régime de bande plates est atteint quand

$$V_G = \Phi_m - \Phi_s \tag{I.16}$$

I.8.2.a Pour une tension de grille V_G positive

On va décaler le niveau de Fermi du métal vers le bas par rapport à celui du semiconducteur. Pour le semiconducteur de type N, si $\Phi_m < \Phi_s$, on va augmenter l'effet d'accumulation. Si $\Phi_m > \Phi_s$, on va diminuer le niveau d'inversion ou de déplétion puis passer en accumulation. Pour le semiconducteur de type P, si $\Phi_m < \Phi_s$, on va augmenter le niveau d'inversion.

Si $\Phi_m > \Phi_s$, on va diminuer l'effet d'accumulation puis passer en déplétion puis en inversion pour le semiconducteur de type P.

I.8.2.b Pour une tension de grille VG négative

On va décaler le niveau de Fermi du semiconducteur vers le bas par rapport à celui du métal. Pour le semiconducteur de type N, si $\Phi_m < \Phi_s$, on va diminuer l'effet d'accumulation puis passer en déplétion puis en inversion. Si $\Phi_m > \Phi_s$, on va augmenter le niveau d'inversion. Pour le semiconducteur de type P, si $\Phi_m < \Phi_s$, on va diminuer le niveau d'inversion pour passer en déplétion puis en inversion. Si $\Phi_m > \Phi_s$, on va augmenter l'effet d'accumulation pour le semiconducteur de type P[3].

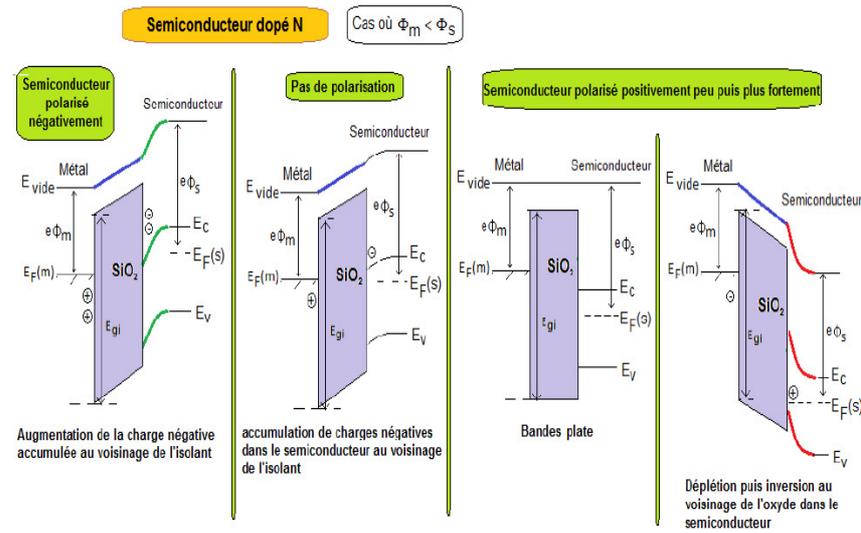


Figure I.14: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N $\Phi_m < \Phi_s$ sous polarisée [3].

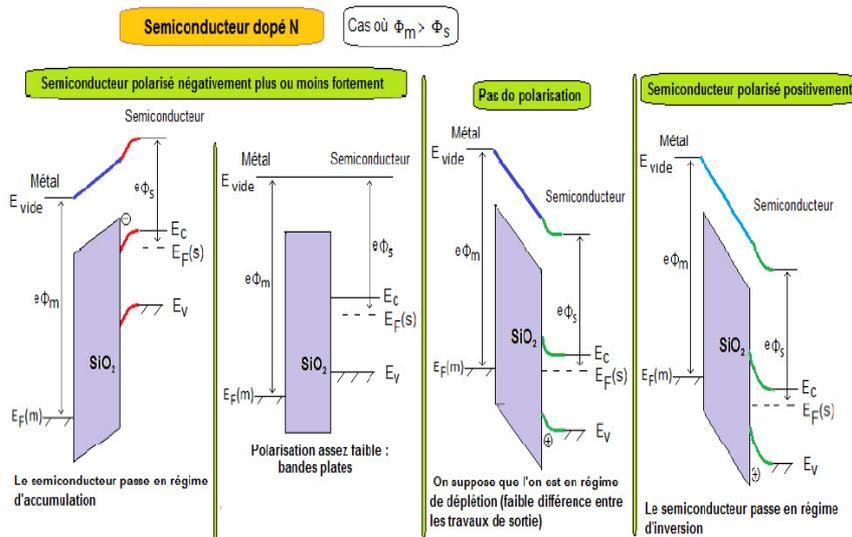


Figure I.15: Bande d'énergie de métal isolant Sc type N $\Phi_m > \Phi_s$ sous polarisée [3].

On remplace le vide par un isolant : sur Si, le seul isolant possible est le SiO₂ → MOS

L'isolant (supposé parfait) est défini par son gap et son affinité électronique → diagramme des bandes identiques à celui de la structure M-V-SC

- Hauteur de la barrière de potentiel à l'équilibre : $V_D = \Phi_m - \Phi_{SC}$
- Si introduction d'une polarisation V_G , $V_D = \Phi_m - \Phi_{SC} - V_G$
- Isolant parfait : pas de charge → variation linéaire de V et des bandes
- Si $V_G = 0$ → on retrouve les diagrammes des bandes M-V-SC
- Si $\Phi_m = \Phi_{SC}$ → la polarisation V_G va faire évoluer la structure d'un régime d'accumulation à un régime d'inversion
- Si $\Phi_m = \Phi_{SC}$ → le régime de bande plate obtenu pour $V_G = 0$
- Si $\Phi_m \neq \Phi_{SC}$ → le régime de bande plate obtenu pour $V_G = \Phi_m - \Phi_{SC} = V_{FB}$ (=tension bande plate).

I.9 L'Arséniure de Gallium (GaAs)

I.9.1 Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)

L'arséniure de gallium (GaAs) est un composé de la famille III-V. Il cristallise dans la structure du Zinc Blende Figure I.15 .son réseau cristallin peut se décomposer en deux sous-réseaux cubiques à faces centrées interpénétrés, l'un étant constitué des atomes de l'élément du groupe III (Ga), l'autre des atomes de l'élément du groupe V(As) ; Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire d'une quantité de $a_0/4$ (1 ,1 ,1), a_0 étant le paramètre cristallin, où chaque atome se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce.[9]

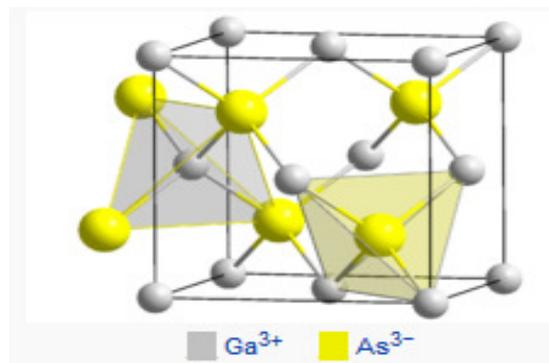


Figure I.16 : Structure Cristalline du GaAs [10]

I.9.2 Propriétés électriques et physiques du GaAs

Les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante (300K°) sont regroupées dans le tableau suivant:

Propriétés du GaAs à 300K°	Valeur	
Structure cristalline	Zinc blinde	
Poids atomique	144,63	g/mole
Structure de la bande interdit	Directe	
Largeur de bande interdit	$E_g = 1,424$	eV
Permittivité	11,6	pF/cm
Conductivité thermique	0.45	w/cm.k
Mobilité des électrons	8500	$\text{cm}^2.\text{v}^{-1}.\text{s}^{-1}$
Mobilité des trous	400	$\text{cm}^2.\text{v}^{-1}.\text{s}^{-1}$
Vitesse maximal des électrons	$2 \cdot 10^7$	$\text{cm}.\text{s}^{-1}$
Champ électrique de saturation	10	k.v/cm

Tableau II.2 caractéristiques du GaAs [9].

I.9.3 Avantages et inconvénients du GaAs

Même si le silicium reste le matériau de base le plus largement utilisé dans le secteur des semi-conducteurs, on constate l'émergence rapide de nouveaux marchés demandant des matériaux spécifiques. Le besoin de nouveaux composants pour les hyperfréquences, la logique rapide, l'optoélectronique a poussé le développement des matériaux III-V dont les propriétés de transport électronique et les propriétés optiques ne sont pas accessibles au silicium.

Le GaAs, dont les avantages par rapport au silicium résident en particulier dans la possibilité d'obtenir un matériau semi isolant et aussi dans une mobilité électronique plus élevée (sept fois plus grande que celle du silicium). Ces deux dernières propriétés étant favorables à un fonctionnement à fréquence élevée. Ces caractéristiques ont rendu ce matériau très prometteur pour répondre aux nouvelles exigences dans les domaines des hautes fréquences et de l'optoélectronique.

Dans le domaine des composants optoélectroniques, on utilise surtout les propriétés de sa structure de bande (gap direct) et celles de ses composés ternaires et quaternaires (GaAlAs,

GaAsP, GaInAs et GaInAsP). Ainsi, le développement de la technologie de fibres optiques à faible perte et la maîtrise de l'élaboration de GaAs ont abouti à la réalisation d'ensembles de télécommunications optiques utilisant des émetteurs lasers à semi-conducteur GaAs et GaAlAs [9].

Un autre atout très important de ce matériau est la possibilité de l'obtenir sous forme semi-insolant ; cet état de résistivité élevée est particulièrement favorable pour le développement d'une véritable technologie planaire de circuits intégrés sur GaAs. Aussi la largeur de sa bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température. L'inconvénient majeur du GaAs est son coût élevé. Par exemple, les circuits intégrés en arséniure de gallium sont beaucoup plus cher : le matériau ne s'obtient qu'en plaquettes de 3 à 4 pouces de diamètre (de 7,5 à 10 cm) au maximum, ce qui limite le nombre de circuits intégrés fabriqués ; sa physicochimie se prête moins bien que le silicium aux associations de matériaux (semi-conducteurs, isolants, métaux) requis par les circuits intégrés, ce qui rend les méthodes de fabrication plus délicates et les rendements de fabrication plus faibles. Ces handicaps limitent l'arséniure de gallium aux utilisations où il est indispensable, à savoir lorsque l'on veut des circuits fonctionnant à des fréquences supérieures à 1 gigahertz [9].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré la différence entre diode Schottky et contact ohmique avec et sans isolant SiO₂ de deux type N et P.

Aussi expliqué les avantages de et les inconvénients de L'Arséniure de Gallium (GaAs).

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va donner quelques notions principales sur la simulation en générale et en particulier le logiciel de simulation technologique (TCAD) utilisé dans ce travail pour simuler les caractéristiques courant-tension (I-V) et capacité-tension (C-V) d'une diode Schottky avec et sans couche d'oxyde. On va définir aussi la méthode des moindres carrées utilisé pour extraire les paramètres essentielles tels que le courant de saturation I_s , facteur d'idéalité n , la résistance série R_s et le potentiel interne de diffusion V_{bi} .

II.2 Le rôle de la simulation

La simulation fournit un lien entre le monde expérimental et le monde théorique comme le montre la figure II.1. Elle complète la théorie et l'expérimental et construit la réalité physique dans la présence de certaines contraintes ou bien la présence d'une analyse mathématique impossible [11].



Figure II.1 : Le rôle de simulation [11]

II.3 Présentation du logiciel SILVACO

Le Silvaco TCAD est un logiciel de simulation des dispositifs électronique, il est constitué d'une gamme d'outil de simulation formant ce qu'on appelle la VWF (virtuelle wafer fabrication) [12].

II.4 La VWF: (virtual wafer Fab)

Parmi les différents logiciels qu'il forme la VWF on note les deux fameux les plus utilise ATHENA et ATLAS, ces outils sont divisés en deux catégories principales.

- ✓ Outil principal
- ✓ Outil auxiliaire

II.4.1 ATHENA

C'est un logiciel de simulation y compris dans le Silvaco et sert à la fabrication virtuelle des différents composants d'un dispositif électronique, il traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec Atlas.

II.4.2 ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique, exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électriques telles que le courant ou la tension (lignes de champ). Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- ✓ Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- ✓ Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants : modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semi-conducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associées telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc.

Ainsi, pour chaque nœud, la concentration de porteurs, le champ électrique, etc. peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées.

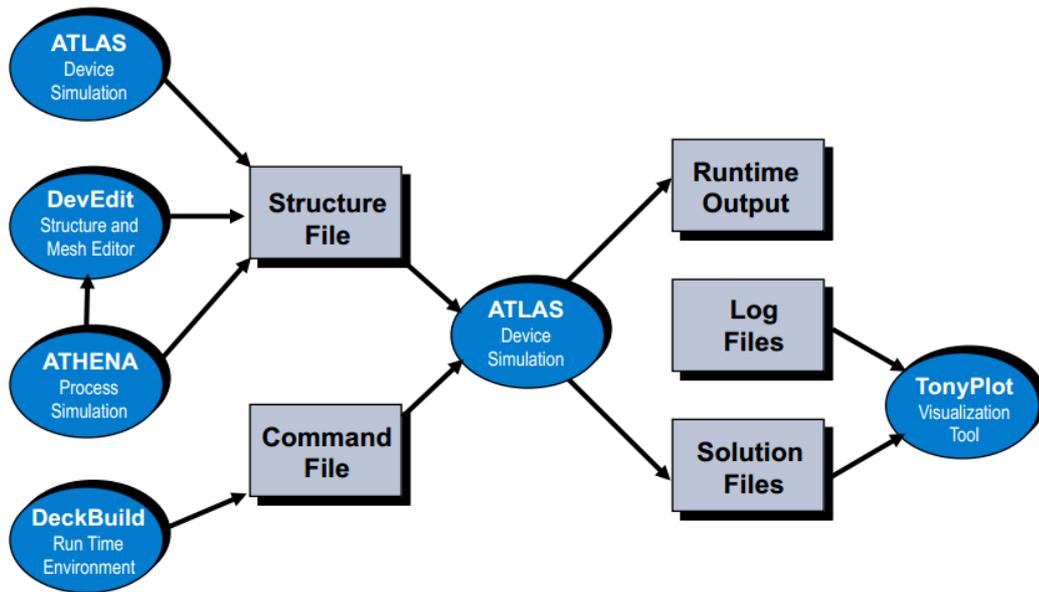


Figure II.2 : les entres et les sorties de Atlas [14].

II.4.3 Deckbuild

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3,...

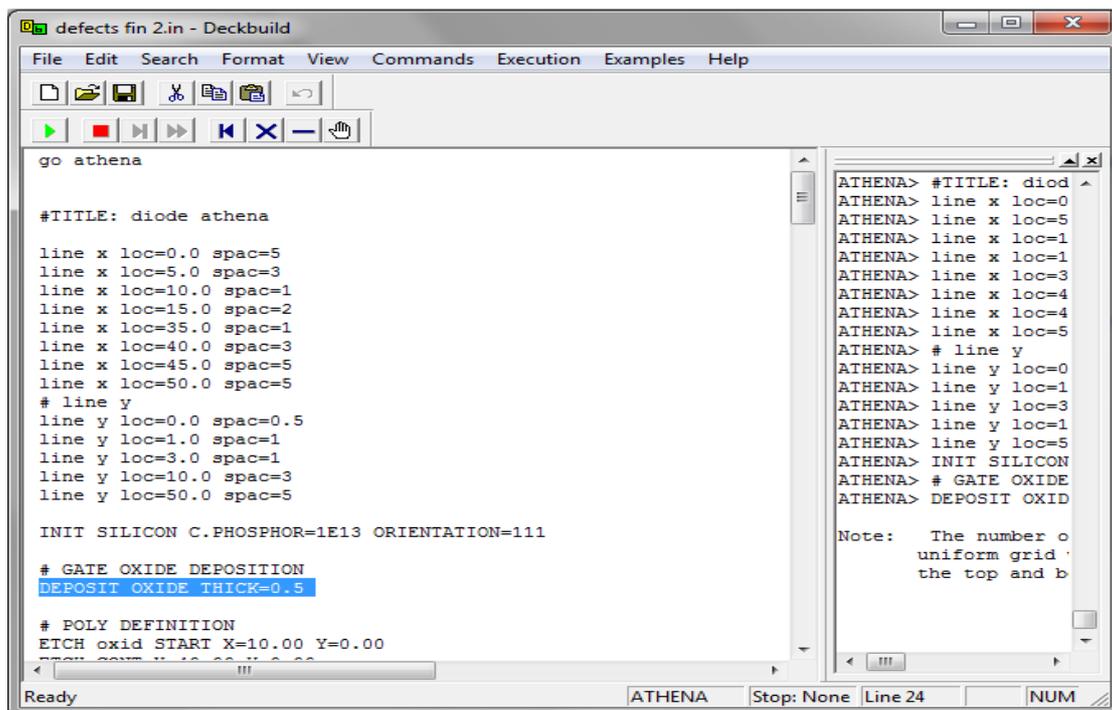


Figure. II.3 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution [13].

Sous cet environnement nous pouvons visualiser sur une fenêtre d'information (Fig. II.4) (Output Windows) les résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.).

II.4.4 Tonyplot

TONYPLOT est L'environnement où sont tracés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation utilisé, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une, deux ou trois dimensions [13].

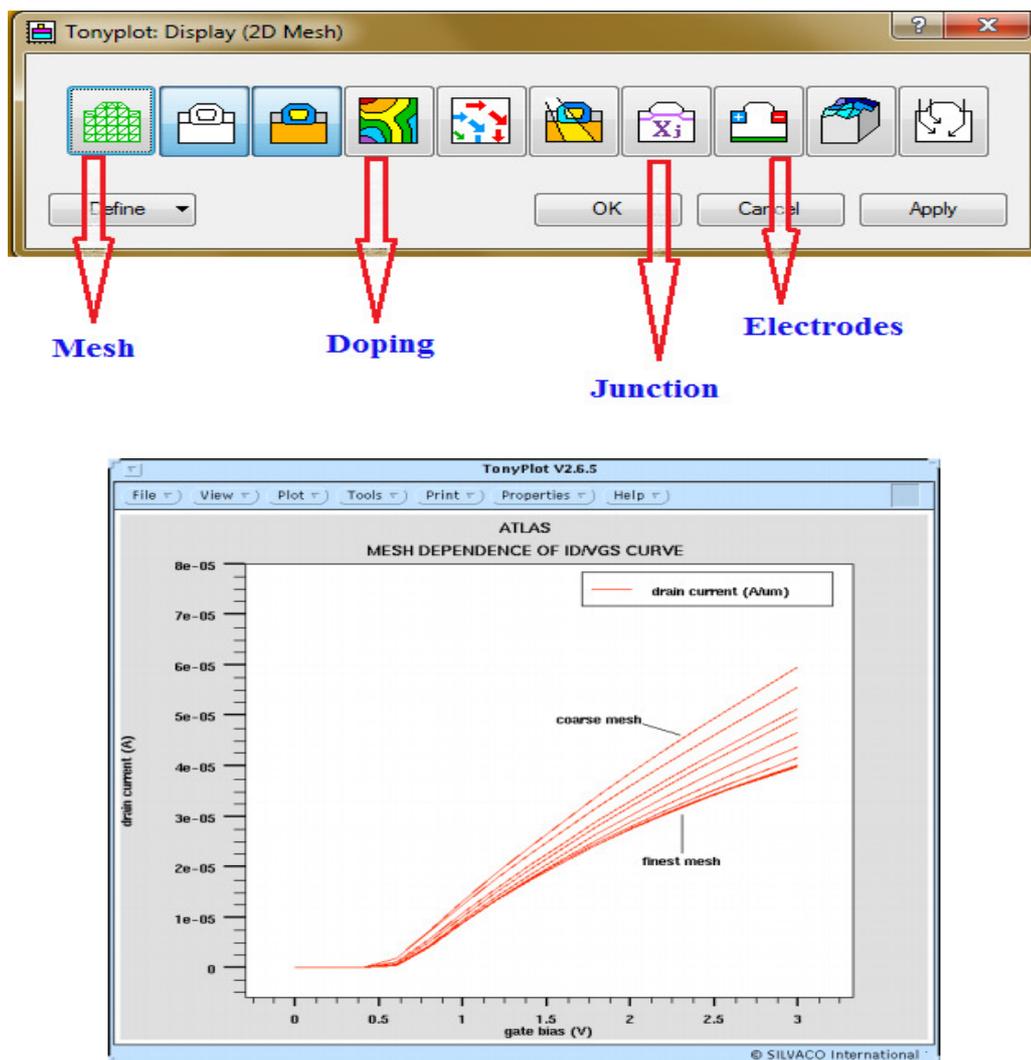


Figure. II.4 : L'environnement Tonyplot [13].

II.5 La simulation des composants semi-conducteurs

- **Quel est le besoin ?**

Le rôle principal du simulateur est faire baisser le nombre des étapes d'itérations nécessaires pour la fabrication du composant avec certaines propriétés désirées. Un simulateur utilisé pour un composant semi-conducteur donne les données suivantes comme résultats :

- 1) Caractéristiques I-V, C-V, Q-V,...
- 2) Courbe à 2D inclus la courbe d'une grandeur comme par exemple le potentiel en fonction de la distance verticale y d'un composant.
- 3) la courbe à 3D inclus un autre paramètre par exemple la distance verticale z
- 4) Vecteur : contient la courbe du champ électrique ou bien la densité de courant en fonction du voltage et le vecteur de position [15].

II.6 Structure de fichier d'entrée

« Silvaco-Atlas » reçoit les fichiers d'entrée à travers « DeckBuild ». Le code écrit dans le fichier d'entrée appel « Atlas » pour fonctionner avec la commande suivante :

« Go Atlas »

Suite à cette commande, le fichier d'entrée doit suivre un modèle.

Les groupes de commandes sont indiqués sur la Figure (II.5) [16].

<i>Group</i>	<i>Statements</i>
1. Structure Specification	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	METHOD
4. Solution Specification	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	EXTRACT TONYPLOT

Figure II.5 : Groupes de commandes [16].

II.7 Spécification de la structure étudiée

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage [16].

II.7.1 Maillage

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis.

La figure (II.6) montre le maillage de notre structure.

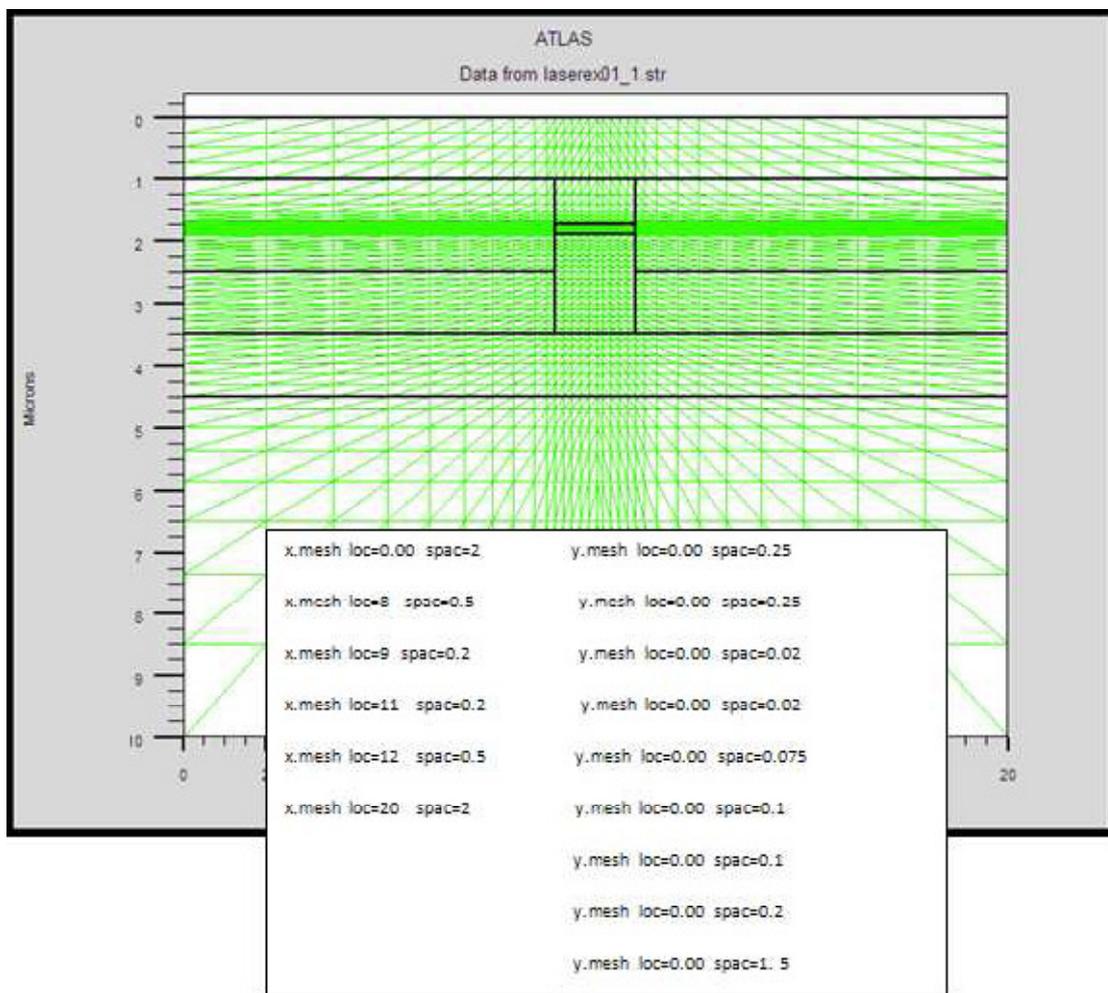


Figure II.6 : Maillage à deux dimensions (x,y) [17].

Le format général de définition de maillage est :

MESH X.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

MESH Y.LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

Par exemple, si x.mesh départ à 0 microns avec un espacement de 2 microns, cela signifie qu'il est relativement épais. x.mesh devient plus fin entre 9 et 11 microns avec un espacement de 0,2 microns.

De même pour y.mesh, par exemple y.mesh départ à 0 microns avec un espacement de 0,25 microns, le maillage est plus épais à l'endroit y.mesh de 10 microns, lorsque l'espacement est de 1,5 microns.

La précision de la simulation dépend de l'état de la maille.

Un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis.

Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat dans la simulation [14].

II.7.2 Régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant :

REGION nombre = < integer >< material_type > / < position des paramètres >

La figure (II.7) montre les régions du maillage. Il y'a dix régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiés dans les axes x et y.

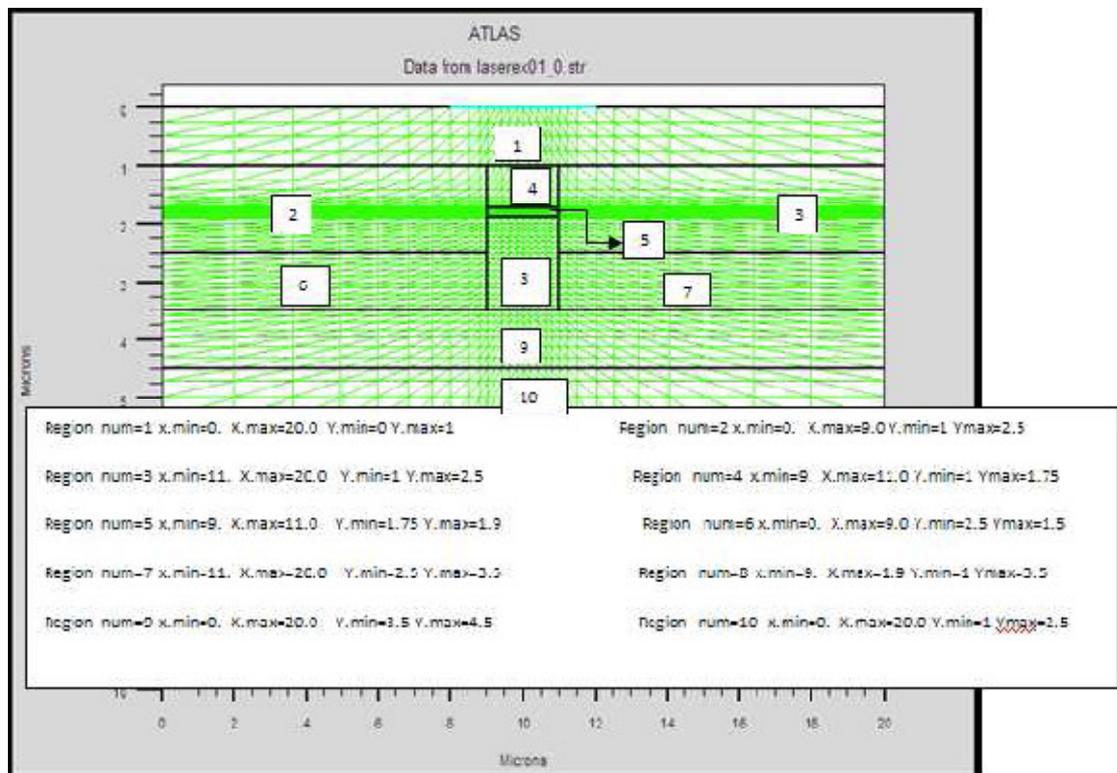
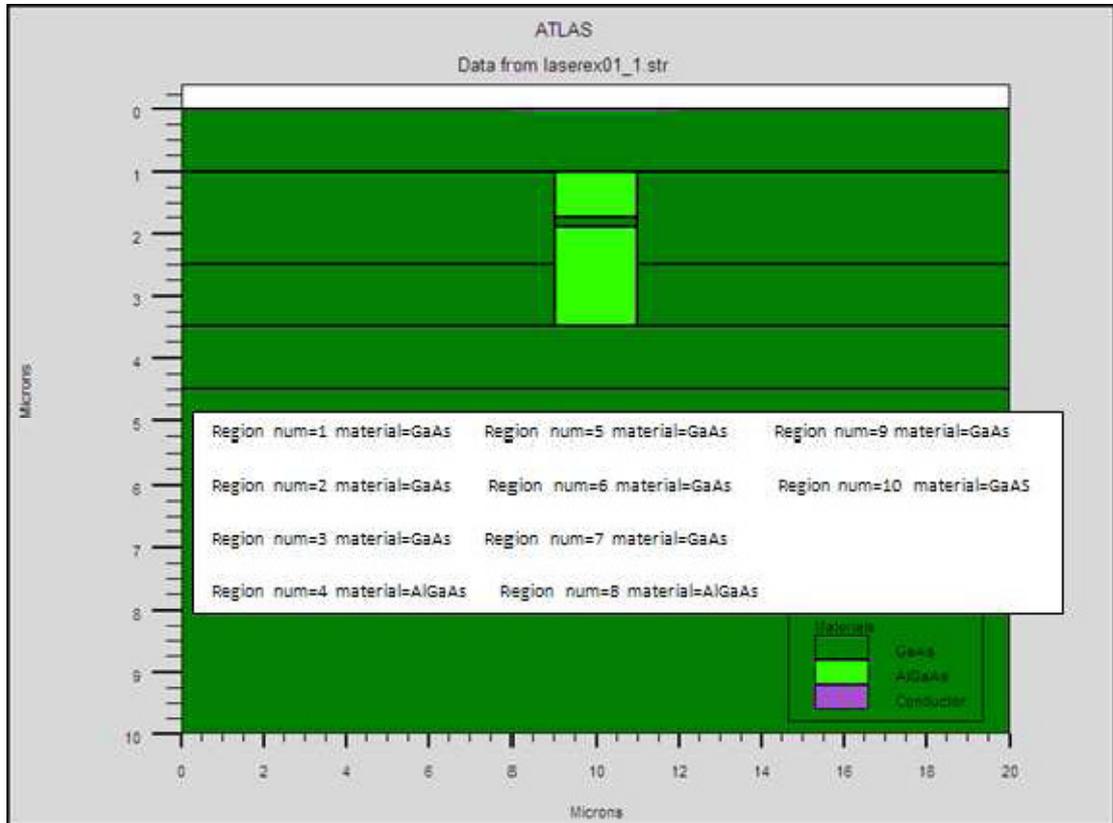


Figure II.7 : Définition des régions [16].

La figure (II.8), montre la façon de définition des matériaux pour chaque région. Notons que le code de couleur indique la matière. Les régions ont des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites [15].



Figures II.8 : Les régions et les matériaux [16].

- **Simulation du dispositif :**

Pour effectuer une simulation sous environnement SILVACO, il est nécessaire de bien définir la structure utilisée. On doit spécifier le domaine physique de la simulation, les différents matériaux qui constituent cette structure, les électrodes et le dopage des différentes régions afin de dessiner le maillage adéquat à l'étude de notre structure. Les contacts métalliques en haut et en bas sont définis par leur travail de sortie et la vitesse de recombinaison en surface [15].

II.7.3 Electrodes

« Atlas » a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition d'électrodes est comme suit :

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode >< position des paramètres >

La figure (III-7) montre la position de l'anode et la cathode par des valeurs de x et de y.

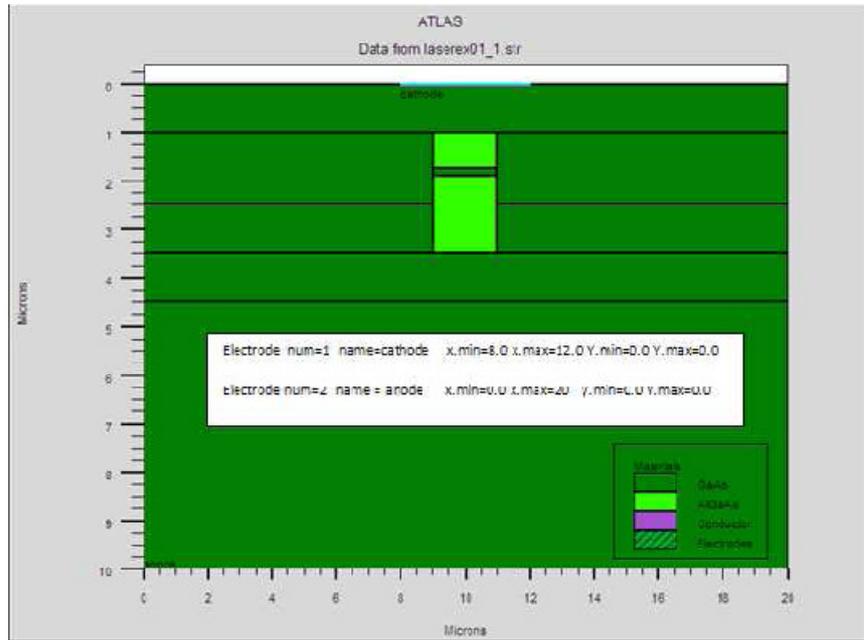


Figure II.9 : Définition des électrodes [16].

II.7.4 Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage.

Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit :

DOPAGE < type de distribution > < type de dopant > / < position des paramètres >

Dans la figure (II.10), les types de dopage et les niveaux de dopage sont définis. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

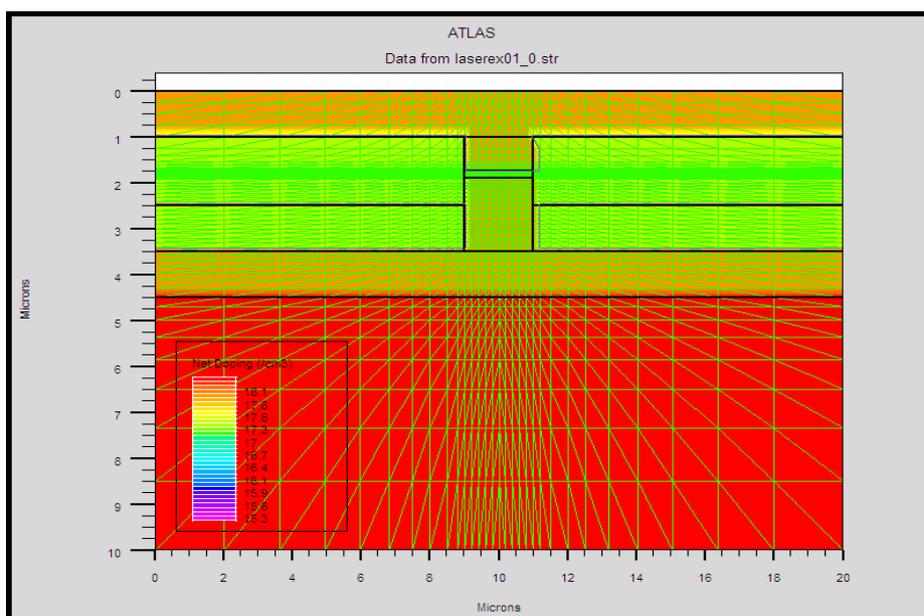


Figure II.10 : Types de dopage [16].

II.7.5 Spécification du modèle et du matériau

Après la définition de la structure, il faut spécifier les modèles des matériaux, elle se compose de quatre parties : matériau, modèles, contact et interface.

II.7.5.a Matériau

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

Exemple :

Material Material = GaAs MUN = 8000 MUP = 150 TAUN0 = 3e-7 TAUP0 = 2e-5

Dans cet exemple, « Material » apparaît deux fois, le premier est considéré comme la déclaration du matériau et le second est considéré comme un paramètre de localisation.

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration « Material », comme exemples de ces paramètres : la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement.

II.7.5.b Modèles

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories :

Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

Exemple : SRH FLDMOB CONMOB

- ✓ La dépendance de la mobilité en fonction de la concentration des porteurs on introduit le modèle **CONMOB**,
- ✓ la dépendance de la mobilité du champ électrique par **FLDMOB**,
- ✓ Le facteur de génération recombinaison par **SRH**.

Modèle de recombinaisons Schokley Read Hall (SRH)

Commençons tout d'abord par un rappel sur les niveaux profonds :

Les niveaux profonds sont des états permis dans la bande interdite par lesquels des porteurs libres excités peuvent transiter et retourner à leurs états d'équilibre [16]. Ils sont principalement dus à la présence d'impuretés métalliques (Cu, Fe, Au, ...), ainsi qu'à la présence des

dislocations dans le réseau cristallin. Ces niveaux sont responsables de la chute de la durée de vie des porteurs, en créant des centres de recombinaisons [16].

Recombinaison SRH

Elles sont liées à la présence d'impuretés ou de défauts (dislocations, lacunes, ...) au sein de la structure cristalline du silicium. Cela induit la présence de niveaux d'énergies discrets au sein du gap du matériau. Ces niveaux (pièges) facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes (voir figure II.11).

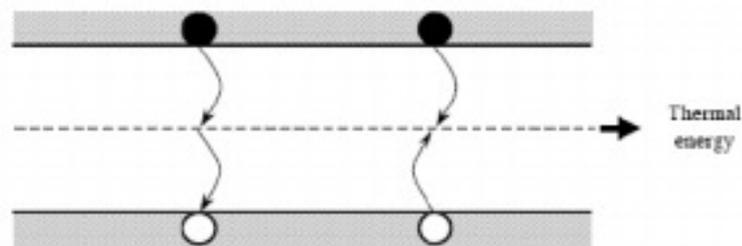


Figure. II.11 : Mécanisme de recombinaison SRH [17].

Un électron va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut.

Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence. C'est sur ce type de recombinaisons que la passivation par hydrogène ou le gettering pourront avoir effet en neutralisant les pièges [17].

Universel Schottky Tunneling (UST) Modèle

Dans le modèle universel Schottky Tunneling (UST), le courant tunnel est représenté par des taux de tunneling localisés à grille endroits près du contact Schottky. Pour les électrons, ceci est illustré sur la figure II.12 [17].

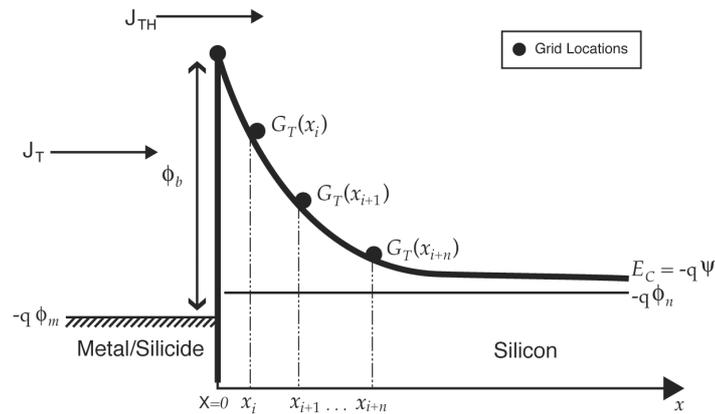


Figure II.12: représentation locale du taux de production de tunnel du modèle de tunnel Schottky universel [17]

II.7.5.c Contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante :

Contact nombre = < n > | NOM = <ename> |

Cette expression montre la déclaration « contact »,

Exemple :

CONTACT NAME = anode current.

II.7.5.d Interface

Les limites du semi-conducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface.

La syntaxe est la suivante :

INTERFACE [<parameters>] [18].

II.8 Méthodes numérique à sélectionner

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisées dans « Silvaco-Atlas » :

- ✓ Méthode de Gummel
- ✓ Méthode de Newton
- ✓ Méthode des blocs

L'exemple suivant illustre l'utilisation de la déclaration de méthode :

METHOD Newton Gummel

Dans cet exemple, les équations sont résolues par la méthode Gummel. Si la convergence n'est pas atteinte, les équations sont résolues en utilisant la méthode de Newton [19].

La méthode de Newton

C'est une procédure qui résout les équations en ensemble, on écrit les équations précédentes sous la forme résiduelle :

$$\begin{aligned} W_v(v, n, p) &= 0 \\ W_n(v, n, p) &= 0 \\ W_p(v, n, p) &= 0 \end{aligned}$$

Au début et en partant avec des valeurs initiales 0 0 0 v, n, p , les corrections $\Delta v, \Delta n, \Delta p$ sont calculées par le système jacobine suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{\delta W_v}{\delta v} & \frac{\delta W_v}{\delta n} & \frac{\delta W_v}{\delta p} \\ \frac{\delta W_n}{\delta v} & \frac{\delta W_n}{\delta n} & \frac{\delta W_n}{\delta p} \\ \frac{\delta W_p}{\delta v} & \frac{\delta W_p}{\delta n} & \frac{\delta W_p}{\delta p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta n \\ \Delta p \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} W_v \\ W_n \\ W_p \end{pmatrix}$$

Les solutions sont alors obtenus par :

$$\begin{aligned} V(k+1) &= V(k) + \Delta v(k) \\ n(k+1) &= n(k) + \Delta n(k) \\ p(k+1) &= p(k) + \Delta p(k) \end{aligned}$$

Ou k indique le nombre d'itération, et le système d'équation II.9 a trois équations pour chaque point du maillage [17].

II .9 Spécification de Solution

Les instructions de spécification de la solution sont :Log, Solve, Load et Save.

II .9.a Log

Log enregistre toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données.

L'exemple suivant montre un exemple d'utilisation de l'instruction LOG.

```
LOG OUTFILE = myoutputfile.log
```

L'exemple montre l'enregistrement de données dans le fichier « myoutputfile.log ».

II .9.b Solve (*Résoudre*)

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de l'instruction SOLVE.

```
SOLVE V2 = 0.8
```

```
SOLVE V2 = 0.9
```

II .9.c Load et Save (*chargement et sauvegarde*)

L'instruction LOAD introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes en tant que proposition initiale.

L'instruction SAVE permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie [18].

II.10 Analyse des résultats

Les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec « TonyPlot » [18].

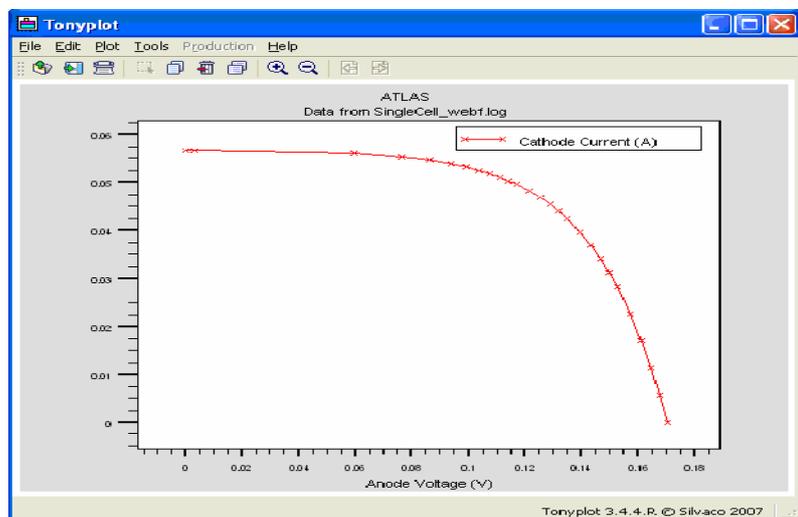


Figure II.13: Affichage graphique des résultats par « TonyPlot » [18].

II.11 Méthode de Moindre Carré

II.11.1 Introduction

Nous avons utilisé l'algorithme des moindres carrées pour extraire les valeurs du courant de saturation I_s , du facteur d'idéalité n et de la résistance série R_s et le potentiel interne de diffusion V_{bi} .

Ces paramètres sont définis à partir de deux méthodes, Le premier est celui d'une diode sans résistance série (I_s et n), le deuxième est celui d'une barrière de potentiel en série avec R_s .

Le modèle utilisé pratiquement pour décrire la relation entre le courant et la tension de polarisation dans les diodes à jonction pn, est donné par l'équation :

$$I = I_s \left\{ \exp \left(q \frac{V - R_s I}{nKT} \right) - 1 \right\} \quad (\text{II.1})$$

- I_s est le courant de saturation ou de fuite circulant dans la jonction quel que soit le type de polarisation.
- n est le facteur d'idéalité ou de qualité qui dépend de la tension de polarisation, il nous renseigne sur l'origine des courants circulant dans la jonction. Il prend la valeur 1 s'il s'agit d'un mécanisme de diffusion. Pour le mécanisme de recombinaison il prend la valeur 2. Lorsque les deux courants sont comparables, le facteur n a une valeur comprise entre 1 et 2.
- R_s est la résistance série, c'est un paramètre d'intérêt majeur, plus sa valeur est grande, plus la diode s'éloigne du modèle idéal. Elle est due à la résistance des régions neutres du matériau semi-conducteur et aux prises de contacts ohmiques métal semi-conducteur qui peuvent être réduites en sur dopant la région superficielle du semi-conducteur là où on veut établir le contact ohmique.
- Notre travail consiste à extraire numériquement les valeurs de I_s , n et R_s de la courbe théorique de l'équation (1) modélisant la caractéristique expérimentale I-V et ceci en appliquant la méthode des moindres carrées. Deux méthodes seront présentées et appliquées sur des caractéristiques I-V des diodes Schottky métal/SC.

II.11.2 METHODES DE CALCUL

A. Principe

La méthode des moindres carrés (Least Mean Square : LMS) est l'une des méthodes les plus utilisées pour modéliser des mesures expérimentales par une fonction analytique prédéterminée [3]. Cette méthode consiste à minimiser l'écart moyen absolu ou relatif entre l'ensemble de N

simulé $I_m(V_i)$ et l'ensemble des résultats $I_c(V_i)$ calculés par le modèle de l'équation (1). En d'autre terme, il s'agit de minimiser la fonction suivante :

$$Qlms = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\ln(I_c(V_i)) - \ln(I_m(V_i))}{\ln(I_m(V_i))} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II.2})$$

$Qlms$: écart moyen relatif.

V_i : tension de polarisation.

Le modèle donné par l'équation (1) montre que le courant I est une fonction implicite de la tension V ce qui ne permet pas d'appliquer la méthode LMS qui exige l'utilisation d'une fonction explicite.

Si on ne tient pas compte de l'effet de la résistance de fuite due au courant de saturation I_s , ce dernier est négligé devant le courant total I . Ceci est possible dans la mesure où $V > 3 kT/q$. Par conséquent l'équation (1) devient :

$$I = I_s \exp\left(q * \frac{V - R_s I}{nkT}\right) \quad (\text{II.3})$$

B. Détermination des Paramètres I_s et n :

Pour les faibles tensions de polarisation, la tension $R_s I$ est négligée devant V . Par conséquent, les valeurs de I_s et n peuvent être calculées par la méthode des moindres carrées.

A partir de l'équation (3), et comme $R_s I \approx 0$, nous pouvons écrire.

$$\ln I_c = \ln I_s + \frac{qV}{nkT} \quad (\text{II.4})$$

La valeur de l'extrapolation du courant à $V = 0$ de la droite représentée par l'équation (4) correspond à I_s . Quant à la valeur du facteur d'idéalité n , elle est proportionnelle à la pente de la même droite.

Le minimum de $Qlms$ correspond aux solutions des équations canoniques :

$$\frac{\partial Qlms}{\partial I_s} = 0; \frac{\partial Qlms}{\partial n} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{dQ_i}{dI_s} = \sum_i^m \frac{2}{I_s \ln I_m(i)} * \left(\frac{\ln I_s + \left(\frac{qV(i)}{nkT}\right) - \ln I_m(i)}{\ln I_m(i)} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{dQ_i}{dn} = \sum_i^m \frac{-2 \cdot q \cdot V(i)}{n^2 \cdot kT \cdot \ln I_m(i)} * \left(\frac{\ln I_s + \left(\frac{q \cdot V(i)}{nkT} \right) - \ln I_m(i)}{\ln I_m(i)} \right) \quad (\text{II.7})$$

-Ces deux équations forment un système non linéaire dont la résolution donne directement les valeurs de I_s et n .

-J'ai utilisé le logiciel MATLAB pour résoudre les deux équations que j'ai obtenus.

C. Détermination de résistance en série R_s et tension de seuil et barrière de potentiel Φ_{bi} .

Le calcul de R_s est effectué dans la partie non linéaire de la caractéristique $\ln(I)=f(V)$ correspondant aux fortes tensions de polarisation directe. Dans cette partie, le modèle (1) n'est plus respecté. On fait introduire dans l'expression du courant I le potentiel interne de diffusion V_{bi} . la différence de potentiel $V - R_s \cdot I$ n'est autre que V_{bi} .

Alors, la variation de I est modélisée par l'équation représentant la droite [20] :

C.1. Détermination tension de seuil V_{bi} :

$I_s = I_{s0}$ et $n = n_0$

$V_{bi} = V - R_s \cdot I$

$$I = I_s \cdot \exp\left(\frac{q V_{bi}}{nkT}\right)$$

$$\ln I = \ln I_s + \frac{q V_{bi}}{nkT}$$

$$V_{bi} = \frac{nkT}{q} * (\ln I - \ln I_s) \quad (\text{II.8})$$

C.2. Détermination Résistance en série:

$$R_s = \frac{\partial V}{\partial I} \quad (\text{II.9})$$

C.3. Détermination Barrière de potentiel Φ_{bi} :

$$I_s = A A^* T^2 \cdot \exp\left(\frac{-\Phi_{bi}}{kT}\right)$$

$A^* = 8.16 \text{ [A/cm}^2 \text{ K}^2\text{]}$.

$A = 25 \text{ [}\mu\text{m}^2\text{]}$.

$T = 300 \text{ [K]}$.

$$\Phi_{bi} = kT (\ln (A A^* T) - \ln I_s) \quad (\text{II.10})$$

-Les valeurs de V_{bi} et R_s et Φ_{bi} dans chapitre de résultats.

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement, les performances, les modules de simulation ATHENA et ATLAS, l'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO.

Nous avons appliqué deux méthodes d'optimisation basées sur l'algorithme des moindres carrés afin de déterminer les valeurs du courant de saturation I_s , du facteur d'idéalité n et la résistance série R_s et Le potentiel interne de diffusion V_{bi} et barrière de potentiel Φ_{bi} . Les résultats sont présentés dans le chapitre3.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre. Nous avons étudiées la différence entre la diode Schottky avec et sans couche d'oxyde pour expliquer l'effet d'épaisseur d'isolant sur les paramètres électriques tel que, le courant de saturation I_s , la facteur d'idéalité n , la résistance série R_s et la barrière de potentiel Φ_{bi} .

Nous avons simulées les caractéristiques courant-tension (I-V) et capacité-tension (C-V) d'une diode Schottky avec et sans couche d'oxyde par le logiciel Silvaco(Atlas).

III.2 La structures de diode M/S et MIS

Notre structure de référence que nous allons étudier (par simulation) est une diode Schottky réalisée sur un substrat en GaAs type n . Le contact métallique a été formé en or (Au), comme le montre la figure III.1. Le substrat est dopé à une concentration d'accepteur de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

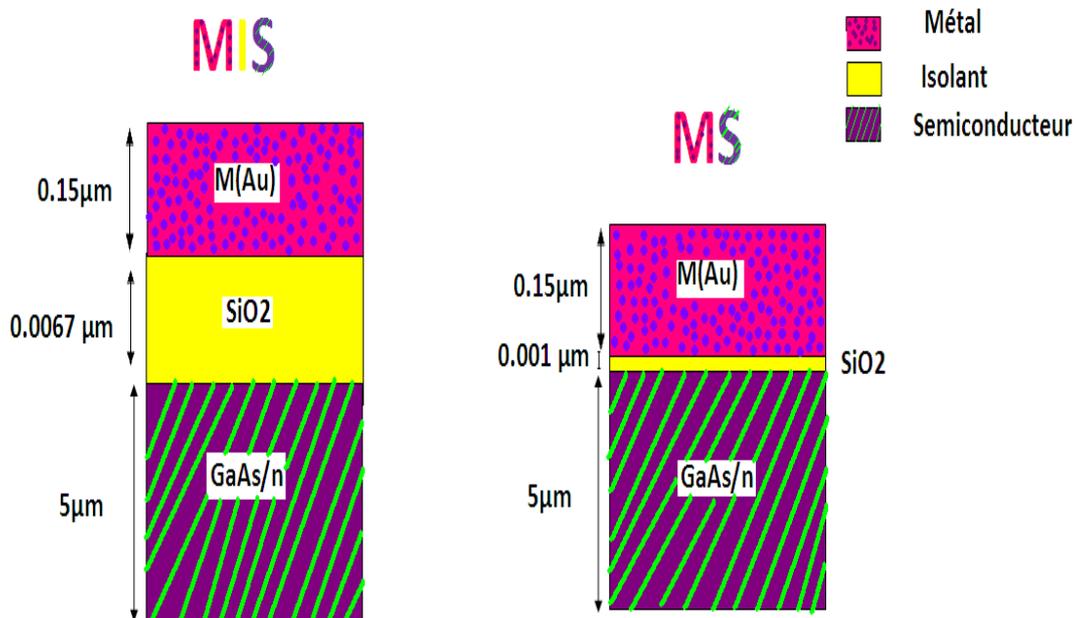


Figure III-1 : Diode Schottky Au/n-GaAs.

III.3 Paramètres de simulation

Le tableau III.1 donne des paramètres physiques, électriques et technologiques utilisé dans la simulation.

Tableau III.1 : paramètres physiques.

Paramètres	Valeurs
Affinité électronique $e\chi$ [eV]	0.43
La constante de Richardson pour les électrons A^* [$A/cm^2 K^2$]	8.16

III.4 Les caractéristiques courant-tension (I-V)

Après la simulation on a obtenir la caractéristique de courant-tension des deux structures MS et MIS.

La figure ci-dessus montre notre résultat de simulation de la caractéristique I-V pour la structure MS.

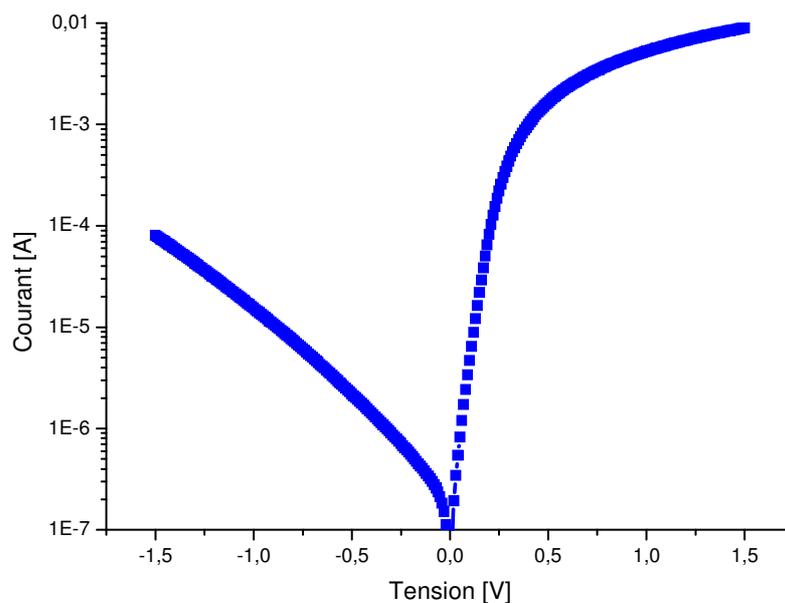


Figure.III.2 : Résultat de simulation de la caractéristique courant-tension de diode Scottky MS.

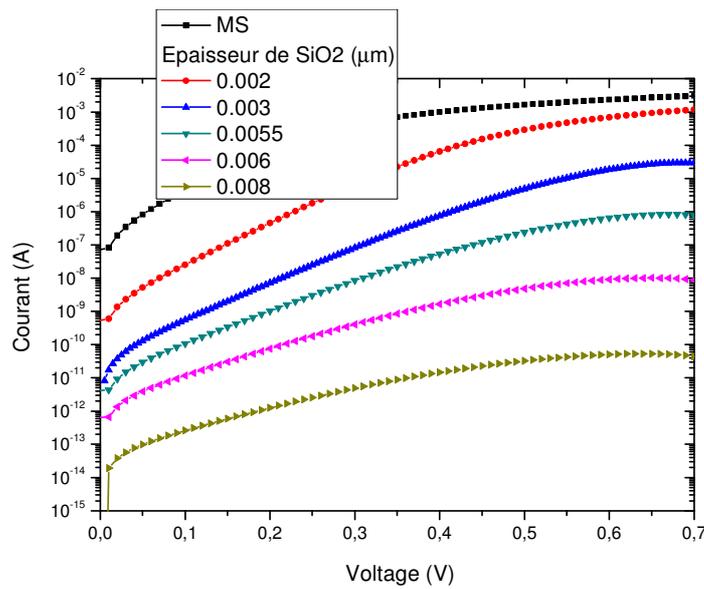


Figure III.3 : Résultat de simulation de la caractéristique courant-tension pour différents épaisseurs de SiO2.

D'après la figure III.6 on remarque que, en polarisation directe les caractéristiques I-V sur un échelle semi-logarithmique sont linéaires à des faibles tensions et deviennent considérablement de la forme linéaire après ces tensions, ceci est dû à l'effet de la résistance série R_s , la couche interface (SiO2), et les états d'interface à de tension suffisamment large. Pour une tension fixe de la figure III.6, le courant I est diminué avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolant SiO2. Ceci est dû à l'augmentation de la résistance série.

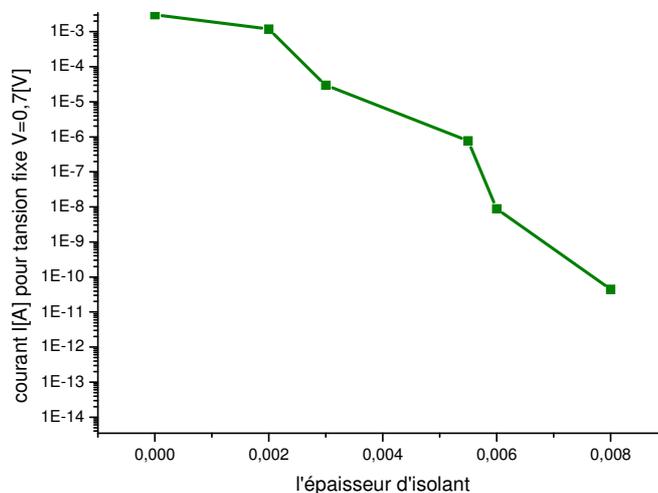


Figure III.4: Effet de l'épaisseur d'isolant sur courant pour tension fixe.

La figure III.4 montre que pour une tension fixe le courant déminué avec l'augmentation de l'épaisseur. Ceci est due à laugmentation de la résistance avec la'augmentation de l'épaisseur.

III.5 Extraction des paramètres par la méthode moindre carrée

Comme a été mentionné dans le chapitre II on utilise la méthode de moindre carrée pour extraire les paramètres essentielles tels que, le courant de saturation I_s , le facteur d'idéalité n , la résistance série R_s , le potentiel interne de diffusion V_{bi} et la barrière de potentiel Φ_{bi} . Ces valeurs sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau III.2 résultats des paramètres électriques.

	I_s [A]	n	R_s [Ω]	V_{bi} [V]	Φ_{bi}
MS	$2,5823 \cdot 10^{-7}$	1,3746	133,9350	0,2132	0,5864
MIS Epaisseur=0.002 [μm]	$1,6012 \cdot 10^{-9}$	1,4192	215,9766	0,2583	0,7179
Epaisseur=0.003 [μm]	$4,3743 \cdot 10^{-11}$	1,5708	$9,1955 \cdot 10^4$	0,2529	0,8109
Epaisseur=0.0055 [μm]	$1,2593 \cdot 10^{-11}$	1,8239	$2,0725 \cdot 10^5$	0,2685	0,8431
Epaisseur=0.006 [μm]	$2,2025 \cdot 10^{-12}$	2,4212	$3,0288 \cdot 10^6$	0,4767	0,8882
Epaisseur=0.008 [μm]	$1,9730 \cdot 10^{-13}$	3,6898	$6,2591 \cdot 10^{10}$	0,5616	0,9506

III.5.1 Effet de l'épaisseur d'isolant sur le courant de saturation

La figure (III.5), montre le courant de saturation en fonction de l'épaisseur de l'isolant SiO₂.

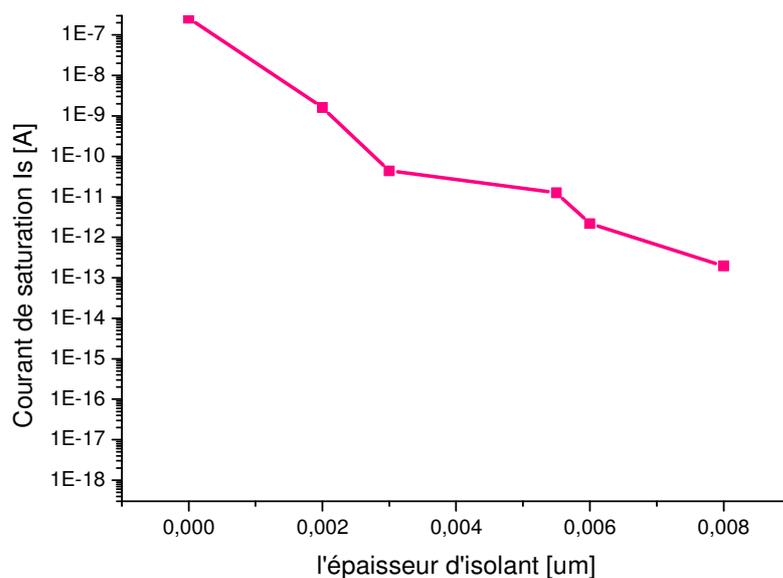


Figure III.5 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur le courant de saturation I_s .

D'après la figure III.5 on observe que le courant de saturation diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant SiO_2 .

III.5.2 Effet de l'épaisseur d'isolant sur le facteur d'idéalité n

Les facteurs d'idéalité sont calculés en polarisations directes et uniquement dans la partie linéaire. La figure suivante présente l'effet de l'épaisseur d'isolant sur le facteur d'idéalité n .

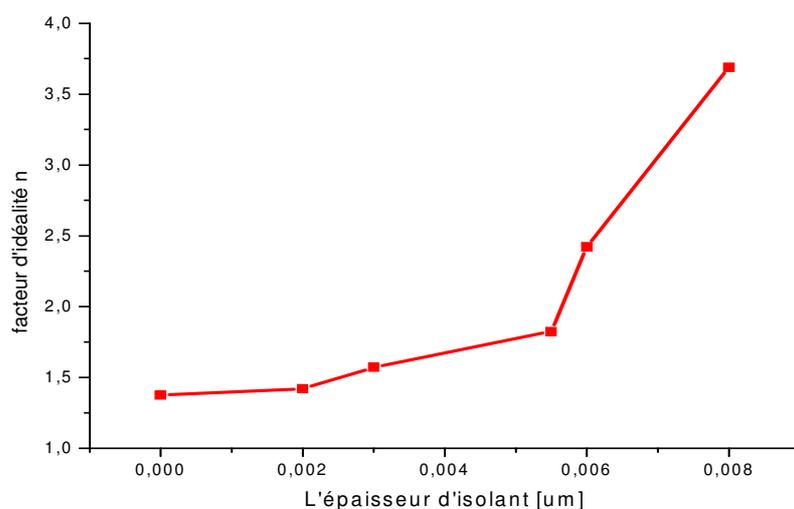


Figure III.6 : Effet de l'épaisseur d'isolant sur le facteur d'idéalité n .

Le facteur d'idéalité n augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant SiO_2 .

III.5.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la Barrière de potentiel

Les valeurs des barrières de potentiel sont calculées en utilisant l'équation(II.10), la figure ci-dessous représente la relation entre l'épaisseur de l'isolant et la barrière de potentiel.

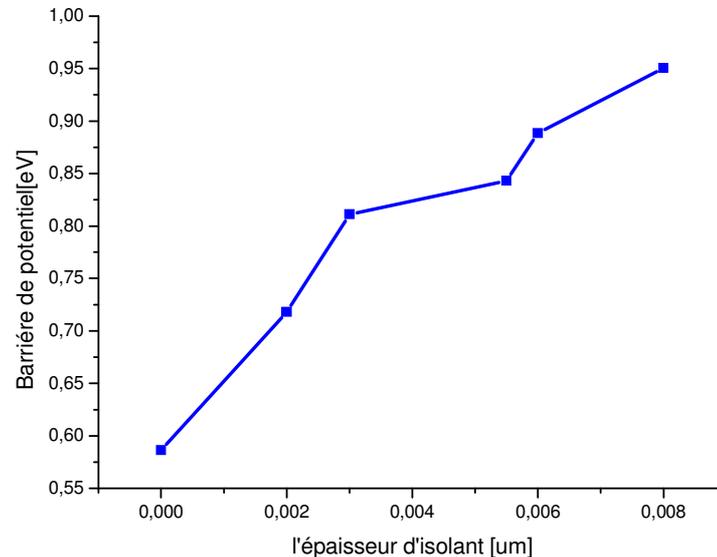


Figure III.7 : Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la barrière de potentiel Φ_{bi} .

Les valeurs de Φ_{bi} des diodes MS et MIS ont été calculés et montrés dans le tableau(III.1) à la température ambiante. D'après la figure III.7 on trouve que la barrière de potentiel pour la structure MS est inférieure à la barrière de potentiel de la structure MIS, ceci est dû à d'addition de la barrière de potentiel de l'oxyde.

III.5.4 Effet de l'épaisseur d'isolant sur la Résistance série.

La figure (III.8), montre l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur la résistance série.

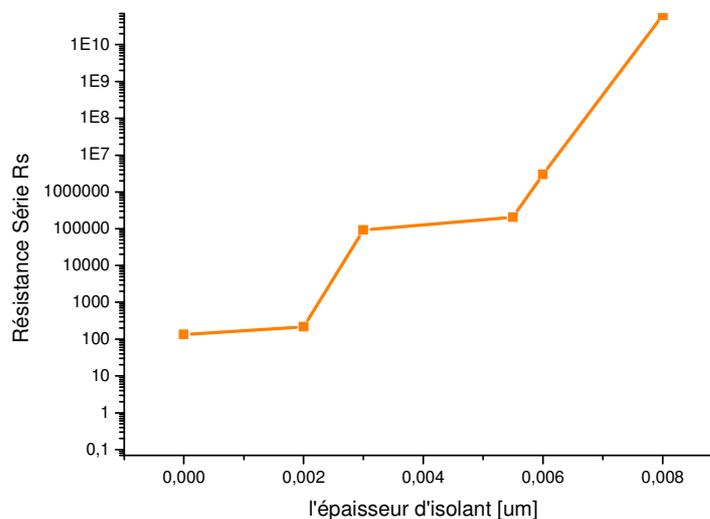


Figure III.8: Effet de l'épaisseur d'isolant sur résistance série.

Les valeurs de R_s obtenus en utilisant la relation (II.9). La figure III.8 montre que la valeur de R_s de la diode MS est plus petite que celle de la diode MIS. Ce comportement peut être attribué à l'existence de l'isolant (SiO_2) entre Au et GaAs. L'effet de la série la résistance R_s est généralement modélisée par la combinaison d'une résistance série R avec une diode. Le courant diminué lorsque la résistance augmente :

$$R_s = \frac{\partial V}{\partial I} \quad (\text{III.1})$$

III.5.5 Effet de l'épaisseur d'isolant sur la tension de seuil

La figure (III.9), montre l'influence de l'épaisseur de l'isolant sur la tension de seuil.

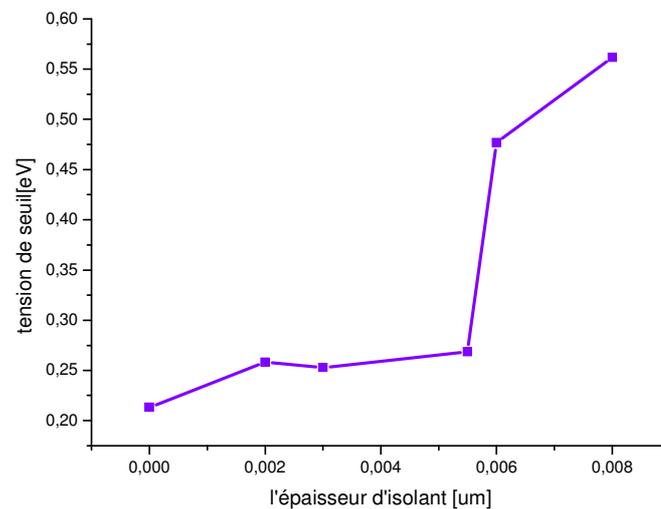


Figure III.9: Effet de l'épaisseur d'isolant sur tension de seuil.

D'après la figure III.9 en remarque que lorsque l'épaisseur de l'isolant augmente la tension de seuil augmente.

III.6 La caractéristique capacité-tension (C-V)

Les caractéristiques C-V c'est une propriété fondamentale des diodes à barrière de Schottky. On à utiliser le logiciel Silvaco pour obtenir la caractéristique capacité-tension de la diode Schottky pour la structure MS et MIS. Cette caractéristique est montrée sur la figure III.10 avec la couche d'isolant comme paramètre et pour une fréquence de 1 MHz.

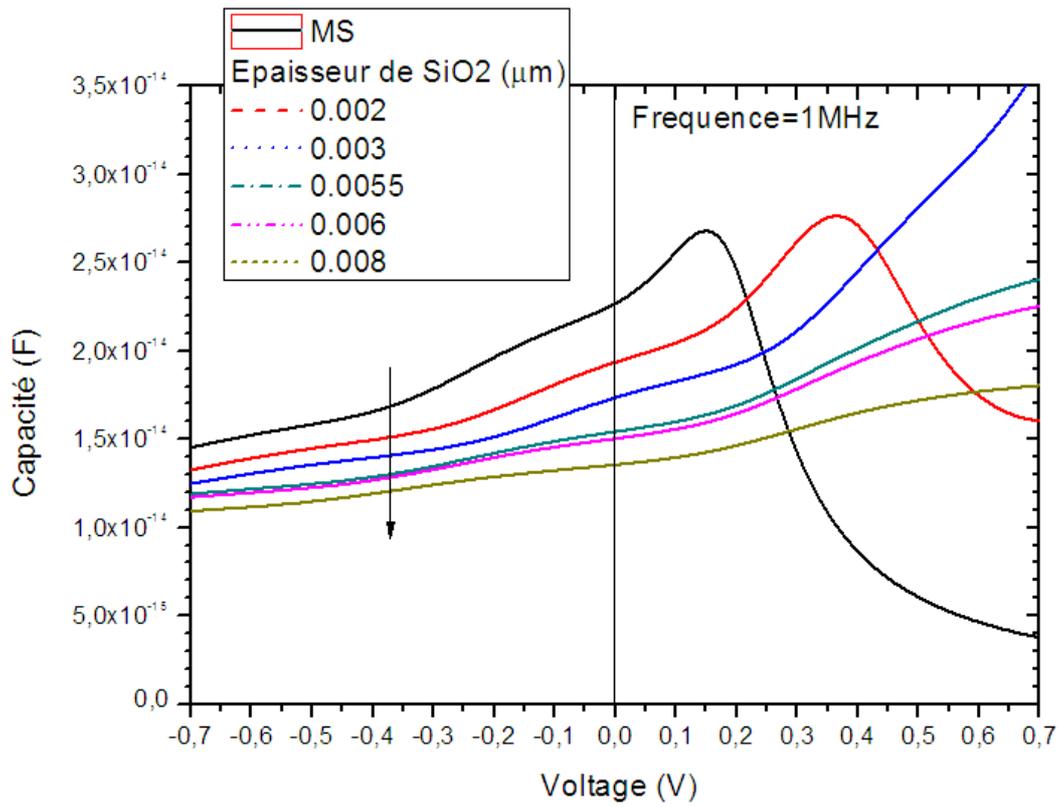


Figure III.10: Caractéristique capacité-tension(C-V).

D’après la figure(III.14), on observe que la capacité de la diode à barrière de Schottky est sensible aux États interface (figure III.15).

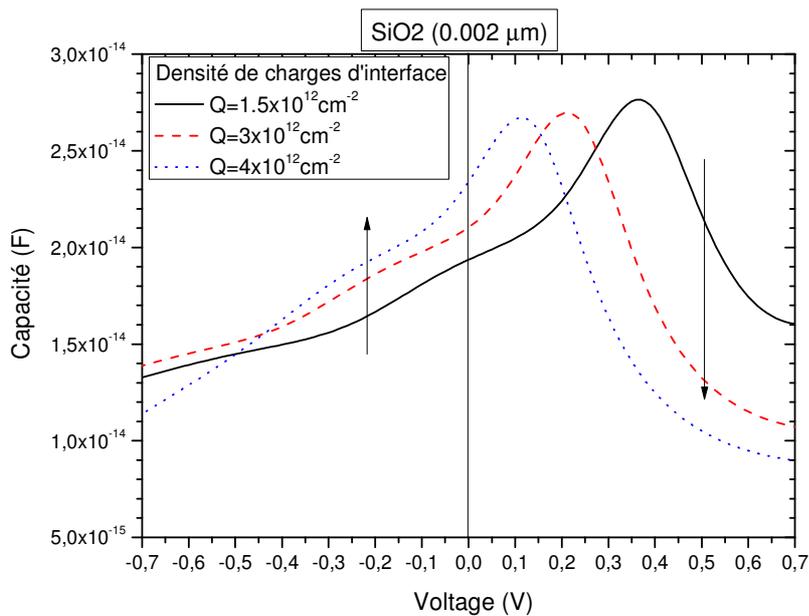


Figure III.15: Effet de la charge sur caractéristique C-V.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a simulé les caractéristiques I-V en polarisation direct pour différentes épaisseur de la couche isolante de la diode Schottky et sans couche isolante SiO₂ et d'après ces caractéristiques on à extraire les paramètres électriques tel que, le courant de saturation I_s , le facteur d'idéalité n , la résistance série R_s et la barrière de potentiel Φ_{bi} . L'effet de l'épaisseur d'isolant sur ces paramètres électriques sont étudiés.

Conclusion Générale

L'étude présentée dans ce travail est l'effet de l'isolateur (oxyde) sur les propriétés électriques courant-tension et capacité-tension d'une diode à barrière de Schottky d'or (SBD) formée sur un substrat d'arséniure de gallium de type n (n-GaAs). Extraction des principaux paramètres qui caractérisent la diode Schottky tel que, le facteur d'idéalité, la hauteur de la barrière, le potentiel interne de diffusion V_{bi} , la résistance série et le courant de saturation.

En polarisation directe les caractéristiques I-V sur un échelle semi-logarithmique sont linéaires à des faibles tensions et deviennent considérablement de la forme linéaire après ces tensions, ceci est due à l'effet de la résistance série R_s , la couche interface (SiO_2), et les états d'interface à de tension suffisamment large. Pour une tension fixe, le courant I est diminué avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolant SiO_2 . Ceci est due à l'augmentation de la résistance série avec la l'augmentation de l'épaisseur.

Le courant de saturation diminue et le facteur d'idéalité n augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant SiO_2 .

La barrière de potentiel pour la structure MS est inférieure à la barrière de potentiel de la structure MIS, ceci est dû à l'addition de la barrière de potentiel de l'oxyde.

La valeur de R_s de la diode MS est plus petite que celle de la diode MIS. Ce comportement peut être attribué à l'existence de l'isolant (SiO_2) entre Au et GaAs.

Lorsque l'épaisseur de l'isolant augmente la tension de seuil augmente. La capacité de la diode à barrière de Schottky est sensible aux états interface.

Finalement, beaucoup de travail reste à faire, on cite par exemple :

- Étude plus approfondie de l'effet de l'isolant SiO_2 sur la caractéristique C-V.
- Étude de l'effet d'autres isolants.
-

Bibliographies

Bibliographies

- [1] http://fr.wikipedia.org/wiki/Diode_Schottky (consulté le 19.06.2014)
- [2] Mr. BOUROUBA Farid, MODELISATION ET SIMULATION DES CONTACTS METAL-SEMICONDUCTEUR A BARRIERE INHOMOGENE Soutenu le: 05/10/ 2010
- [3] http://cedric.koeniguer.free.fr/polytech/phc/documents/cours/poly_phc.pdf (consulté le 24.12.2013)
- [4] Cours « Interface physique-chimie » Dispositifs électroniques (consulté le 24.12.2013)
- [5] Latreche Abdelhakim, NON-HOMOGENÉITÉS DANS LES STRUCTURES MÉTAL/SEMICONDUCTEURS Soutenu le: 04/07/ 2012.
- [6] http://easytp.cnam.fr/algani/images/ELE101_CNAM_5_2008.pdf (consulté le 12.02.2014).
- [7] Henry Mathieu Hervé Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques
- [8] TOUMI SIHEM, ETUDES DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES (CELLULES SOLAIRES, DIODES SCHOTTKY) EN UTILISANT LES ALGORITHMES GENETIQUES ET LE LANGAGE VHDL AMS Soutenu le: 04 /07 / 2012
- [9] Yazid BEDDIAFI, isation d'un transistor MESFET en GaAs en utilisant le simulateur atlas-silvaco, Soutenu publiquement le 03 juillet 2013
- [10] http://fr.wikipedia.org/wiki/Ars%C3%A9niure_de_gallium (consulté le 02.03.2014).
- [11] Mr. BOUROUBA Farid. MODELISATION ET SIMULATION DES CONTACTS METAL-SEMICONDUCTEUR A BARRIERE INHOMOGENE. Mémoire Magister. Physique. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF. 2010
- [12] KAGHOUCHE Bessem, ETUDE PAR TCAD-SILVACO D'UNE STRUCTURE MOS POUR LA REALISATION DE CAPTEURS ISFET : PARAMETRES TECHNOLOGIQUES ET ELECTRIQUES, Soutenu le : 17 Mai 2010
- [13] www.silvaco.com.
- [14] http://www.silvaco.com/content/kbase/atlas_detailed_overview.pdf (consulté le 26.02.2014)
- [15] <https://www.google.fr/search?newwindow=1&site=&source=hp&q=role+de+sumilation> (Consulté le 04.02.2014)

- [16] DEHIMI SAID , Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs, GaP),2011
- [17] Atlas.
- [18] Kateb Mohamed Nadjib, Mokrani Zakaria, Conception et simulation électrique d'une cellule solaire en Si par le logiciel Tcad-Silvaco, Juin 2011
- [19]http://www.silvaco.com/content/kbase/atlas_detailed_overview.pdf (consulté le 05.04.2014).
- [20] S. Keraï, K. Ghaffour et N.E. Chabane-Sari, Méthodes d'Extraction des Paramètres des Caractéristiques I-V de Diodes Bipolaires de Puissance en 6H-SiC à Structure JTE.