



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El-oued
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Télécommunications
Spécialité : System Des Télécommunications

Mémoire de Fin d'Etudes

MASTER ACADEMIQUE

Thème

ETUDE DE L'EFFET DE TEMPERATURE SUR LA DIODE SCHOTTKY

Présenté par :

MESAI AHMED Nader

LEMKADEM Imane

BENAOUDA Abir

Devant le jury composé de :

REHOUMA Ferhat

Prof

Président

MEDJOURI Abdelkader

MCA

Examineur

LAKHDAR Nacereddine

MCA

Encadreur

Année universitaire : 2019/2020

شكر وعرفان

الحمد لله ذي النعمة والجلال سبحانه وتعالى . ذو الكمال . الحمد لله الذي لولاه ما جرى قلم وما نطق لسان . اللهم لك الحمد حتى ترضى ولك الحمد اذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا . قال الله سبحانه وتعالى في حديثه قدسي "عبدني اني ارفعك لو تشكرني ازا لم تشكر من اجريتك لك النعمة على يدي" صدق رسول الله صلى وسلم فيما بلغ عن ربه رب العزة . يسعد اللسان بالاشادة بمن رسم الطريق لهذا البحث وقدم العون وأبناز البصيرة الاستباضية المخلصة والريادة الحققة . فالشكر الكبير للمشرفين : الأستاذ الفاضل "الخضر نصر الدين" بمتابعة هذا البحث بنصائحهم واهتمامهم طيلة مرحلة الدراسة .

ويبقى الشكر موصول الى عائلاتنا بكل أفرادها الدعم والمساندة والتشجيع ، وكافة من ساعدنا من قريب أو بعيد الى كل من كان له جهد وترك بصمة وأثر في هذا الدراسة .

جعل الله ما قدمتموه شاهد عليكم وبارك الله لكم جهودكم وسدد بالخير والعتاء دربتكم

. وجميلكم لن ننساه أبدا

من داوم الشكرا دامته عليه النعم

الطالبة : لمقدم ايمان ، مسعي أحمد نادر ، بن عودة عبيد

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES DIODES SCHOTTKY

I.1 Introduction	04
I.2 Les Composants D'une Diode Schottky	04
I.2.1 Présentation	04
I.3 Physique de la diode Schottky.....	05
I.3.1 Théorie du contact métal semi-conducteur.....	06
I.4 Formation de la hauteur de barrière	07
a) Travail de sortie	07
b) Affinité électronique	08
I.4.1 Jonction métal semi-conducteur.....	09
I.4.1.1 Avant contact.....	09
a) cas ou $\phi_m = \phi_{sc}$	09
b) cas ou $\phi_m > \phi_{sc}$ et $\phi_m < \phi_{sc}$	10
I.4.1.2 mise en contact (étude à l'équilibre).....	10
a) cas ou $\phi_m = \phi_{sc}$ à l'équilibre.....	10
b) cas ou $\phi_m > \phi_{sc}$ à l'équilibre	11
c) Etude des courants à l'équilibre	13
I.4.2 Mécanismes de transport du courant dans un contact métal semi-conducteur en polarisation direct.....	16
I.4.3 Polarisation de la diode Schottky.....	17
I.4.3.1 Polarisation direct	17
I.4.3.2 Polarisation inverse	19
I.4.4 Applications des diode Schottky	19
I.4.5 les avantages de la diode Schottky	20
I.5 Conclusion	21

CHAPITRE II : DESCRIPTION DU SILVACO-ATLAS

II.1 Introduction.....	23
II.2 L'objectif principal de la simulation.....	24
II.3 Description du logiciel Silvaco.....	24
II.3.1 DECKBuild.....	24
II.3.2 Atlas.....	24
II.3.3 Athena.....	26
II.3.4 Tonyplot.....	26

II.4	Spécification de la structure.....	27
II.4.1	Le maillage (Mesh).....	27
II.4.2	Région et matériaux.....	29
II.4.3	Electrode.....	30
II.4.4	Dopage.....	31
II.5	Spécification du modèle et des matériaux.....	32
II.5.1	Matériaux.....	32
II.5.2	Modèles.....	32
II.5.3	Les contacts.....	35
II.5.4	Interface.....	36
II.6	La méthode numérique à déterminer.....	36
II.7	Spécification du Solution.....	36
II.7.1	Log.....	36
II.7.2	Solve.....	37
II.7.3	Load and Save.....	37
II.7.4	Analyse.....	37
II.8	Conclusion.....	38

CHAPITRE III : Résultat de simulation

III.1	Introduction.....	40
III.2	But de la simulation d'un composant.....	41
III.3	Les structures des diodes Schottky.....	40
III.4	Paramètres de diode Schottky.....	41
III.5	Maillage.....	42
III.6	Les caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky.....	42
III.7	CONCLUSION	42
	CONCLUSION GENERALE.....	46
	Bibliographie	48

Résumé

Dans ce travail, on est intéressé d'étudier une diode Schottky en utilisant le simulateur numérique afin d'analyser le comportement de cette diode à des températures élevées, dans ce contexte, nous présentons dans la première partie une description détaillée sur la diode Schottky, et une théorie de la jonction métal-semi-conducteur pour les diverses cas de travail de sortie, en deuxième partie, nous décrivons un détail sur l'outil de simulation Atlas-Silvaco et les différents blocs ainsi que diverses commandes utilisées pour la modélisation de la diode Schottky, dans la troisième partie, nous avons employé le simulateur Atlas-Silvaco pour l'étude et la simulation de la diode Schottky, de plus, l'effet de la température sur la diode a été examiné et discuté afin d'étudier le comportement de cette diode à des températures élevées, les résultats obtenus ont montré que l'intensité du courant est significativement augmentée avec la croissance de la température, en particulier pour 500K, ceci rend la structure de la diode proposée très utile pour les applications à température élevée.

Mots clés: diode Schottky, jonction métal-semiconducteur, Atlas-Silvaco, simulation numérique.

Abstract

In this work, numerical simulations of Schottky diode using the simulator Atlas-Silvaco in order to analyze its behavior at high temperatures. In this context, we present in the first part a detailed description on the Schottky diode, and a theory of the metal-semiconductor junction for various work function cases. In the second part, we describe a detail of the Atlas-Silvaco simulation tool and the different blocks as well as various commands used for the modeling of Schottky diode. In the third part, we used the Atlas-Silvaco simulator to study and simulate the Schottky diode. Therefore, the effect of temperature on the diode has been examined and discussed in order to study its behavior at high temperatures. The obtained results showed that the intensity of the current is significantly increased with increasing of temperature, in particular for 500K, this makes the proposed diode structure very useful for high temperature applications.

Keywords: Schottky diode, metal-semiconductor junction, Atlas-Silvaco, numerical simulations

ملخص

في هذا العمل ، نحن مهتمون بدراسة الصمام الثنائي Schottky باستخدام المحاكى الرقمي لتحليل سلوك هذا الصمام الثنائي في درجات حرارة عالية. في هذا السياق ، نقدم في الجزء الأول وصفًا تفصيليًا عن الصمام الثنائي Schottky ونظرية تقاطع أشباه الموصلات المعدنية للحالات المختلفة لعمل الإخراج ، في الجزء الثاني ، نصف تفاصيل حول أداة محاكاة Atlas-Silvaco والكتل المختلفة بالإضافة إلى الأوامر المختلفة المستخدمة لنمذجة الصمام الثنائي Schottky, في الجزء الثالث ، استخدمنا محاكي Atlas-Silvaco لدراسة ومحاكاة الصمام الثنائي Schottky, بالإضافة إلى ذلك ، تم فحص ومناقشة تأثير درجة الحرارة على الصمام الثنائي لدراسة سلوك هذا الصمام في درجات الحرارة العالية، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن شدة التيار تزداد بشكل كبير مع زيادة درجة الحرارة ، خاصة عند 500 كلفن ، وهذا يجعل هيكل الصمام الثنائي المقترح مفيدًا جدًا لتطبيقات درجات الحرارة العالية.

الكلمات المفتاحية : صمام ثنائي شوتكي ، تقاطع أشباه الموصلات المعدنية ، أطلس سيلفاكو ، محاكاة عددية.

Liste des figures

Liste des figures :

CHAPITRE I :	
Figure I.1 : Figure I.1- Coupe schématique d'une diode Schottky	05
Figure I.2 : Figure I-2 Les niveaux d'énergie ;a) du métal ; b) du semi-conducteur.	06
Figure I.3 : Courbes caractéristiques de la densité de courant J en fonction de la tension V, (a) pour un contact Schottky et (b) pour un contact ohmique	06
Figure I.4 : : Définition du travail de sortie d'un métal	07
Figure I.5 : L'affinité électronique pour un semi-conducteur	08
Figure I.6 : Contact métal-semi-conducteur avant contact	09
Figure I.7 : Contact métal-semi-conducteur avec $\phi_m > \phi_{sc}$ et $\phi_m < \phi_{sc}$	10
Figure I.8 : Contact métal-semi-conducteur avec $\phi_m = \phi_{sc}$ à l'équilibre	11
Figure I.9 : Etablissement de l'équilibre thermodynamique d'une diode Schottky pour $\phi_m > \phi_{sc}$ (a) deux matériaux isolés, (b) diagramme complet	12
Figure I.10 : Etude des deux cas : semi-conducteur de type N et P	13
Figure I.11 : Etablissement de l'équilibre thermodynamique d'une diode Schottky pour $\phi_m < \phi_{sc}$, (a) deux matériaux isolés, (b) diagramme loin de la jonction, (c) diagramme complet, (d) étude des deux cas: semi-conducteur de type N et P	15
Figure I.12 : Les trois grands types de courant dans une diode Schottky: (a) définition des barrières de potentiel, (b) courant thermoélectronique, (c) courant tunnel, (d) courant tunnel assisté par agitation thermique	16
Figure I.13 : Modes de transport des électrons dans un contact métal/semi-conducteur type-n polarisé en direct	17

Figure I.14 : Caractéristique courant – tension d’une diode Schottky en polarisation directe	18
Figure I.15 : Caractéristique courant – tension d’une diode Schottky en polarisation inverse	19
CHAPITRE II :	
Figure II.1: Interdisciplinarité de la simulation	23
Figure.II.2: Le rôle de simulation	24
Figure II.3 : les entres et les sorties de Atlas	25
Figure II.4 : Ordre des commandes sous ATLAS	26
Figure.II.5 : L’environnement Tonyplot	27
Figure.II.6: Spécification de maillage à 2D (x; y)	29
Figure.II.7: La structure avec les régions et les matériaux.	30
Figure.II.8: Spécification des électrodes	31
Figure II.9: Spécification de dopage	32
Figure II.10: Mécanisme de recombinaison SRH	34
CHAPITRE III	
Figure III.1 :structure générale de la diode Schottky	41
Figure III.2: Maillage à deux dimensions (x,y)	42
Figure III.3: Caractéristique courant-tension du contact métal/semi-conducteur concernant la température de 300k	43
Figure III.4: Caractéristique courant-tension du contact métal/semi-conducteur concernant la température des trois températures (500k /400k /300k)	43

Tableaux des abréviations

Tableaux des abréviations :

Q	Valeur absolue de la charge de l'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)
ϕ_m	Le travail de sortie du métal
χ	L'affinité électrique du semi-conducteur
ϕ_{Bn}	Barrière de potentiel de la diode Schottky à $V=0\text{V}$ (SBH)
E_F	énergie du niveau de Fermi
E_v	du Énergie du niveau le plus haut de la bande de valence dans le volume semi-conducteur.
E_C	énergie de la bande de conduction
E_χ	Affinité électronique du semi-conducteur.
Si	Silicium.
T	Température (K).
V	La tension (V).
I	Courant électrique (A)
MS	Métal semi-conducteur

LISTE DE TABLEAUX

Liste de tableaux :

Tableaux	(a) Les travaux de sortie de quelques métaux, (b) l'affinité électronique et	09
I.1	le travail de sortie de quelques matériaux semi-conducteurs .	
Tableau II.1	Modèles dépendant de la recombinaison et génération des porteurs .	34
Tableau II.2	Modèles de la mobilité	35
Tableau	Paramètres de simulation.	41
III.1		

Introduction Générale

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 également un temps de commutation très rapide, ceci permet la détection des signaux faibles et hyperfréquences, la rendant utile dans différents domaines.

Dans la fabrication des diodes, l'étude de leurs propriétés électriques est très importante pour la détermination de leurs effets sur les caractéristiques de ces composants, l'analyse des caractéristiques des diodes Schottky à température ambiante ne donne pas des informations détaillées sur leur processus de conduction ou de la nature de la formation de la barrière Métal/Semi-conducteur, la dépendance en température des caractéristiques I-V et C-V nous permettent de mieux comprendre les différents aspects des mécanismes de conduction, et d'évaluer les principaux paramètres qui caractérisent la diode Schottky tels que le facteur d'idéalité, la hauteur de la barrière, la résistance série et le courant de saturation.

L'objectif de ce travail est d'étudier par simulation numérique une diode à barrière Schottky en utilisant le simulateur Atlas Silvaco, en outre, l'effet de la température sur les caractéristiques de la diode Schottky va être discuté afin de décrire le comportement de ces diodes pour les applications des capteurs de températures, dans ce contexte, notre mémoire s'articule sur trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter une description détaillée sur la diode Schottky. Ensuite, nous allons donner une théorie de la jonction métal-semiconducteur pour les diverses cas de travail de sortie, en outre, les différentes conditions de polarisation de la diode Schottky et sa caractéristique vont être décrits. En fin, nous donnons quelques domaines d'applications et quelques avantages de la diode Schottky.

Dans le deuxième chapitre, nous allons montrer en détail l'outil de travail qui est le programme Silvaco. Par la suite, les différents blocs et les diverses commande utilisés pour la modélisation de la diode Schottky vont être présentés afin d'étudier le comportement du dispositif.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et simulation numérique de la diode Schottky, de plus, l'effet de la température sur la diode va être étudié et discuté afin de connaître le comportement de ces dispositifs pour les applications à température élevée.

*CHAPITRE I: Généralités
sur les diodes Schottky*

I.1 Introduction

La diode Schottky est un contact de surface d'un métal avec un semi-conducteur, les premières diodes furent découvertes par F. BRAUN en 1874 [1], bien que très anciennes, mais elles restent l'étude de recherche jusqu'à nos jours grâce à ces nombreuses applications. En fait, les diodes Schottky ont été largement utilisés pour une grande variété d'applications telles que les cellules solaires, photo détecteurs, transistors Schottky, des mélangeurs à microondes, diode Zener et divers circuits intégrés, la diode Schottky peut également être utilisée comme un condensateur variable dans des circuits paramétriques pour la multiplication de fréquence [1-2].

I.2 Les composants d'une diode Schottky

Une diode Schottky a les mêmes composants de base qu'une autre diode, mais ses matériaux principaux diffèrent de ceux des diodes PN ordinaire, qui sont les plus courants.

Ces composants de base incluent les fils qui la relient au circuit et les matériaux semi-conducteurs qui assurent son fonctionnement, les diodes standards sont basées sur la jonction de deux semi-conducteurs de type N, le cœur d'une diode Schottky réunit un matériau semi-conducteur de type N (type P) et un métal, les métaux utilisés incluent le chrome et le tungstène, mais aussi des métaux précieux comme le platine et palladium, la diode Schottky a une chute de tension directe réduite, qui la rend très utile dans une multitude d'applications. Outre sa rapidité de commutation, cette simple variation de construction leur confère une très grande utilité [3].

I.2.1 Présentation

Les diodes Schottky sont des composants très courants dans le secteur de l'électronique. Elles sont utilisées dans des dispositifs de toutes tailles, allant des unités à basse puissance aux équipements industriels de grandes dimensions, ces composants appartiennent à la catégorie des diodes, ce sont des composants électroniques qui régulent le flux électrique, autorisant son passage dans une seule direction et l'interdisant dans l'autre, les diodes sont spécifiées pour fonctionner à différents niveaux de courant et de tension, toute utilisation dans des capacités incompatibles avec leurs spécifications peut provoquer leur défaillance [4]

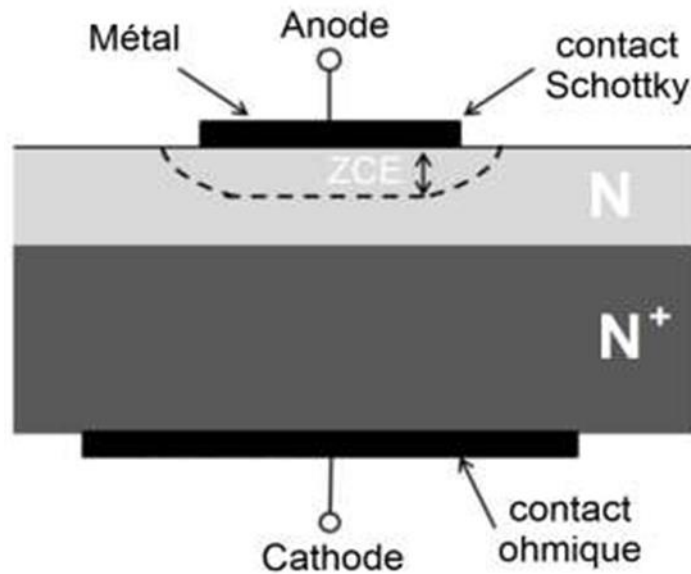


Figure I.1- Coupe schématique d'une diode Schottky

Le déplacement des porteurs majoritaires et l'absence de capacité de diffusion dans la diode Schottky contrairement à une diode PN la rendent performante pour des applications fonctionnant à très haute fréquence, en revanche, son courant en inverse est plus élevé et sa tension de claquage plus faible que ceux de diodes varicap (jonction PN).

I.3 Physique de la diode Schottky

Pour étudier la jonction métal- semi-conducteur, il faut connaître :

- Le travail de sortie du métal: ϕ_m (donnée structurale).
- L'affinité électrique du semi-conducteur : χ (donnée structurale).

En première approximation, la barrière qui se forme à la jonction est :

$$E_b = \phi_m - \chi \quad (I.1)$$

Sur la figure I-2 sont représentés les niveaux d'énergie du métal et ceux du semi-conducteur de type N, dans ce semi-conducteur le niveau d'énergie E_F est proche de E_c [5].

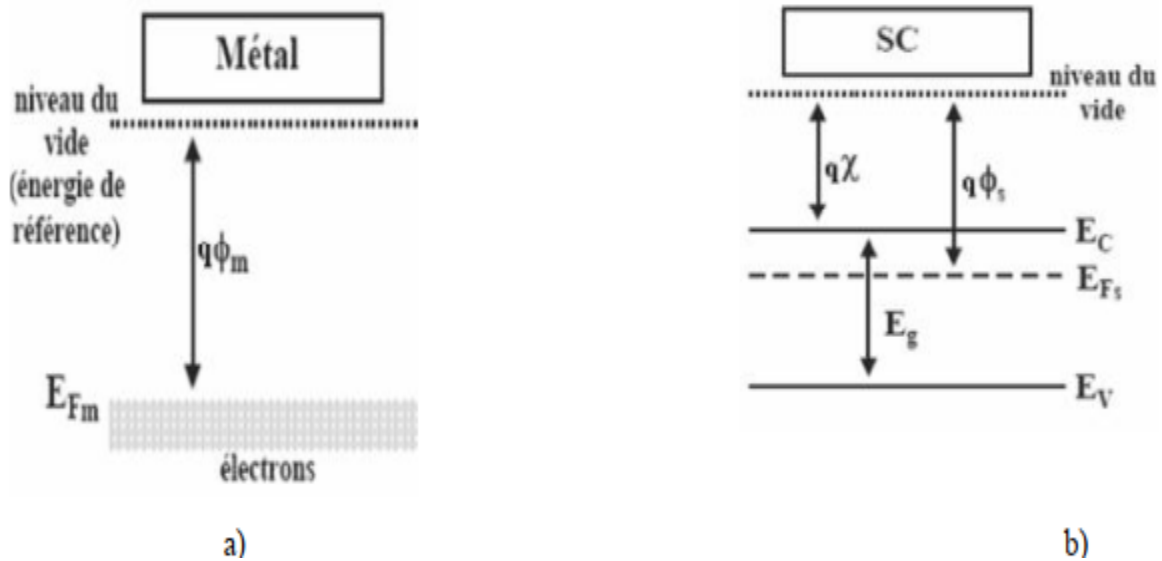


Figure I-2 Les niveaux d'énergie ;a) du métal ; b) du semi-conducteur.

I.3.1 Théorie du contact métal-semi-conducteur

Les contacts métal-semi-conducteurs (MS) peuvent être simplement réalisés en déposant une couche métallique par la technique d'évaporation sous vide ou par la méthode de pulvérisation cathodique à la surface d'un cristal semi-conducteur [6].

Dans la pratique, les contacts (MS) peuvent se comporter comme des contacts redresseurs (Schottky) ou comme des contacts ohmiques, la figure (I.3) illustre la caractéristique électrique de la densité du courant en fonction de la tension de polarisation pour un contact redresseur (figure. I.3.b) et pour un contact ohmique, (figure. I.3.a) le contact redresseur bloque le passage du courant en inverse et possède une faible tension de seuil en direct comme le montre dans la figure (I.3), le contact ohmique, quant à lui, laisse passer le courant quelle que soit la polarisation (voir la figure I.3) [7].

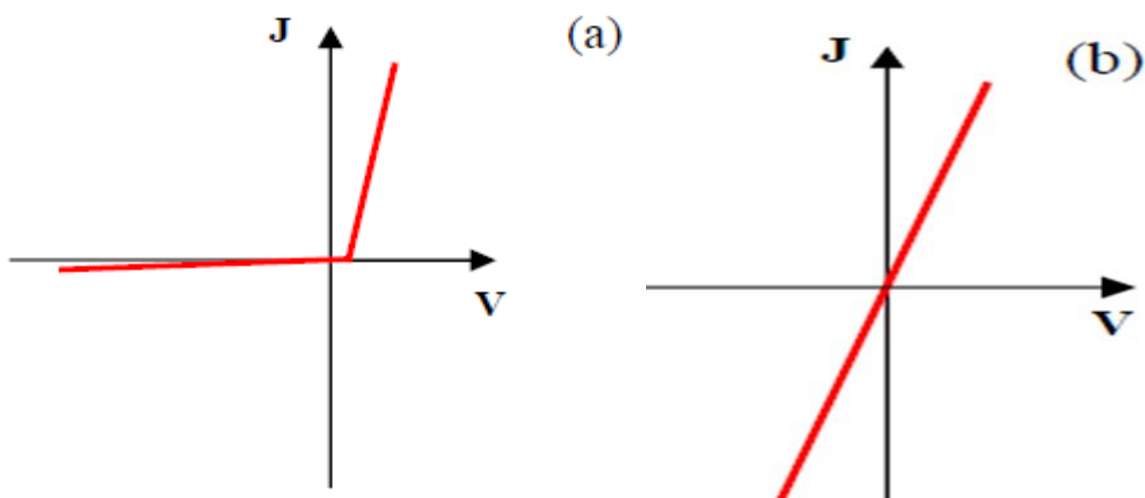


Figure I.3: Courbes caractéristiques de la densité de courant J en fonction de la tension V , (a) pour un contact Schottky et (b) pour un contact ohmique

I.4 Formation de la hauteur de barrière

Le contact métal semi-conducteur est peut être ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type du semi-conducteur [8]

a. Travail de sortie

Dans le métal, l'électron de conduction est soumis à un ensemble de forces d'interaction dont la résultante est nulle. Il en résulte que cet électron est libre de se déplacer sous l'action d'un champ appliqué par exemple. Quand l'électron atteint la surface du métal, la compensation des forces d'interaction entre-elles n'est plus totale, l'électron est retenu à l'intérieur du métal pour extraire cet électron, il faut lui fournir de l'énergie.

Au zéro degré absolu, tous les électrons libres sont situés dans la bande de conduction au-dessous du niveau de Fermi. Il en résulte que l'énergie minimum qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal, est l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi pour l'amener au niveau du vide NV, cette quantité est appelée travail de sortie du métal [9].

Le travail de sortie d'un métal (figure. I.4) est donc donné par l'expression suivante :

$$q\phi_m = NV - E_F \quad (I.2)$$

Où NV représente l'énergie d'un électron extrait du corps et sans vitesse initiale, c'est l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du corps étudié.

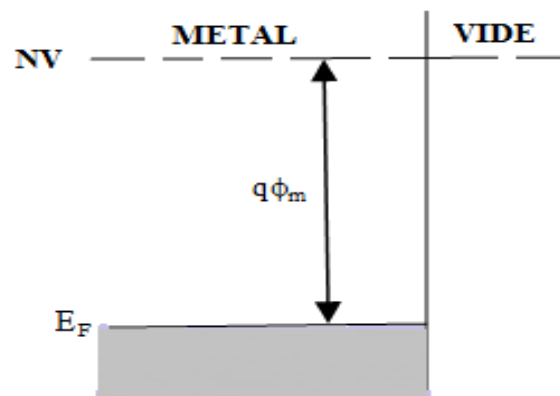


Figure I.4: Définition du travail de sortie d'un métal

b. Affinité électronique

Dans les semi-conducteurs et les isolants, le travail de sortie est défini de la même manière, cependant, pour les semi-conducteurs, la position du niveau de Fermi dépend du dopage et n'est pas une constante physique du matériau. Sauf pour les semi-conducteurs dégénérés, il n'y a pas d'électron au niveau de Fermi, on définit alors l'affinité électronique comme l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bas de la bande de conduction pour l'amener au niveau du vide.

Cette grandeur est une constante physique du semi-conducteur : et est donnée par l'expression [9] :

$$q \chi_{sc} = NV - E_c \quad (I.3)$$

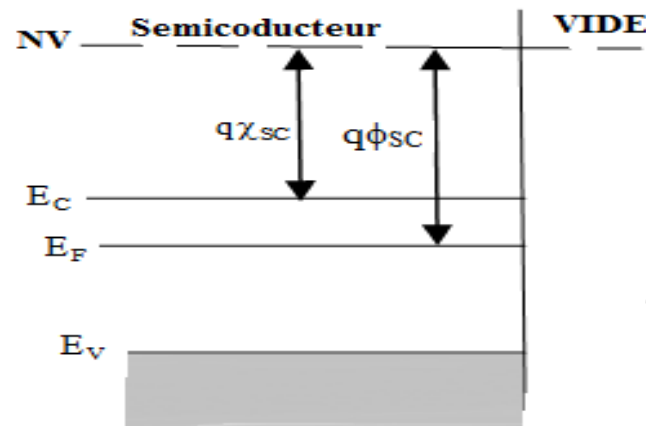


Figure I.5 : L'affinité électronique pour un semi-conducteur

Le tableau (I.1) donne le travail de sortie et l'affinité électronique de quelques métaux et de quelques matériaux semi-conducteurs utilisés en microélectronique [9].

Métaux		SC		
Métal	$e\Phi_m(\text{eV})$	SC	$e\chi(\text{eV})$	$e\Phi_{sc}(\text{eV})$
Li	2.3	Si	4.01	5.13
Na	2.3	Ge	4.13	4.79
K	2.2	AlP	3.44	5.89
Rb	2.2	AlAs	3.5	5.66
Cs	1.8	AlSb	3.6	5.2
Fr	1.8	GaP	4.3	6.55
Cr	4.6	GaAs	4.07	5.5
Fe	4.4	GaSb	4.06	4.74
Ni	4.5	InP	4.38	5.65
Al	4.3	InAs	4.9	5.26
Cu	4.4	InSb	4.59	4.66
Ag	4.3	ZnS	3.9	7.48
Au	4.8	ZnSe	4.09	6.76
Pt	5.3	ZnTe	3.5	5.76
		CdS	4.5	6.92
		CdSe	4.95	6.65
		CdTe	4.28	5.73
		SiO2	1.1	

Tableaux I.1: (a) Les travaux de sortie de quelques métaux, (b) l'affinité électronique et le travail de sortie de quelques matériaux semi-conducteurs

I.4.1 Jonction métal- semi-conducteur

Avant contact

Soit le travail de sortie du métal, le travail de sortie du semi-conducteur l'affinité électronique du semi-conducteur.

a. Cas $\Phi_m = \Phi_{sc}$

Dans ce cas, les niveaux du 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/semi-conducteur et aucun échange d'électrons ne se fait entre les matériaux puisque le niveau de Fermi n'a pas été modifié [8].

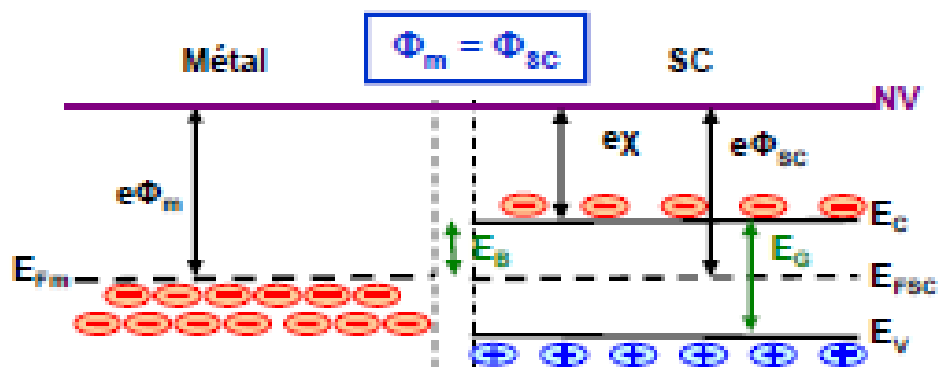


Figure I.6: Contact métal-semi-conducteur avant contact

b. Cas $\phi_m > \phi_{sc}$ et $\phi_m < \phi_{sc}$

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.

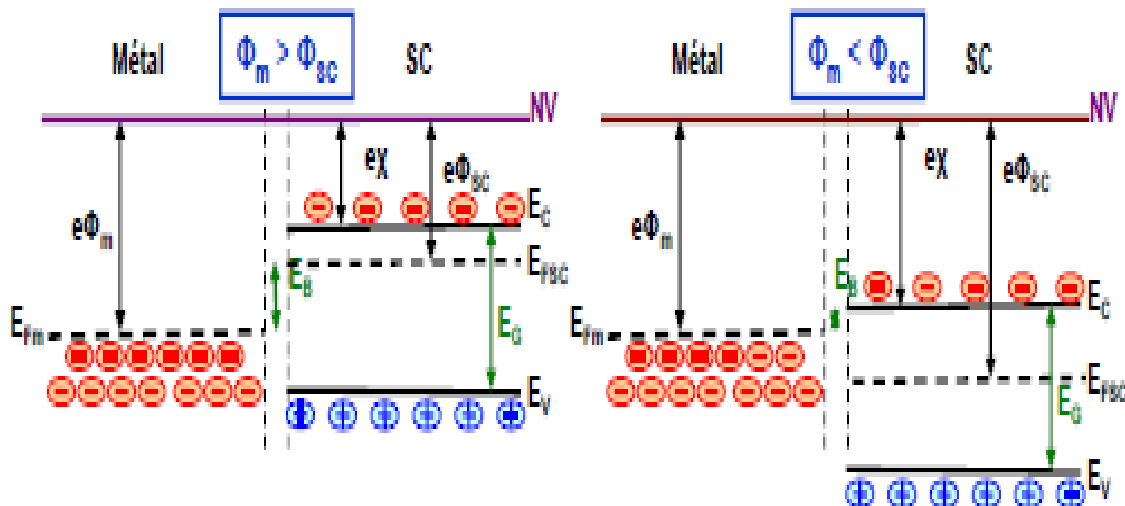


Figure I.7 : Contact métal-semi-conducteur avec $\phi_m > \phi_{sc}$ et $\phi_m < \phi_{sc}$

I.4.1.2 Mise en contact (étude à l'équilibre)

a. Cas $\phi_m = \phi_{sc}$ à l'équilibre

Une fois les matériaux sont 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 (régime de bandes plates), on peut dire dans ce cas que cette mise en contact est sans échange d'électrons entre le métal et le semi-conducteur [10].

→ Régime de bandes plates

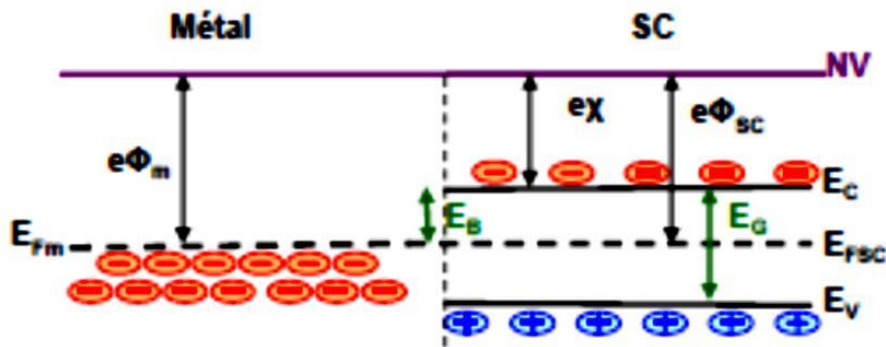


Figure I.8 : Contact métal-semi-conducteur avec $\phi_m = \phi_{sc}$ à l'équilibre

b. Cas $\phi_m > \phi_{sc}$ à l'équilibre

Dans ce cas, on ne va pas préciser le type du semi-conducteur, car il n'est pas nécessaire de connaître le type du semi-conducteur pour déterminer l'allure des bandes d'énergie, en revanche, le type du dopage permet de déterminer la nature de zone de charge d'espace (ZCE) de la jonction (accumulation ou zone de désertion), la figure I.8.a montré le diagramme de bandes d'énergie dans le cas où le métal et le semi-conducteur sont isolés l'un de l'autre. Chaque système est caractérisé par son propre niveau de Fermi, les deux niveaux du vide sont alignés. Les deux niveaux de Fermi ne sont pas alignés, puisque les travaux de sortie des deux matériaux sont différents. Lorsque les deux matériaux sont accolés (figure I.9. b), et puisque le niveau de Fermi du semi-conducteur est au-dessus du niveau de Fermi du métal : il va donc y avoir une diffusion des électrons du semi-conducteur vers le métal, cette diffusion va permettre un alignement des deux niveaux de Fermi pour permettre d'atteindre un état d'équilibre, la densité d'état étant beaucoup plus élevée dans le métal que dans un semi-conducteur, les électrons diffusés vont se trouver localisés dans le métal en surface uniquement, les bandes d'énergie côté métal, resteront identiques à l'équilibre initial, le départ des électrons provenant du semi-conducteur va en revanche provoquer une modification des bandes d'énergie sur une certaine distance, côté semi-conducteur [11].

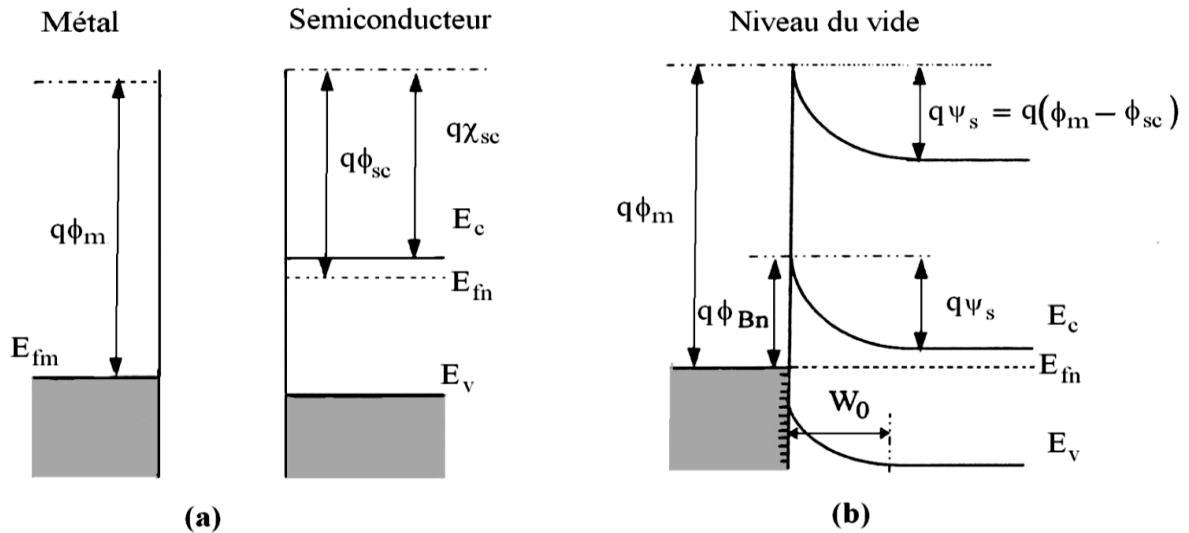


Figure I.9: Etablissement de l'équilibre thermodynamique d'une diode Schottky pour $\phi_m > \phi_{sc}$ (a) deux matériaux isolés, (b) diagramme complet

Coté métal, la barrière de potentiel est égale à la différence entre le travail de sortie du métal et l'affinité électronique du semi-conducteur [6]:

$$\begin{aligned} q\phi_{Bn} &= q(\phi_m - \chi_{sc}) \quad (a) \quad (I.4) \\ &= q\psi_s + (E_c - E_{fn}) \quad (b) \end{aligned}$$

La hauteur de la barrière de potentiel (dite aussi potentiel électrique) vue du côté semi-conducteur est alors égale à la différence entre le travail de sortie du métal et celui du semi-conducteur [6] :

$$q\psi_s = q(\phi_m - \phi_{sc}) \quad (I.5)$$

Deux cas sont à envisager : le semi-conducteur est soit de type N, soit de type P (figure I.10).

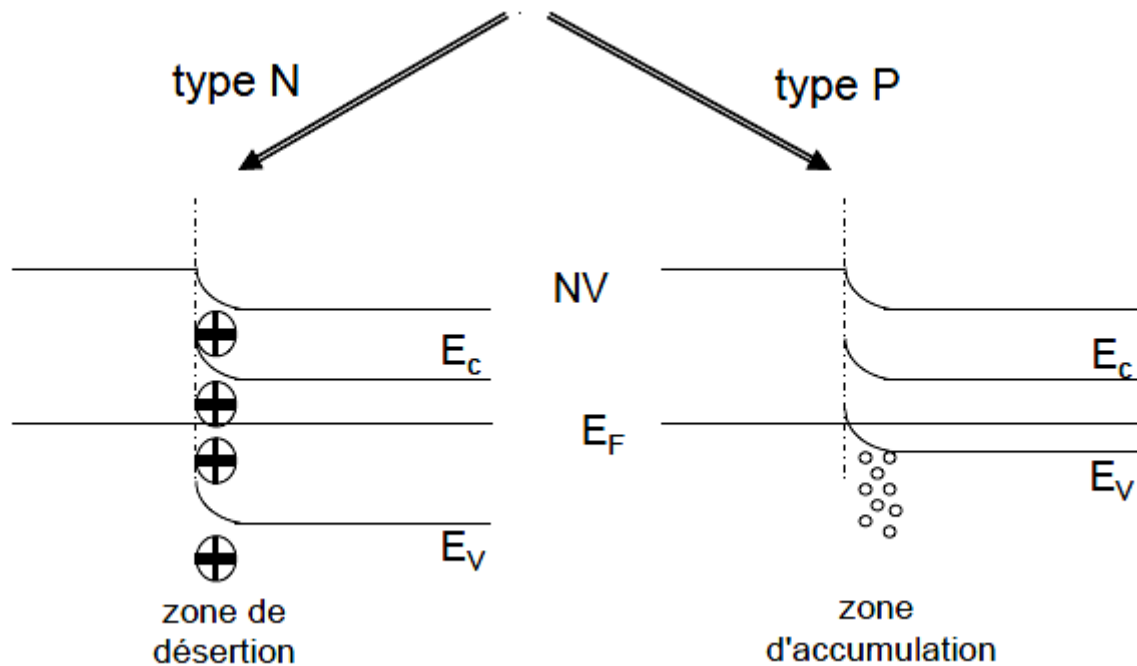


Figure I.10: Etude des deux cas : semi-conducteur de type N et P

- Si le semi-conducteur est de type N, le départ des électrons, proche de la jonction, va définir une zone de désertion (les atomes donneurs ne sont plus compensés par des électrons). Cette zone est chargée négativement.
- Si le semi-conducteur est de type P, les électrons vont diffuser également vers le métal. Ces porteurs étant minoritaires, le semi-conducteur va générer des paires électrons/trous pour compenser ce départ et tenter de restaurer l'équilibre initial, les électrons générés sont diffusés vers le métal, on a donc un surplus de trous : une zone d'accumulation (de trous) apparaît en surface, Cette zone est chargée positivement.

Remarques

- ✓ Une zone de désertion est une zone chargée dépourvue de porteurs libres, la charge provient des atomes donneurs ou accepteurs (selon le type de semi-conducteur), c'est donc une zone fortement résistive.
- ✓ Une zone d'accumulation est également une zone chargée, mais elle comporte un très grand nombre de porteurs (supérieur à la densité de porteurs majoritaires définis à l'équilibre), cette zone est donc faiblement résistive.

La figure I.11 montre le même raisonnement avec $\phi_m < \phi_{sm}$

c. Etude des courants à l'équilibre

On distingue trois grands types de courant dans une diode Schottky :

- **Le courant thermoélectronique** (figure I.12b) Il provient des électrons ou des trous de la zone quasi neutre et du métal, ayant une énergie suffisante pour franchir la barrière de potentiel, c'est par agitation thermique que certains électrons (ou certains trous) peuvent passer au-dessus de cette barrière et se retrouver dans le l'autre matériau de la jonction, c'est le courant principal de la diode Schottky.
- **Le courant tunnel** (figure I.12c) certains électrons peuvent franchir la barrière par effet tunnel et participer à un courant, ce courant sera important dans certains cas.
- **Un courant mixte** thermoélectronique et tunnel (figure I.12d) certains électrons peuvent avoir une énergie inférieure à celle de la barrière de potentiel et passer à travers par effet tunnel (courant tunnel assisté par agitation thermique), ce courant est plus difficile à évaluer [11].

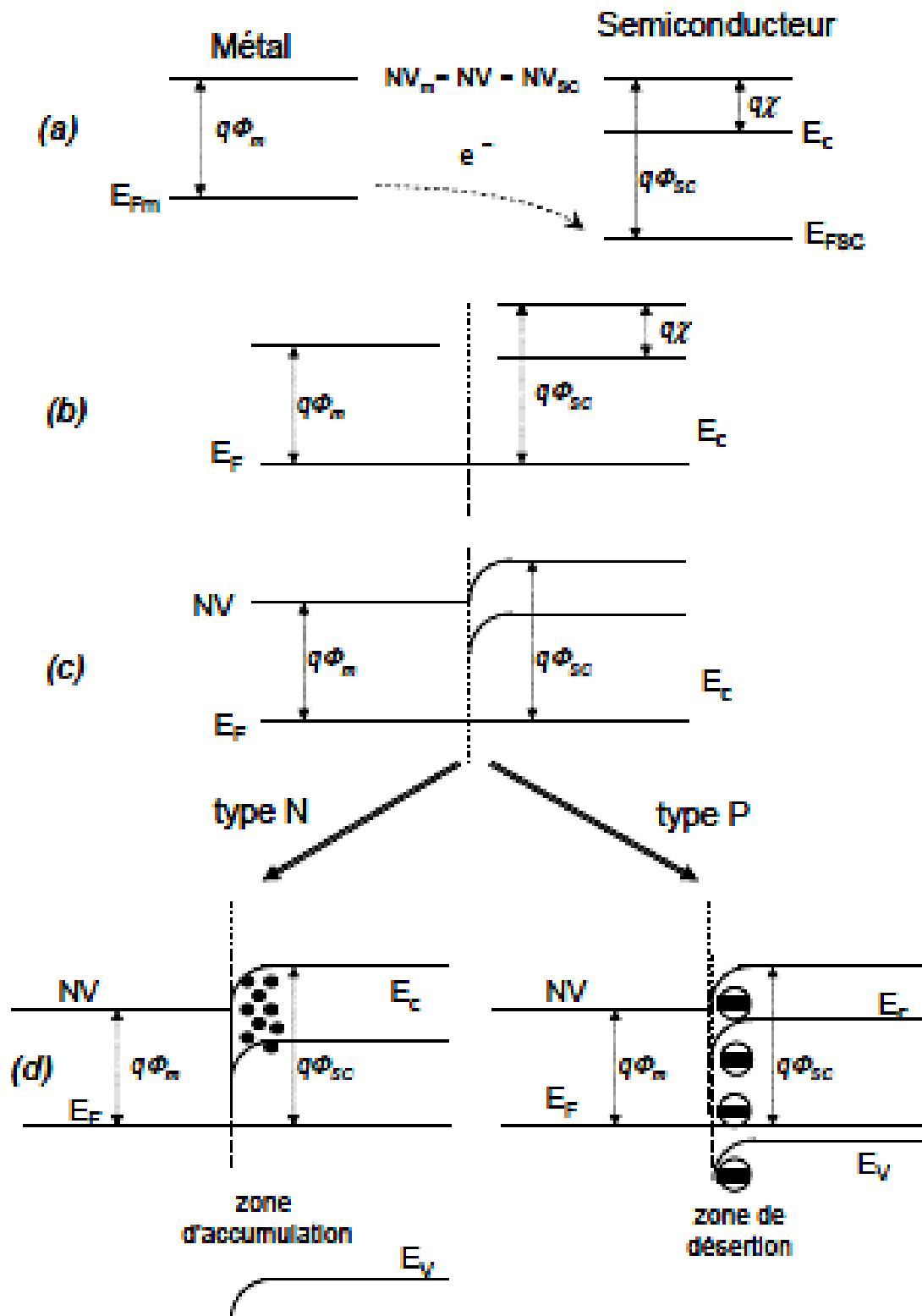


Figure I.11: Etablissement de l'équilibre thermodynamique d'une diode Schottky pour $\phi_m < \phi_{sc}$, (a) deux matériaux isolés, (b) diagramme loin de la jonction, (c) diagramme complet, (d) étude des deux cas: semi-conducteur de type N et P

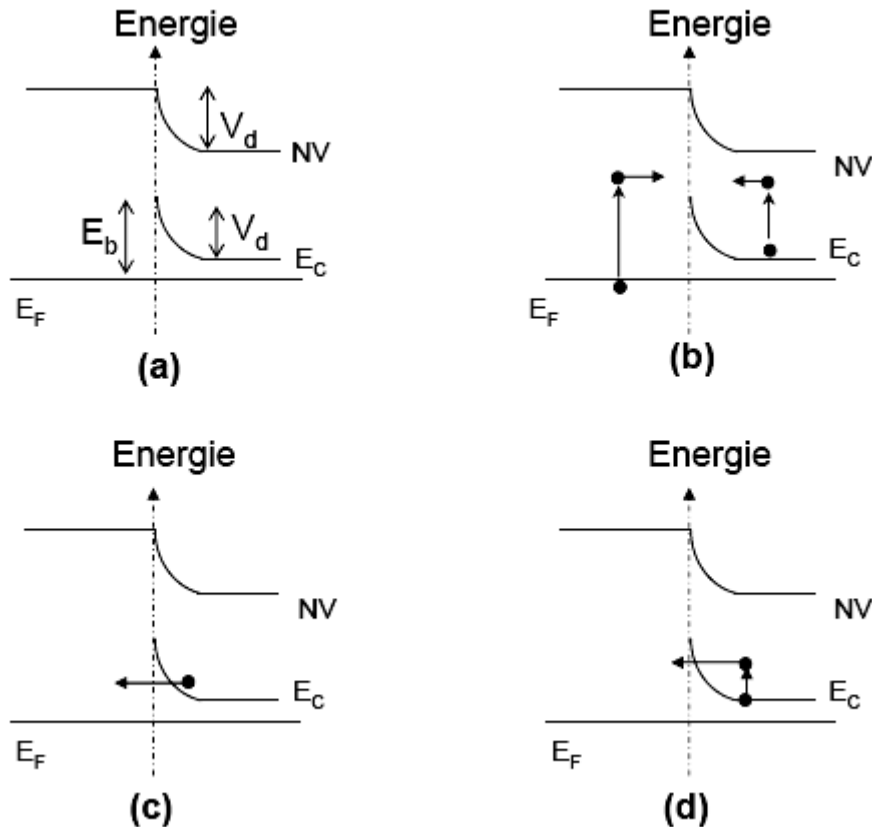


Figure I.12: Les trois grands types de courant dans une diode Schottky: (a) définition des barrières de potentiel, (b) courant thermoélectronique, (c) courant tunnel, (d) courant tunnel assisté par agitation thermique

I.4.2 Mécanismes de transport du courant dans un contact métal/semi-conducteur en polarisation directe

Le courant dans la diode Schottky est essentiellement dû aux porteurs majoritaires, le transport du courant dans une jonction métal/semi-conducteur, peut se faire selon les cinq mécanismes représentés à la figure I.13 [9];

1. Passage d'électrons possédant une grande énergie (dits électrons chauds) du semi-conducteur dans le métal par-dessus la barrière, deux modèles rendent compte du phénomène : le modèle thermoïonique (dans les semi-conducteurs à grande mobilité) et le modèle de diffusion (dans les semi-conducteurs à faible mobilité).
2. Passage des électrons à travers la barrière par effet tunnel.
3. Génération-recombinaison dans la ZCE, en polarisation directe, ce mécanisme correspond à la recombinaison dans la ZCE d'un électron venant du semi-conducteur avec un trou venant du métal.

4. Injection de porteurs minoritaires, en trou du métal se recombine avec un électron du semi-conducteur dans la zone quasi neutre du semi-conducteur.

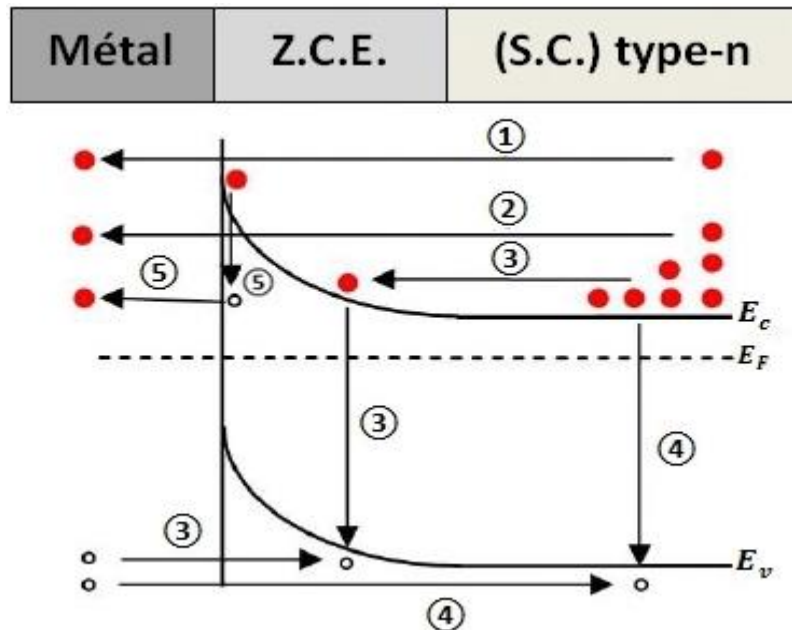


Figure I.13: Modes de transport des électrons dans un contact métal/semi-conducteur type-n polarisé en direct

5. Courant de recombinaison sur les états d'interfaces, les électrons du semi-conducteur sont piégés au niveau d'un centre d'interface vide puis ils passent par effet tunnel dans le métal.

–Lorsque le contact est redresseur, et pour des dopages faibles ($< 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), processus (1) est le plus important, car il définit le fonctionnement normal du contact métal/semi-conducteur, par contre les mécanismes (2), (3), (4), et (5) provoquent des déviations par rapport au comportement idéal [12].

–Le courant passe essentiellement à travers la barrière par effet tunnel pour les dopages forts ($> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Le contact réalisé est alors ohmique.

I.4.3 Polarisation de la diode Schottky

I.4.3.1 Polarisation directe

Quand on polarise la jonction sous une tension directe V_j , elle implique la réduction de la hauteur de la barrière qui devient $(V_b - V_j)$ entraînant une diminution de l'épaisseur W :

$$w' = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_D} (V_b - V_j)} \quad (\text{I.6})$$

V_b est remplacée par $(V_b - V_j)$, de nombreux électrons de la région N et de trous de la région P peuvent alors franchir cette barrière de potentiel et, se présentant alors dans un “milieu hostile”, ils sont recombinaison, cette recombinaison consomme près de la région de déplétion W des trous dans la région P (des électrons dans la région N), pour rétablir l'équilibre, les trous de la région neutre P se mettent en mouvement vers la zone où se produit la recombinaison (déficit en trous), les électrons de la région neutre N sont soumis à un phénomène analogue [8].

Comme les porteurs majoritaires continuent à partir de la région N vers la région P, ils deviennent minoritaires où ils diffusent et éventuellement se recombinent avec les trous majoritaires, de même, les trous en permanence générés dans la région P seront disponibles à se recombinaison avec les électrons traversant la barrière de potentiel, une partie du courant étant produite est due à la saturation (I_S) et une partie est due à la diffusion (I_D).

Toutefois, dans l'état de polarisation direct le courant de diffusion est beaucoup plus grand que le courant de saturation voir l'équation (II-7) en raison de la diminution de la région de déplétion, la figure (I.14) montre la caractéristique courant – tension (I - V) d'une diode Schottky dans l'état de polarisation directe.

$$I_{\text{Total}} = I_S + I_D \approx I_D \quad (I.7)$$

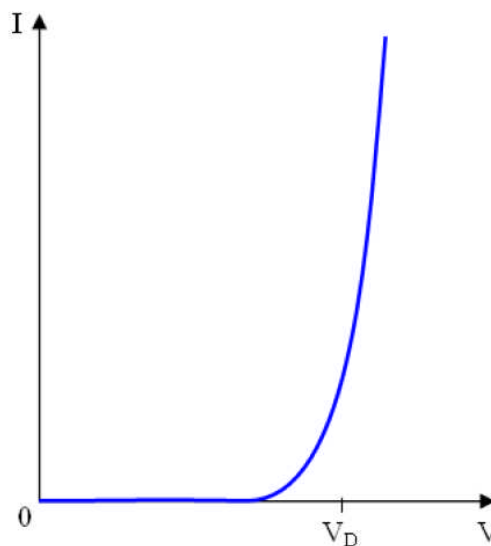


Figure I.14 : Caractéristique courant – tension d’une diode Schottky en polarisation directe

I.4.3.2 Polarisation inverse

Si on polarise la jonction en sens inverse, la hauteur de barrière de potentiel entre les régions P et N est renforcée par la tension extérieure inverse appliquée (V_{inv}) et devient ($V_b + V_{inv}$). Le champ électrique dans la région de charge d'espace augmente ainsi que son épaisseur W (dans l'équation (II.7), V_b devient ($V_b + V_{inv}$)). Les porteurs majoritaires des régions N et P n'ont pas l'énergie nécessaire pour sauter cette barrière de potentiel. La jonction est alors traversée par un très faible courant de saturation I_S [13].

En cas de polarisation inverse, la probabilité qu'un électron aura suffisamment d'énergie pour surmonter la barrière de potentiel est très faible et la jonction va agir comme un isolant, en ne permettant pas au courant de circuler, avec la croissance de la région de déplétion, le courant de diffusion (I_D) est très faible et le courant total dans le système est approximativement égal au courant de saturation (I_S) comme le montre l'équation suivante :

$$I_{Total} = I_S + I_D \approx I_S \quad (I-8)$$

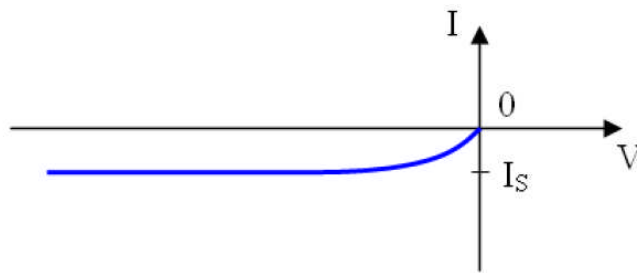


Figure I.15 : Caractéristique courant – tension d'une diode Schottky en polarisation inverse

I.4.4 Applications des diodes Schottky

L'efficacité de ces diodes détermine le choix de leurs applications, Elles sont largement utilisées dans des mixers radio et des détecteurs de fréquence radio, elles répondent aux exigences de ces applications grâce à leurs capacités de fonctionnement à très hautes fréquences dans la gamme des MHz.

Les diodes Schottky servent aussi à protéger des transistors grâce à un processus appelé blocage de tension, ce rôle est rendu possible par leur faible chute de tension. les diodes sont souvent utilisées comme une sorte de référence ou limite, elles autorisent le flux dans une direction, mais le bloquent dans l'autre sens, ce fonctionnement les rend très utiles pour protéger les dispositifs sensibles contre des courants circulants la direction opposée.

Si une batterie ou un groupe de batteries est rechargé par une source d'alimentation externe, le courant doit circuler dans une direction pour les recharger, sans que son sens de circulation ne soit jamais inversé, puisque cela viderait la ou les batteries, les diodes Schottky sont couramment utilisées pour cette application spécifique, les systèmes d'alimentation à commutation utilisent aussi ces dispositifs pour contrôler le flux du courant. De tels systèmes alimentent de nombreux types de dispositifs, incluant des ordinateurs [14].

I.4.5 Les avantages de la diode Schottky

Les avantages de la diode Schottky se réunissent dans les points suivants :

- La faible capacité de jonction permet d'utiliser ce type de diode dans les applications à très hautes fréquences (RF).
- La diode de Schottky peut opérer jusqu'à des fréquences de l'ordre de 20GHz.
- Le potentiel de jonction, pour un courant donné, est plus faible que celui des diodes conventionnelles et le temps de rétablissement est très court (10 ns) même pour des forts courants.
- Faible facteur de bruit.
- Faible dissipation d'énergie.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une description détaillée de la diode Schottky est présentée dont nous avons montré ses composants et sa structure, ensuite, nous avons donné une théorie de la jonction métal-semiconducteur pour les diverses cas de travail de sortie, en outre, les différentes conditions de polarisation de la diode Schottky et sa caractéristique ont été bien illustrés, en fin, ses applications dans différents domaines et ses avantages ont été décrits.

*Chapitre II : Description du
SILVACO-ATLAS*

2.1-Introduction

La simulation est définie comme une technique pour étudier des systèmes dynamiques dans la vie réelle en imitant leur comportement à l'aide d'un modèle mathématique du système appliqué à un ordinateur numérique.

Les simulations numériques peuvent résoudre des modèles de probabilité complexes, l'équation différentielle ordinaire et l'équation différentielle partielle analogiquement à la façon dont un ordinateur est utilisé pour évaluer l'intégrale d'une fonction complexe numériquement, c'est pourquoi la science de la simulation est considérée comme un domaine interdisciplinaire [15] le montre de la figure II..1.

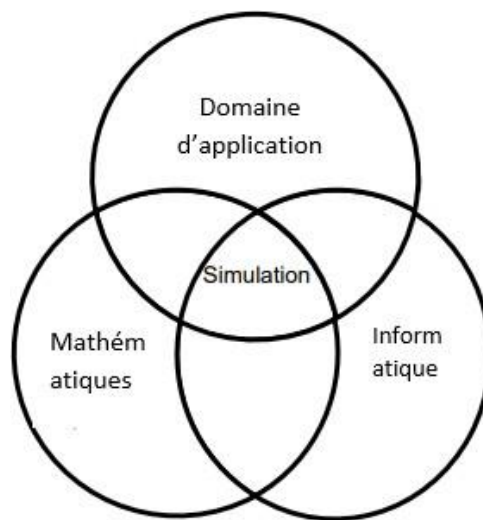


Figure II.-1: Interdisciplinarité de la simulation .

Il y'a une compatibilité et une cohérence permanentes dans le domaine de l'électronique avec la simulation, qui joue un rôle principale et important dans le développement de ce domaine miniaturisation continue de la technologie des semi-conducteurs, alors dans ce chapitre, nous allons expliquer le programme SILVACO-Atlas en le décrivant, définissant ses objectifs et sa méthode de processus, définissant ses caractéristiques et en introduisant divers outils de simulation interactifs, qui permettent la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs.

2.2- L'objectif principal 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 [16].



Figure II.2 : Le rôle de simulation

2.3-Description du logiciel SILVACO

Depuis sa création en 1984 par le Dr. Ivan Pesic , SILVACO est devenu le plus important simulateur de semi-conducteurs. SILVACO TCAD est l'abréviation de Silicon Valley Corporation Technologie Computer Aided Design, il s'agit d'un progiciel de simulation de processus semi-conducteurs composé de plusieurs simulateurs physiques (ATHENA, ATLAS, MERCURY... etc.) regroupés sous un environnement appelé DECKBUILD. Chacun d'eux simule différents processus, en raison du grand nombre de modules de SILVACO et de leur complexité, seuls les modules utilisés dans ce travail seront présentés:[17].

2.3.1-DeckBuild

DECKBUILD est un environnement d'exécution graphique interactif pour développer des ponts d'entrée de simulation de processus et de dispositifs, il est considéré comme la fenêtre principale de SILVACO où tous les simulateurs peuvent être contrôlés[18].

2.3.2-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 électrique 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 [19].

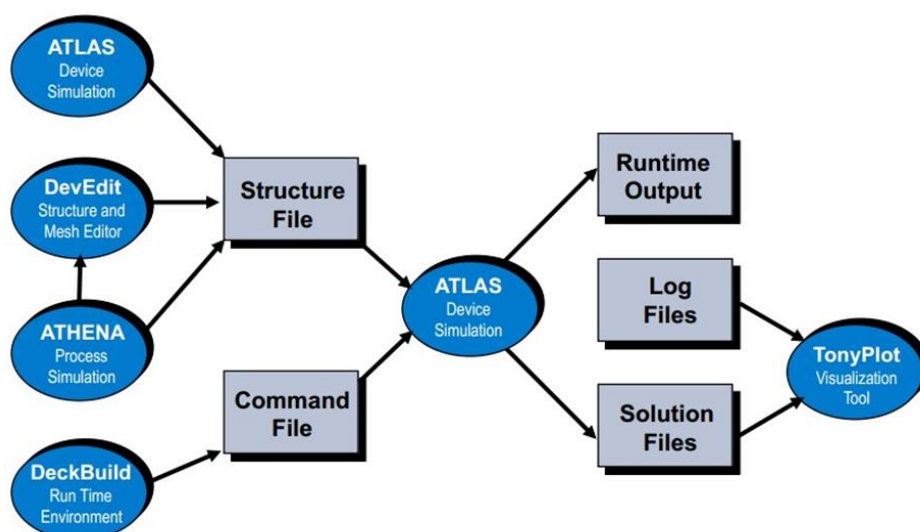


Figure II.3 : les entrées et les sorties de Atlas .

Les commandes dans Atlas sont divisées en cinq groupes d'instructions qui doivent être organisées dans un ordre spécifique, comme indiqué dans la figure II.4 ci-dessous.

1. Spécification de la structure	$\left\{ \begin{array}{l} MESH \\ REGION \\ ELECTRODE \\ DOPING \end{array} \right.$
2. Spécification des modèles des matériaux	$\left\{ \begin{array}{l} MATERIAL \\ MODELS \\ CONTACT \\ INTERFACE \end{array} \right.$
3. Sélection de la méthode	$\left\{ \begin{array}{l} METHOD \end{array} \right.$
4. Spécification des solutions	$\left\{ \begin{array}{l} LOG \\ SOLVE \\ LOAD \\ SAVE \end{array} \right.$
5. Analyse des résultats	$\left\{ \begin{array}{l} EXTRACT \\ TONYPLOT \end{array} \right.$

Figure : II.4 Ordre des commandes sous ATLAS.

2.3.3-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 [20].

2.3.4-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 [21].

Un exemple du le pouvoir de l'environnement **tonyplot** à partir d'un graphique complet des caractéristiques de sortie des résultats d'un simulation:

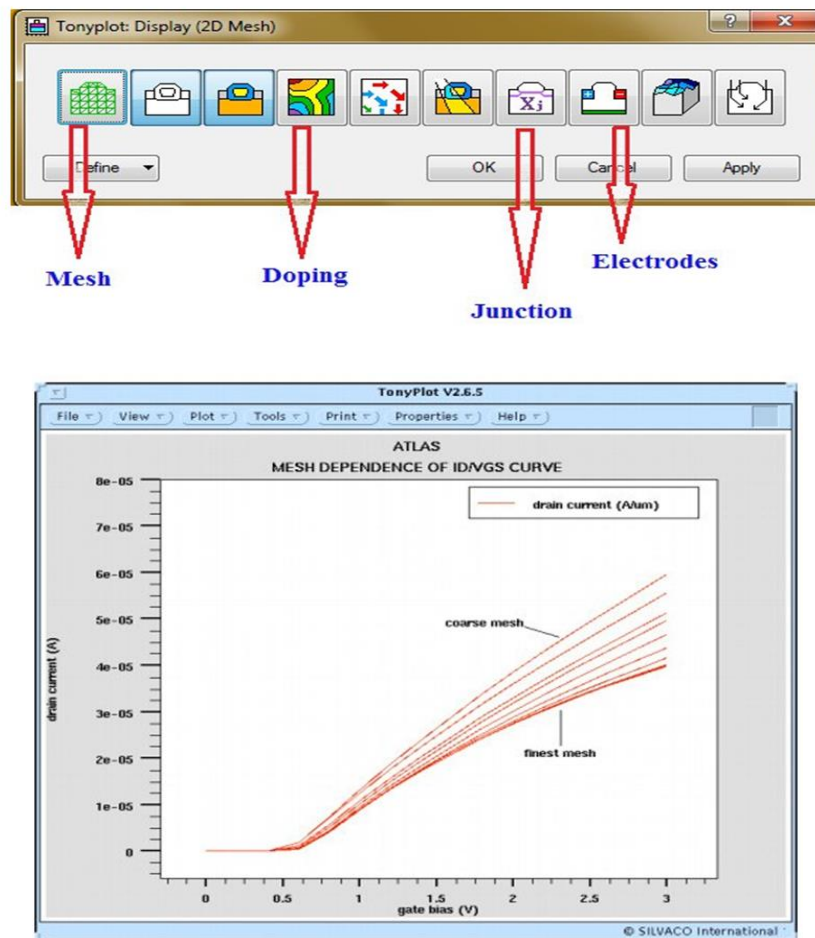


Figure. II.5 : L'environnement Tonyplot .

2.4- Spécification de la structure

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage [22].

2.4.1-Le maillage (Mesh)

Le maillage consiste à définir des points caractérisés par leurs coordonnées, suivant deux ensembles de lignes parallèles et perpendiculaires, le croisement entre ces lignes forment un ensemble de cellules, dit réseau, qui couvre la totalité de la surface du dispositif. Une simulation précise nécessite un maillage fin capable de résoudre toutes les équations menant à la solution, l'efficacité numérique nécessite un maillage grossier qui minimise le nombre total de points de la grille, donc une simulation rapide, une autre condition doit être prise en

considération est le nombre maximum de nœuds pris en charge par le logiciel, dans SILVACO TCAD (ATLAS), une simulation bidimensionnelle peut comporter jusqu'à 20 000 nœuds [18].

Pour générer un maillage dans ATLAS, trois informations importantes doivent être définies :

- La direction des lignes (x.mesh et y.mesh)
- Les emplacements des lignes principales (loc)
- Le pas entre chaque ligne (spac) qui explique la distance entre les lignes secondaires en micromètre.

L'instruction mesh space.multi introduit un facteur de multiplication entre deux lignes de maillage défini par dans une direction donnée pour augmenter où pour diminuer le nombre de lignes de maillage.

Le maillage de notre exemple dispositif (diode Schottky Forward Characteristic) généré en utilisant le code ci-dessous:

```
go atlas

mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.00 spac=0.5
x.mesh loc=3.00 spac=0.2
x.mesh loc=5.00 spac=0.25
x.mesh loc=7.00 spac=0.25
x.mesh loc=9.00 spac=0.2
x.mesh loc=12.00 spac=0.5
#
y.mesh loc=-0.5 spac=0.1
y.mesh loc=0.00 spac=0.1
y.mesh loc=1.00 spac=0.1
y.mesh loc=2.00 spac=0.2
y.mesh loc=5.00 spac=0.4
```

Figure II.6 : montre présente un exemple de maillage à deux dimensions.

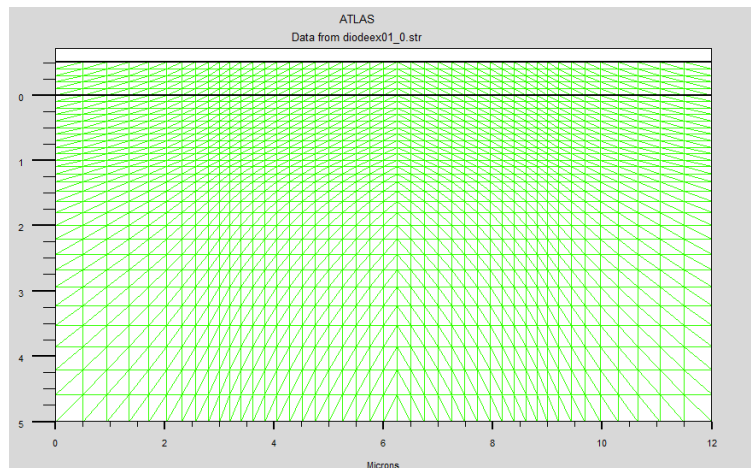


Figure II.6 : Spécification de maillage à 2D (x; y)

Alors le format général de définition de maillage est :

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

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

Ceci un autre exemple mais en détail, 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 [19].

2.4.2-Région et matériaux

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 deux régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes x et y.

Figure II.7 : montre le résultat généré par le code suivant :


```
region num=1 silicon
```

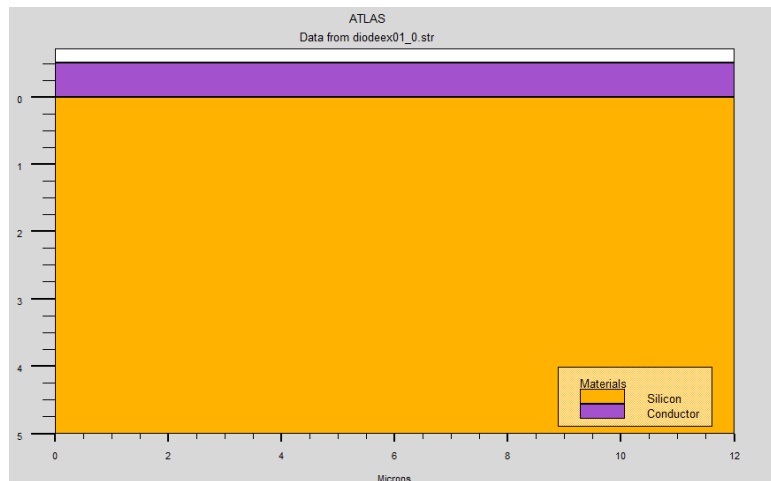


Figure II.7: La structure avec les régions et les matériaux.

La figure (II.7) , montre la façon de définition des matériaux pour chaque région, notons que le code de couleur indique la matière, les régions ont des lignes vertical et horizontales pour marquer leurs limites [19].

2.4.3-Electrode

Atlas peut contenir cinquante électrodes simultanément et les définir.

Définissez la forme de cette électrode comme suit:

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

Figure II.8 montre les positions de l'anode et de la cathode par les deux valeur x et y.

Le code de notre exemple est:

```
electr name=anode x.min=0 x.max=12 y.min=-0.5 y.max=0
electr name=cathode bot
```

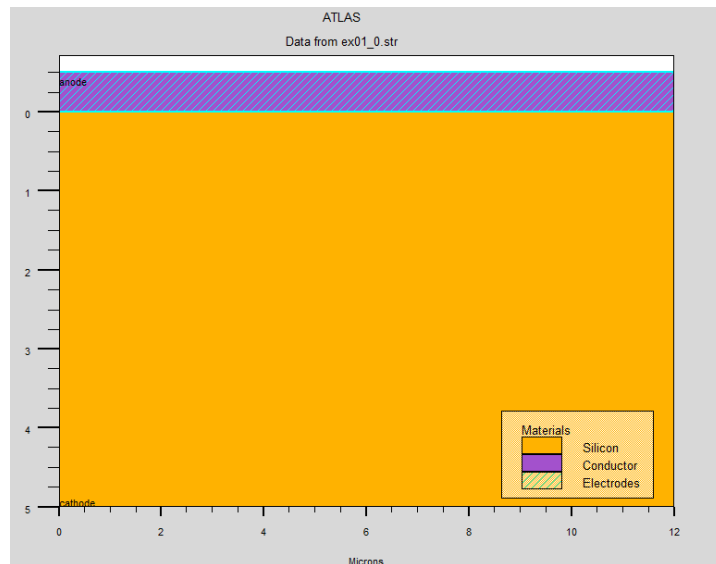


Figure II.8: Spécification des électrodes

2.4.4-Dopage

Le dernier aspect important de la spécification de structure à définir est celui Dopage, il est défini par le code suivant:

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

Ce dopage est introduit par la code suivant :

....#N-epi doping

doping n.type conc=5.e16 uniform

....#Guardring doping

doping p.type conc=1e19 x.min=0 x.max=3 junc=1 rat=0.6 gauss

doping p.type conc=1e19 x.min=9 x.max=12 junc=1 rat=0.6 gauss

La figure II.9 montre un dopage pour la région 2 avec une distribution uniforme de type n et d'une concentration de 16 cm^{-3} est donné par:

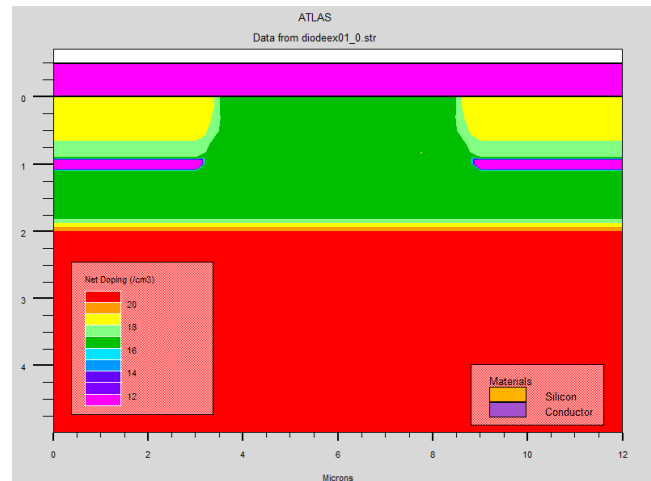


Figure II.9: Spécification de dopage

2.5-Spécification du modèle et du matériau

2.5.1-Matériau

La classification et l'identification des substances dépendent de leurs propriétés physiques, par exemple:

la conductivité (conducteurs, semi-conducteurs, isolants), la capacité électronique, l'énergie du gap, la mobilité, la densité, des porteurs, la vitesse de saturation.

Le format de la déclaration du matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >

2.5.2-Modèles

On peut classer les modèles physiques en cinq catégories :

- La mobilité.
- La recombinaison.
- Statistiques porteurs.
- Ionisation par impact.
- Effet tunnel.

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

MODEL< paramètres générales > / < paramètres du modèle >

Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT, les modèles présents sur nos programmes sont :

FERMI : (Statistique de Fermi-Dirac) utilisée quand la concentration des porteurs est réduite dans les régions fortement dopées.

AUGER : Important à des densités de courant élevées.

CCSMOB : Important lorsque la concentration porteurs est très élevée.

FLDMOB valide pour le Si et le GaAs à 300K il est utilisé quand la dépendance de la mobilité du champ électrique.

CONSRH : Utilisé quand la concentration dépend de la durée de vie des porteurs.

SRH : Devrait être utilisé dans la plupart des simulations.

UST(Universal Schottky Tunneling) : le courant d'effet tunnel est représenté par le taux de localisation tunnel près du contact Schottky.

D'autres modèles peuvent être utilisés comme CONMOB et ARORA ...etc.

Nous allons maintenant expliquer en détail certains modèles:

Modèle de recombinaisons Schokley Read Hall (SRH)

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, 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 [22].

Recombinaison SRH (Shockley-Read-Hall)

Le phénomène est lié à la présence d'impuretés ou de défauts au sein de la structure cristalline du silicium, cela stimule la présence de niveaux d'énergie séparés dans l'espace matériel, ces niveaux (pièges) ont un rôle important à jouer pour faciliter la recombinaison des porteurs par une méthode ou mécanisme en 2 étapes (la figure suivante explique le mécanisme).

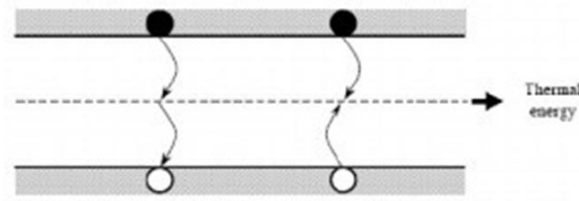


Figure II.10 : Mécanisme de recombinaison SRH .

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 [23- 24].

Modèles pour la recombinaison et la génération des porteurs

La génération-recombinaison des porteurs est le processus par lequel le matériau semi-conducteur tente de revenir à l'équilibre après perturbation.

Modèle	Syntaxe/instruction	Remarque
Shockley-Read-Hall	Srh	Utilise les durées de vie des opérateurs minoritaires fixes, il devrait être utilisé dans la plupart des simulations.
Shockley-Read-Hall dépendant de la concentration	Consrh	Indique la recombinaison Shockley- Read-Hall en utilisant la durée de vie des porteurs dépendant de la concentration.
Auger	Auger	Indique la recombinaison Auger. Recommandé pour les fortes densités de courant.

Tableau II.1: Modèles dépendant de la recombinaison et génération des porteurs .

Modèles pour la mobilité

Les électrons et les trous sont accélérés par les champs électriques, mais perdent de l'élan à la suite des processus de diffusion, qui comprennent : les vibrations en réseau (phonons), les ions d'impureté, autres porteurs et les imperfections des matériaux (rugosité de surface, ...) [19].

Le tableau 3-1 contient les principaux modèles dépendants de la mobilité, leurs syntaxes.

Avec n : la concentration des électrons, p : concentration des trous, T est la température du réseau, N est la concentration des dopants, $E //$ champ électrique parallèle, $E \perp$ le champ électrique perpendiculaire.

Modèle	Syntaxe/instruction	Remarque
Dépendant de la mobilité en fonction de la concentration	Conmob	C'est une table de dopage versus mobilité valide pour 300K seulement.
Dépendant de la mobilité en fonction de la concentration incluant les effets de diffusion dans le réseau (modèle de KLASSEN)	Kla	A utiliser à haute concentration des impureté.
Dépendant de la mobilité en fonction de la concentration et de la température	Analytic	Caughey - formule de Thomas. Utilisé pour une température de 77- 450K.
Diffusion porteurs-porteurs	Ccsmob	Important lorsque la concentration des porteurs est élevée.
Dépendant de la mobilité en fonction du champ électrique parallèle	Fldmob	Nécessaire pour modéliser tout type d'effet de saturation de vitesse.
Lombardi	Cvt	Modèle complet incluant les effets $N, T, E //$ et $E \perp$ recommandé pour les dispositifs non planaires.
Yamaguchi	Yamaguchi	Inclut les effets $N, E //$ et $E \perp$ Seulement pour 300K.

Tableau II.2: Modèles de la mobilité .

2.5.3-Les Contacts

La commande "contact" informe ATLAS comment manipuler l'électrode, l'électrode de contact est Ohm par défaut, afin de définir l'électrode comme un contact Schottky, nous devons définir la valeur de travail de sortie pour les minéraux, comme indiqué dans le code suivant(ex:Au):

```
contact name=anode work function=4.8
```

2.5.4-Interface

Alors, les limites de semi-conducteur ou d'isolement sont définies dans la déclaration d'interface; la syntaxe est la suivante:

```
Interface qf=<value><position paramètres>
```

2.6-Le méthode numérique à déterminer

Puis la précision du modèle de matériau, nous devons indiquer le choix de la méthode numérique, parmi les différentes méthodes numériques de résolution de systèmes d'équations, 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 [20].

La méthode de Newton

C'est une procédure qui résout les équations en ensemble, 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.

Alors les solutions sont obtenus par $V(k+1) = V(k) + \Delta v(k)$ $n(k+1) = n(k) + \Delta n(k)$ $p(k+1) = p(k) + \Delta p(k)$, ou k indique le nombre d'itération et le système de l'équation a trois équations pour chaque point du maillage [23].

2.7-Spécification de Solution

2.7.1-Log

Log sauvegarde toutes les caractéristiques terminales dans un fichier de données, cet exemple montre un exemple d'utilisation d'instructions LOG.

LOG OUTFILE = myoutputfile.log

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

2.7.2-Solve

Après les instructions LOG, il y'a les instructions SOLVE, ce dernier effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation, ce qui suit est un exemple d'une instruction.

SOLVE V2 = 0.8

SOLVE V2 = 0.9

2.7.3-Load and Save

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 [25].

2.7.4-Analyse

L'analyse est généralement divisée en deux instructions `extract` et `tonyplot`

L'instruction `Extract` permet d'extraire et afficher la fenêtre « run-time output » la valeur d'un résultat attribué à un point spécifique, par exemple :

```
Extract          name="I_max"      y.valfromcurve      (v."anode",
                                     i."anode") wherex.val=3
```

Une autre de ses fonctions est qui permet d'extraire les données sous forme de courbe qui sera afficher avec `tonyplot`:

```
Extract name="courbeProX" curve (v."anode", i."anode") "
```

L'instruction `tonyplot` offre de visualiser les données sous forme graphique. Exemple :

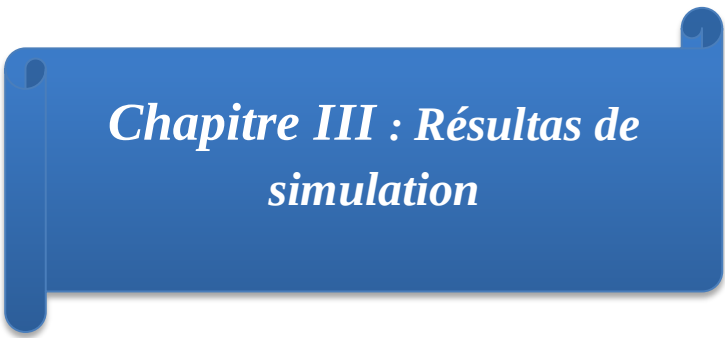
```
tonyplot DiodeSchottky_7_1.dat
```

La fin du programme est marquée par l'instruction `Quit`.

2.8-Conclusion

Comme un résumé de ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'outil de simulation, le programme Atlas-Silvaco, l'environnement où la simulation DECKBUILD est définie et l'outil de visualisation Tonyplot pour le programme TCAD-SILVACO ont été également présentés.

Au terme de ces étapes, nous avons présenté l'outil de travail utilisé dans le cadre de notre exemple, ce dernier est travaillé sur la prédiction des propriétés électriques et physiques liées à la structure proposée et des conditions de polarisation appliquées.



Chapitre III : Résultats de simulation

III.1-Introduction

Dans ce chapitre, on va exploiter le simulateur Atlas-Silvaco pour l'étude et la simulation de la diode Schottky, d'abord, nous montrons la structure de la diode Schottky avec les différentes régions et leur dopage, ensuite, nous donnons les divers paramètres utilisés dans la simulation.

Enfin, les résultats de simulations de la structure Schottky vont être présentés, de plus, l'effet de la température sur les caractéristiques de la diode Schottky est discuté afin de décrire le comportement de ces diodes pour les applications à des températures élevées.

III.2-But de la simulation d'un composant

Le rôle principal du simulateur est faire baisser le nombre des étapes d'itérations nécessaires pour la fabrication du composant avec certaines propriétés désirées dont les résultats d'une simulation sont visualisés sous les formes suivantes :

- 1) Caractéristiques I-V, C-V, Q-V, G-V...
- 2) Courbe à 2D : inclut la courbe d'une grandeur comme par exemple le potentiel en fonction de la distance verticale y d'un composant.
- 3) Courbe à 3D : inclut 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.

III.3-Structure de la diode Schottky

La diode Schottky est composée d'un métal et d'un semi-conducteur qui forment ensemble une connexion unilatérale comme illustré dans la figure III.1, une électrode est composée d'un métal qui est le Béryllium lié directement à une couche de matériau semi-conducteurs le silicium de type N avec une épaisseur de $5\mu\text{m}$., la concentration de dopage est définie en deux valeurs, une concentration de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ pour une épaisseur de 0 à $2\mu\text{m}$ direction de y et celle de 10^{20} cm^{-3} pour une épaisseur de 2 à $5\mu\text{m}$. Une simple région est formée entre le conducteur semi-conducteur-métal connu sous le nom de barrière Schottky.

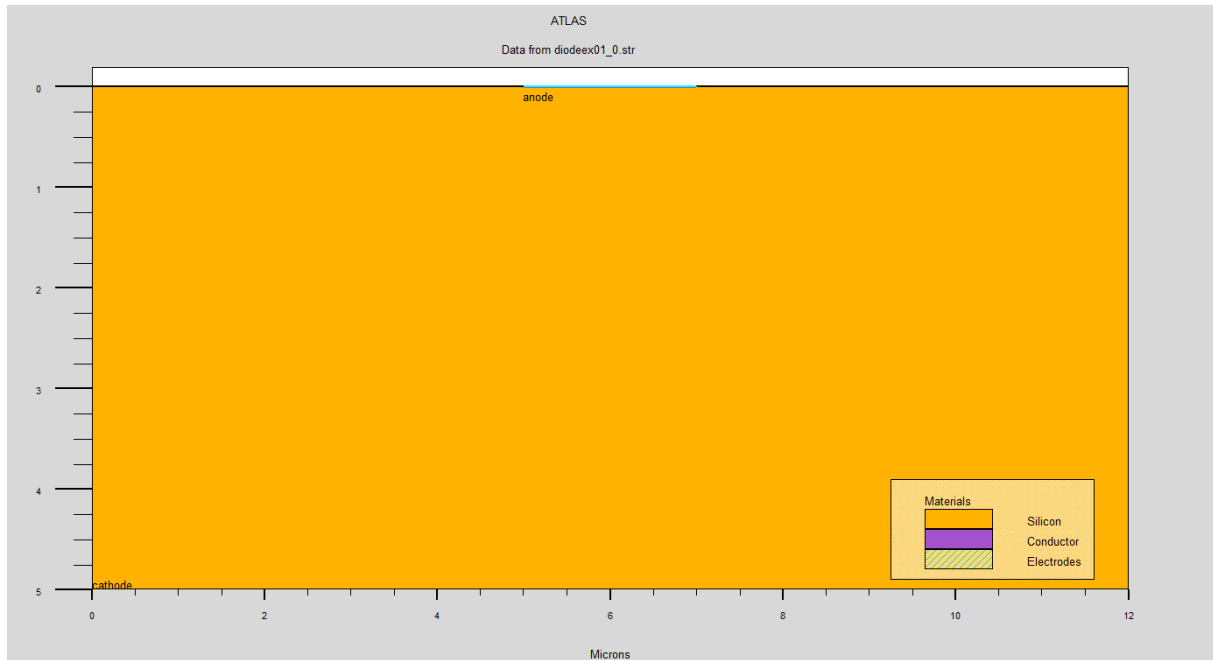


Figure III.1: structure de la diode Schottky étudiée

III.4-Paramètres de la diode Schottky

Chaque ingénieur doit connaître la nécessité de déterminer les paramètres des matériaux employés pour la fabrication d'un dispositif semi-conducteur.

Dans ce cas de la diode Schottky, nous avons de nombreux paramètres tels que la bande interdite, l'Affinité électronique et le Travail de Sortie, les paramètres de simulation sont spécifiques et groupés dans le tableau suivant:

Paramètres	Matériau Silicium
Bande gab Eg (eV)	1.12
Affinité électronique (eV)	4.01
Travail de sortie (pour métal)	4.97
Dopage faible (cm ⁻³)	5×10^{16}
Dopage élève (cm ⁻³)	10^{20}

Tableau III.1 :Paramètres de simulation

III.5-Maillage

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales composant un réseau, ce dernier est créé en superposant ces deux groupes en parallèle et perpendiculairement, les intersections entre les deux groupes sont appelées nœuds, et les distances entre eux sont appelées éléments. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions, par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis, la figure (III.2) montre le maillage de notre structure.

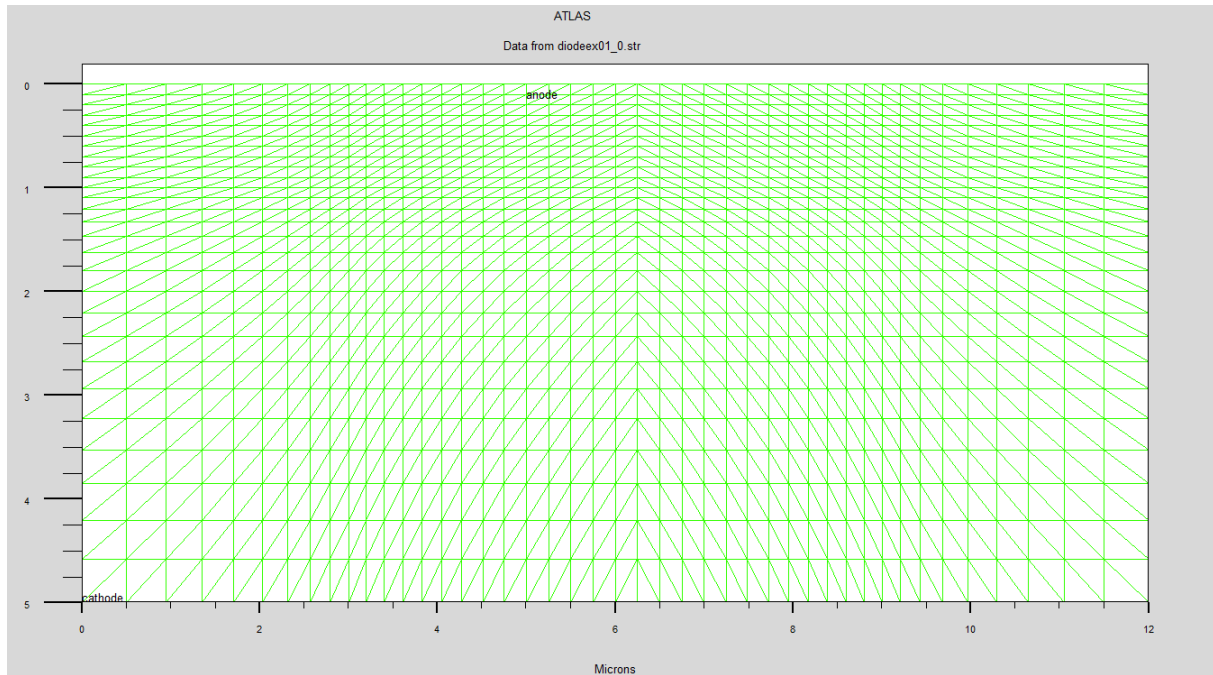


Figure III.2: Maillage à deux dimensions de la diode Schottky

III.6 Caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky

En utilisant les paramètres mentionnés dans le tableau III-1, la caractéristique J-V de la diode à température ambiante est présentée sur la figure III.3.

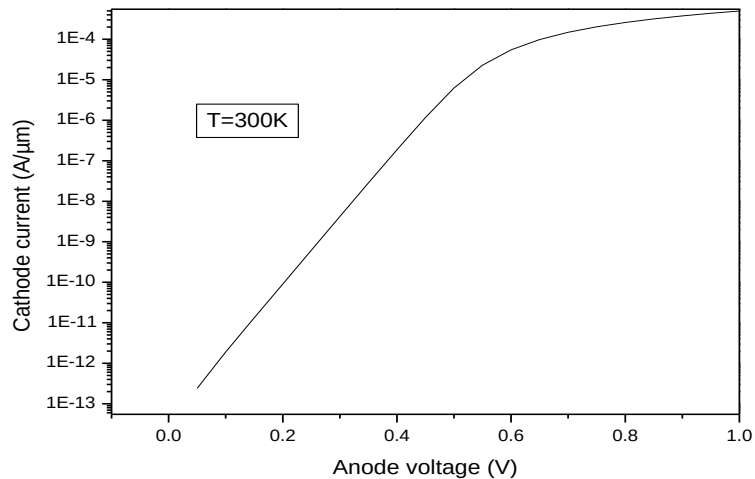


Figure III.3: Caractéristique J-V de la diode Schottky à température de 300k

D'après les résultats de la figure III.3, l'allure de la caractéristique J-V est proportionnelle au résultat expérimental, ce qui montre la validation de notre modèle de simulation utilisé, on remarque qu'il y a une croissance linéaire de la densité du courant avec l'augmentation de la valeur de la tension de 0.05V à 0.6V. Au delà de la valeur de 0.6V, l'allure devient non linéaire et commence à se stabiliser à cause de la résistance série et/ ou aux états d'interface.

L'étude de la simulation est continuée par le changement de la température et voir son effet sur le comportement de la diode Schottky, la figure III.4 montre les caractéristiques J-V de la diode en fonction de différentes valeurs de température.

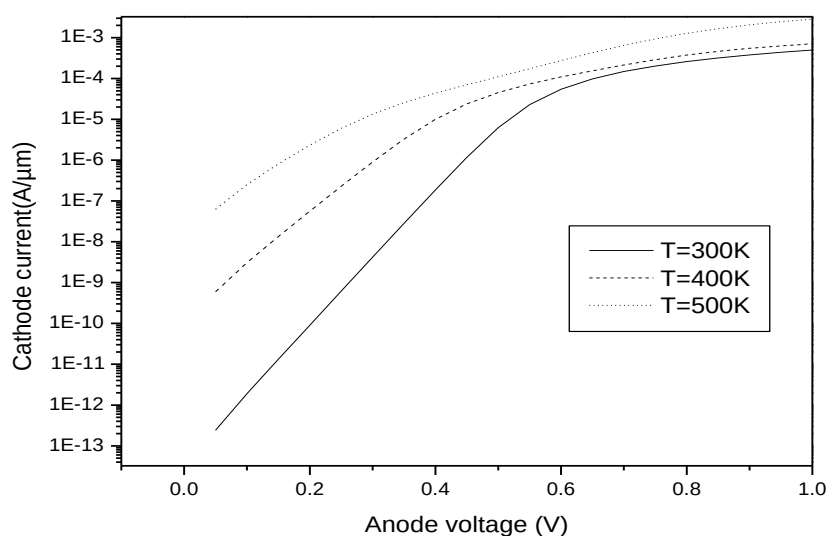


Figure III.4: Différentes caractéristiques J-V de la diode Schottky en fonction de diverses températures

Il est clair que l'effet de la température est considérable observé sur la variation du courant, en particulier pour 500K, les résultats obtenus confirment le mécanisme de transport à température élevée, les électrons liés à leurs atomes (comme le silicium), ont des liaisons covalentes, ce que fait la température rompre ces liaisons, et par conséquent libère les électrons, dans une autre interprétation, l'électron acquiert une énergie positive qui lui permet de rompre ces liaisons et la force des liaisons varie d'un atome à l'autre, plus la température est élevée, plus sa capacité à briser les liaisons covalentes, ce phénomène permet à l'électron de devenir un porteur libre de la charge, alors les électrons sont capables de se déplacer, c'est ce qu'exprime la mobilité, ce qui permet au courant électrique de passer sous l'influence de la température, par conséquent, il y a un effet global sur les caractéristiques courant-tension, par conséquent, l'intensité du courant croît avec l'augmentation de la température, les résultats obtenus indiquent que la structure de la diode de Schottky proposée peut travailler à des applications à température élevées.

III.7 Conclusion

En résumé, nous avons utilisé le simulateur Atlas-Silvaco pour l'étude et la simulation de la diode Schottky, l'impact de la température sur la diode a été analysé et discuté afin d'étudier le comportement de cette diode à température élevée, les résultats obtenus montrent que l'intensité du courant est considérablement croît avec la croissance de la température, ceci rend la diode proposée très utile pour les applications à température élevée.

CONCLUSION GENERALE

Au cours des deux derniers siècles, les scientifiques ont joué un grand rôle dans l'invention des diodes, en particulier les diodes Schottky, en raison de large application dans diverse domaine tels que nanotechnologie, industriel,...

De point de vue composition, la diode Schottky a la capacité de résister à des fréquences élevées, pour cette raison, elle est utilisée dans le circuit de détection, et aussi dans le circuit de modulation, autre applications comme l'utilisation dans "les éléments numériques" (l'ordinateur numérique) en raison de sa rapidité de commutation, et dans les unités de faible puissance aux gros équipements industriels.

Dans ce mémoire, on est intéressé d'étudier une diode Schottky en utilisant le simulateur numérique dont le but d'analyser le comportement de cette diode à des températures élevées pour des applications de technologie récente, dans ce contexte, la première partie était concentrée sur une description détaillée sur la diode Schottky, et une théorie de la jonction métal-semi-conducteur pour les diverses cas de travail de sortie, en deuxième partie, un détail sur le programme Atlas-Silvaco et les différents blocs ainsi que diverses commandes utilisées pour la modélisation de la diode Schottky ont été présentés, dans la troisième partie, nous avons employé le simulateur Atlas-Silvaco pour l'étude et la simulation de la diode Schottky. De plus, l'effet de la température sur la diode a été examiné et discuté afin d'étudier le comportement de cette diode à des températures élevées, les résultats obtenus ont montré que l'intensité du courant est significativement augmentée avec la croissance de la température, en particulier pour 500K, ceci rend la structure de la diode proposée très utile pour les applications à température élevée.

**Références
Bibliographiques**

- [1] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & sons, New York. London. Sydney. Toronto. 1969.
- [2] Sheng S. LI, "Semiconductor Physical Electronics", 2nd ed, Springer, USA, 1969.
- [3] Francis Lévy, Traité des Matériaux N 18, « Physique et Technologie des Semi-conducteurs » Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.
- [4] BOUROUBA Farid « MOD.ELISATION ET SIMULATION DES CONTACTS METAL semi-conducteur A BARRIER INHOMOGENE, Memoire de Master, 2010.
- [5] BENBOUZA Mohamed Salah « Conception assistée par ordinateur des circuits intégrés MESFET GaAs ». Thèse de Doctorat, université el hadj lakhdar batna. 02 octobre 2007.
- [6] Herissi Naima, "Extraction des paramètres des structures Métal/ Semi-conducteurs (Ti/Pt/Au-GaAs) à partir des caractéristiques courants- tensions (I-V), Mémoire de Master, " Tébessa 2012 , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018
- [7] A. E. Bazin, "Conception de diodes Schottky sur 3C-SiC épitaxie sur silicium," Memoire de Master , François- Rabelais de Tours 2009 , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018 .
- [8] L.SEVELY, "Contribution a l'etude et a la realisation de contacts sur GaAs par recuit électronique pulse " , Memoire de Master, 1985 , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018
- [9] B. Lakehal, "Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky. ", Memoire de Master , Batna. 2009.
- [10] [http://easytp.cnam.fr/algani/images/ELE101_CNAM_5_2008. pdf](http://easytp.cnam.fr/algani/images/ELE101_CNAM_5_2008.pdf) (consulté le 12.02.2014). Memoire de Master , M'SILA 2018.
- [11] A.E. Bazin, "Conception de diodes schottky sur 3C-SiC épitaxie sur silicium", thèse de doctorat, Université François-Rabelais 2009, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa 2017.

- [12] BALI.A ; Etude comparative entre les cellules solaire de type p+- AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs , Mémoire Magister , Université Mohamed Khider – Biskra
- [13] H. Mathieu, Physiques des semi-conducteurs et composants électroniques, Memoire Master , 2001 , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018.
- [14] W.FILALI. ALIOUANEBrahim GHARNOU Massinissa, Memoire Master, Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou 2018
- [15] J. Kumar, « System Simulation and Modeling », System Simulation and Modeling , Modeling and simulation, [En ligne]. <http://www.ddegjust.ac.in/studymaterial/mca-5/mca-504.pdf> , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI – OUZOU 2018.
- [16] Mr. BOUROUBA Farid. MODELISATION ET SIMULATION DES CONTACTS METAL-SEMICONDUCTEUR A BARRIERE INHOMOGENE,Mémoire Magister Physique. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF. 2010
- [17] Henry Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Memoire Master, 1987. Université Mohamed Khider Biskra 2014
- [18] R. BOUMARAF, « Simulation de l'effet de la température et les défauts sur les caractéristiques électriques des diodes à base de GaAs», Thèse Doctorat, Université de Biskra « Mohamed Khider », (2015). [En ligne]. http://thesis.univ_biskra.dz/1552/1/Phy_dl_lmd_2015.pdf.
- [19] ATLAS User's "Manual-device simulation software" volume 1. Memoire Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI – OUZOU 2018.
- [20] KAGHOUCHE Bessem, ETUDE PAR TCAD-SILVACO D'UNE STRUCTURE MOS POUR LA REALISATION DE CAPTEURS ISFET : PARAMETRES TECHNOLOGIQUES ET ELECTRIQUES, Mémoire de Master, Soutenu le : 17 Mai 2010.
- [21] Mostefa Kara Selma «Etude et simulation de cellules photovoltaïque sa couches minces a base de CIS et CIGS» ,2012 ;mémoire de Magister ; Université Abou-Bakr Blekaid Tlemcen.

- [22] DEHIMI SAID , Etude de lasers à base des composés semi-conducteurs (InP, GaAs,GaP), Memoire Master , 2011, Memoire Master. Université Mohamed Khider Biskra 2014.
- [23] SHOCKLEY.W, READ.W.T, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”. Physical SHOCKLEY.W, READ.W.T, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”. Physical Review, 1952, vol. 87, no5, p. 835-842. (s.d.). 54
- [24] HALL. R.N., “Electron Hole Recombination in Germanium”, Physical Review, 1952, vol. 87, no2, p.387. (s.d.). [14]ATLAS User’s "Manual-device simulation software" volume 1.
- [25] Kateb Mohamed Nadjib, Mokrani Zakaria, Conception et simulation électrique d'une cellule solaire en Si par le logiciel Tcad-Silvaco, Juin 2011, Université Mohamed Khider Biskra 2014.