

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR-EL OUED  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



**Mémoire**

**Présenté par : Achouri Faycal, mesbahi el mekki ,Zeghib  
Mohammed lamine et Hoggui Ayman**

**Pour l'obtention du Diplôme de Master en Systèmes de  
télécommunication**

**Spécialité : Systèmes de télécommunication**

**Mémoire**

**Etude et simulation de émetteur optique 'diode  
laser'**

**Devant le jury composé de :**

- Mr. ABDELLATIF KHELIL	Dr UNV (EL OUED)	Président
- Mr. HETTIRI MESSAOUD	Dr UNV (EL OUED)	Encadreur
- Mr. SADOUN ALI	Dr UNV (EL OUED)	Co-Encadreur
- Mr. TOUHAMI RIDHA	Dr UNV (EL OUED)	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralité sur semi-conducteurs III-V</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	4
1.2 Définition d'un semi-conducteur	4
1.2.1 Définition des semi-conducteurs III-V	4
1.3 Les alliages semi-conducteurs III-V	5
1.3.1 Définition d'un alliage :	5
1.3.2 Les composés semi-conducteurs III-V	5
1.3.3 Structure cristalline	6
1.4 Les propriétés électronique des semiconducteurs	8
1.4.1 Structures de bandes	8
1.4.2 Bande interdite (gap énergétique)	8
1.4.3 Gap direct et gap indirect	9
1.5 Effet de la température sur les semi-conducteurs	10
1.6 Effet de la pression sur le gap d'énergie	10
1.7 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V :	10
1.7.1 Phénomènes d'absorption dans les semi-conducteurs :	11
1.8 Conclusion	12
<b>2 Généralité sur les Hétérojonctions</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction	15
2.2 Jonction Métal - semi-conducteur	15
2.2.1 Travail de sortie	15
2.2.2 Affinité électronique	16
2.3 Théories de formation de barrière Schottky	17
2.3.1 Hétérojonction	17
2.4 Structure MOS :	20
2.5 Puits quantiques	20
2.5.1 Puits quantiques de type-I :	21
2.5.2 Puits quantiques de type-II :	22
2.5.3 Puits quantiques de type-III :	22

2.6	L'épitaxie . . . . .	23
2.6.1	Epitaxie en phase vapeur : . . . . .	23
2.6.2	Epitaxie en phase liquide : . . . . .	24
2.6.3	Epitaxie par jet moléculaire EJM : MBE (Molecular Beam Epitaxy) . . . . .	24
2.7	CONCLUSION : . . . . .	26
<b>3</b>	<b>les Diodes laser</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction . . . . .	29
3.2	Diode laser . . . . .	29
3.3	Les Paramètres physique d'un laser . . . . .	29
3.4	Interaction électron-photon . . . . .	30
3.4.1	Absorption . . . . .	30
3.4.2	Emission spontanée . . . . .	30
3.4.3	Emission stimulée . . . . .	31
3.4.4	Absorption- Emission spontanée- Emission stimulé SC hors équilibre . . . . .	32
3.5	Le facteur de confinement . . . . .	33
3.6	Longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur du puits . . . . .	34
3.7	Amplification optique . . . . .	35
3.8	Gain modal : . . . . .	35
3.9	gain maximal . . . . .	35
3.10	taux de recombinaisons . . . . .	37
3.10.1	Recombinaisons radiatives . . . . .	37
3.10.2	Recombinaisons non radiatives . . . . .	37
3.11	Puissance optique . . . . .	37
3.12	Conclusion . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Résultats et Interprétations</b>	<b>40</b>
4.1	Introduction . . . . .	41
4.2	Paramètres de simulation . . . . .	41
4.3	Résultats et Interprétations . . . . .	43
4.3.1	Variation du gain en fonction du courant, de la tension . . . . .	43
4.3.2	La variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant . . . . .	44
4.3.3	Variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant . . . . .	45
4.3.4	La variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active . . . . .	46
4.3.5	Variation de la densité d'électrons injectés au seuil Nth en fonction de l'épaisseur de la couche active . . . . .	47
4.3.6	Variation du courant de seuil en fonction de l'épaisseur de la couche active . . . . .	48
4.4	Conclusion . . . . .	49
	<b>Conclusion générale</b>	<b>51</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	<i>Bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et conducteur.</i> . . . . .	4
1.2	<i>Réseau cristallin dans la structure Zinc-blende.</i> . . . . .	7
1.3	<i>Les structures des bandes énergétiques : Métal, semi-conducteur, isolant.</i> . . . . .	9
1.4	<i>Les transitions optique directes et indirectes.</i> . . . . .	10
1.5	<i>Phénomène d'absorption.</i> . . . . .	11
2.1	<i>Structure de bande métal-semi-conducteur de type n[3].</i> . . . . .	17
2.2	<i>Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.</i> . . . . .	18
2.3	<i>Diagramme d'énergie d'une hétérojonction anisotype BAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> avant contact.</i> . . . . .	19
2.4	<i>la Structure MOS.</i> . . . . .	20
2.5	<i>le Schéma d'une structure de puits quantique.</i> . . . . .	21
2.6	<i>Profil de puits quantique de type I.</i> . . . . .	21
2.7	<i>Profil de puits quantique de type II.</i> . . . . .	22
2.8	<i>le Profil de puits quantique de type III.</i> . . . . .	22
2.9	<i>Epitaxie en phase vapeur.</i> . . . . .	23
2.10	<i>Epitaxie en phase liquide.</i> . . . . .	24
2.11	<i>Epitaxie par jet moléculaire EJM.</i> . . . . .	25
3.1	<i>Schéma d'un system laser</i> . . . . .	29
3.2	<i>Absorption dans un système à deux niveaux.</i> . . . . .	30
3.3	<i>Emission spontanée dans un système à deux niveaux.</i> . . . . .	31
3.4	<i>Emission stimulée dans un système à deux niveaux.</i> . . . . .	32
3.5	<i>Distribution de Fermi-Dirac pour les électrons.</i> . . . . .	32
3.6	<i>Distribution de Fermi-Dirac pour les trous.</i> . . . . .	33
3.7	<i>le Gap effectif d'une structure à puits quantique</i> . . . . .	34
4.1	<i>Variation du gain en fonction de la tension.</i> . . . . .	43
4.2	<i>Variation du gain en fonction du courant.</i> . . . . .	43
4.3	<i>La variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant.</i> . . . . .	44
4.4	<i>Variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant.</i> . . . . .	45
4.5	<i>La variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active.</i> . . . . .	46
4.6	<i>Variation de la densité d'électrons injectés au seuil Nth en fonction de l'épaisseur de la couche active</i> . . . . .	47

## TABLE DES FIGURES

---

4.7	<i>Variation du courant de seuil en fonction de l'épaisseur de la couche active.</i>	48
-----	--	----

---

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	<i>Extrait de la classification périodique des éléments.</i>	5
1.2	<i>Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300 K.</i>	6
1.3	<i>résumé quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.</i>	8
1.4	<i>Exemple de valeurs du gap et de la distance interatomique.</i>	9
2.1	<i>donne les travaux de sortie de quelques métaux[1].</i>	16
2.2	<i>Les travaux de sortie et les affinités de semi-conducteur[1, 2].</i>	18
3.1	<i>Les Paramètres physiques d'un laser</i>	30
4.1	<i>Paramètres électroniques utilisés pour la simulation.</i>	42

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans les débuts de télécommunications par fibre optique, le choix des sources s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteurs à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du coeur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique.

Le nitrure de gallium (GaN) est reconnu comme l'un des composés semiconducteurs les plus intéressants, bien adapté pour fonctionner dans toute application dans laquelle les températures environnementales ou le niveau de rayonnement pourraient endommager l'électronique traditionnelle en silicium (Si) ou en arséniure de gallium (GaAs) [1]. Par rapport aux matériaux plus conventionnels, les propriétés les plus intéressantes du GaN sont son énergie à large bande interdite, sa vitesse de saturation élevée des porteurs, sa conductivité thermique et sa stabilité élevées, son champ électrique de claquage élevé. et capacité à former des hétérostructures de haute qualité avec de bonnes propriétés de transport [2]. Ces dernières années, un grand nombre de dispositifs à base de GaN, tels que des diodes électroluminescentes, des diodes laser, des photodétecteurs et des détecteurs de rayonnement ont été proposés [3-5].

Le « LASER » optique est constitué par les initiales de light amplification by stimulated emission of radiation c'est-à-dire, amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement, une source exceptionnelle de rayonnement, capable de produire dans des bandes spectrales extrêmement fines d'intenses champ électro-

magnétiques cohérent dans l'intervalle spectral s'étageant de l'infrarouge lointain à l'ultraviolet. Seuls quelques processus physiques simples contribuent au fonctionnement d'un laser.

Notre objectif à d'optimiser les meilleures performances AlGaAs/GaAs pour l'utilisation dans une chaîne de transmission par fibre optique. Les résultats actuels confirment globalement que l' $Al_xGa_{1-x}As$  représente le meilleur choix dans le domaine de la photo détection.

La réalisation du présent travail est répartie en quatre chapitres, dans le premier chapitre est consacré à quelques notions de base relatives aux alliages semi-conducteurs III-V. Le paramètre de réseau, la structure cristalline, la liaison atomique, la structure de bande d'énergie et quelques propriétés optiques en l'occurrence.

Le deuxième chapitre et Dans le troisième chapitre nous allons donner une description du fonctionnement du laser à semi-conducteur, des avantages de ce type de laser, de ses domaines d'application, ainsi que, les matériaux choisis pour les construire.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la structure AlGaAs/GaAs et ensuite nous avons changé les paramètres physiques et technologiques donnant les meilleurs performances de la structure.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et présentées quelques perspectives de ce travail.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GÉNÉRALITÉ SUR SEMI-CONDUCTEURS III-V

## 1.1 Introduction

Les nitrures III-N présentent un intérêt fondamental pour les applications en microélectronique de puissance, haute fréquence et pour l'optoélectronique dans les domaines spectrales bleu et ultra-violet (LED, Lasers, Photo détecteurs). Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion de base aux alliages semi-conducteurs.

## 1.2 Définition d'un semi-conducteur

Ils ont une résistivité intermédiaire entre les conducteurs et les isolants et sont isolants au zéro absolu. Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Les matériaux qui nous intéressent sont les semi-conducteurs. Dans ces matériaux, la distance séparant la bande de valence de la bande de conduction est beaucoup plus petite que dans le cas d'isolants. Pour transférer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, il faut fournir une énergie supérieure à seulement 1-3eV, la Figure. I.1 représente les bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et Conducteur.[1]

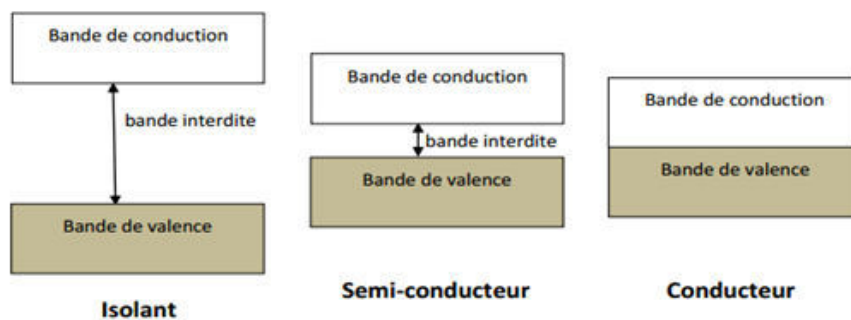


FIGURE 1.1 – Bandes d'énergies pour les matériaux Isolant, Semi-conducteur et conducteur.

### 1.2.1 Définition des semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3<sup>ème</sup> et la 5<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique. Ils servent de base pour les dispositifs optoélectronique. Les semi-conducteurs III-V présentent un grand intérêt en raison de leur propriétés :[2] ▷ Ils sont robustes. ▷ Ils possèdent une conductivité thermique élevée. ▷ leur point de fusion est élevé. ▷ Ils ont une bande interdite directe.

▷ Ils sont robustes. ▷ Ils possèdent une conductivité thermique élevée. ▷ leur point de fusion est élevé. ▷ Ils ont une bande interdite directe.

TABLE 1.1 – Extrait de la classification périodique des éléments.

III	IV	V
B (5)	C (6)	N (7)
Al (13)	Si (14)	P (15)
Ga (31)	Ge (32)	As (33)
In (49)	Sn (50)	Sb (51)
Tl (81)	Pb (82)	Bi (83)

## 1.3 Les alliages semi-conducteurs III-V

### 1.3.1 Définition d'un alliage :

On entend par un alliage un mélange homogène de deux ou plusieurs matériaux. Avec Le développement rapide des techniques de la croissance cristalline en peut réaliser des plusieurs alliages binaires, ternaires et quaternaires.

### 1.3.2 Les composés semi-conducteurs III-V

Après les spectaculaires résultats enregistrés dans la technologie Silicium dans le domaine de la microélectronique, la recherche de composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles du Silicium, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à des nouveaux matériaux et en particulier les composés semi-conducteurs III-V. C'est alors qu'une nouvelle classe de matériaux fait son apparition, basés sur la création d'un potentiel dans un cristal par :[3] ▷ La modulation de dopage. ▷ La variation de composition d'un alliage. ▷ La combinaison des deux méthodes précédentes.

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la III colonne et d'un élément de la V colonne de la classification périodique de Mendeleïev. Le tableau I-1 regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

#### Les composés binaires

On peut construire des matériaux semi-conducteurs III-V, tels que en associant des éléments de la colonne III et des éléments de la colonne V de la classification périodiques de Mendeleïev à raison de un atome de la colonne III pour un atome de la colonne V, comme on peut réaliser ainsi des semi-conducteurs composés III-V :[4-6]

TABLE 1.2 – Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300 K.

Binaires III-V	$E_g$ (eV)	$m^*/m_0$	$\mu$ (cm <sup>2</sup> /VS)	$a$ (Å)
BN	7,5			3,6150
AlP	2,45			5,4510
AlAs	2,16			5,6605
AlSb	1,58	0,12	200	6,1355
BP	2,0			4,5380
GaN	3,36	0,19	380	3,189
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8500	5,6533
GaSb	0,72	0,042	5000	6,0959
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584
InSb	0,17	0,0145	80000	6,4794

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée. Le tableau 1.2. résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

### Les composés ternaires, quaternaires et quinaires

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifiés de la façon suivante :

Il est divisé en deux types : Alliage quaternaire quadratiques de la forme :  $A_1-xB_xCYD_1-Y$ . Alliages quaternaires triangulaires dans cette classe deux cas : Quaternaires cationique triangulaires  $AXBYC_1-x-YD$ . Quaternaires anionique triangulaires  $ABXCYD_1-X-Y$ .

### 1.3.3 Structure cristalline

Les semi-conducteurs III - V cristallisent dans la structure zinc-blende. Ce réseau est constitué de deux sous réseaux cubiques à faces centrées (cfc) interpénétrés, l'un étant formé par les éléments III et l'autre par les éléments V.

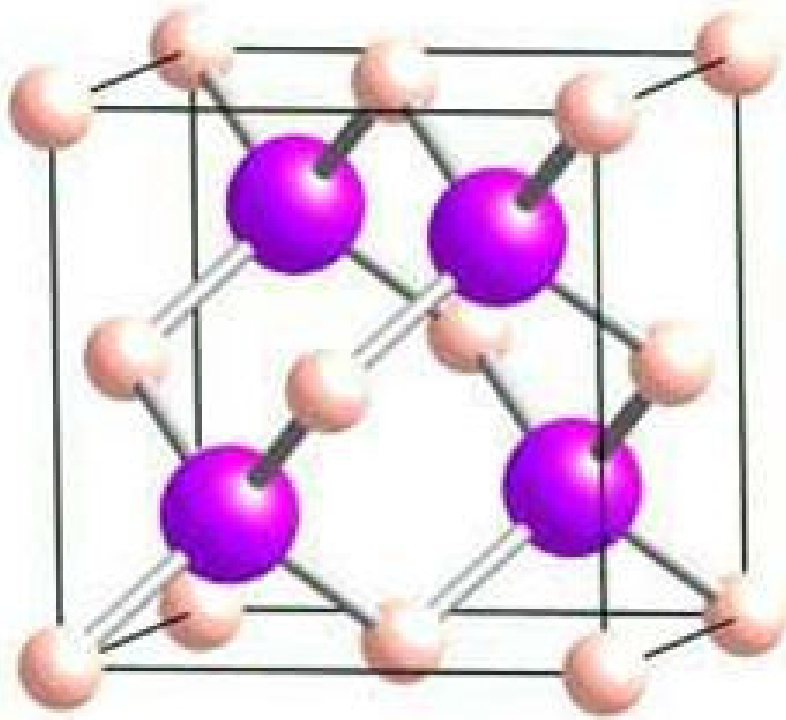


FIGURE 1.2 – Réseau cristallin dans la structure Zinc-blende..

Ces deux sous réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube d'un vecteur  $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$ ,  $a_0$  étant le paramètre cristallin. Chaque atome se trouve ainsi au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce. La maille élémentaire de cette structure zinc-blende est représentée sur la figure 1.2. Le paramètre de maille d'une telle structure dépend de la nature des éléments chimiques mis en jeu. Une maille cristalline est d'autant plus grande que le numéro atomique des éléments la constituant est grand. Ainsi dans le cas d'une structure ternaire d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , l'incorporation d'indium dans la maille cristalline de GaAs augmente le paramètre de maille  $a$  de l'alliage. Habituellement, pour  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , on considère cette variation comme quasi-linéaire et donnée par la loi de Vegard .[7]

$$\text{InGaAs} = \text{GaAs} + (x \text{InAs} - x \text{GaAs})$$

L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bande, montre que les éléments les plus légers donnent des composants et large bande interdite, dans les propriétés se rapprochent des celles des isolants, et le structure de bande indirecte. Les composés incluant du bore, de l'aluminium, ou de l'azote, et le phosphore de gallium Ga P entrent dans cette catégorie ; ils ont en général peut d'intérêt pour L'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité des porteurs, pour L'optoélectronique ou une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions opaques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composants à caractère métallique. On considèrera donc essentiellement les composants à base de gallium (GaAs, Ga Sb), ou d'indium (In P, In As, In Sb), et leurs propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau 1.3 résumé quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.[8]

TABLE 1.3 – résumé quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V.

matériaux	Le gap du matériau	longueur d'onde	Les paramètres des mailles	Structure de la bande interdite
B N	7.5 [01]	0.7 [01]	3.615[19] 2.509[2]	Indirecte
Al N	5.4 [3]	0.23	3.112[19] 3.159[2]	
Ga N	3.299[3]	0.375	4.49 [5] 3.301[2]	Directe
Ga Sb	0.72 [01]	1.85 [01]	6.095[01]	

## 1.4 Les propriétés électronique des semiconducteurs

### 1.4.1 Structures de bandes

### 1.4.2 Bande interdite (gap énergétique)

Dans un semi-conducteur comme dans un isolant, la différence d'énergie entre la bande la bande de conduction et de valence est appelée la bande d'énergie interdite, ou tout simplement un espace visible, par exemple, où le socle de chargement est introuvable. Ce sont les informations de base qui déterminent les propriétés électroniques et optiques de semi-conducteurs et ainsi évaluer leur domaine d'application. Dans les isolants, cette valeur de bande interdite est si grande que les électrons ne peuvent pas il ne peut pas passer d'une bande de valence à une bande de conduction. En ce qui concerne semi-conducteurs, cette plage est suffisamment petite pour une excitation suffisante, les électrons dans la bande de valence sont autorisés à rejoindre la bande de conduction, d'où semi-conducteur peut transporter de l'électricité et donc devenir conducteur. Par contre

TABLE 1.4 – Exemple de valeurs du gap et de la distance interatomique.

Atome	$E_G$ (eV)	Type de matériau	$d$ (Å)
C (Carbone)	5.5	Isolant	3.567
Si (Silicium)	1.12	Semi-conducteur	5.431
Ge (Germanium)	0.7	Semi-conducteur	5.646
Sn (Etain)	0	conducteur	6.489

dans les métaux, on rencontre un chevauchement des bandes, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circulent dans tout le solide .[2] Il existe trois types de matériaux métalliques, les semi-conducteurs l'isolation est illustrée à la figure 1.3

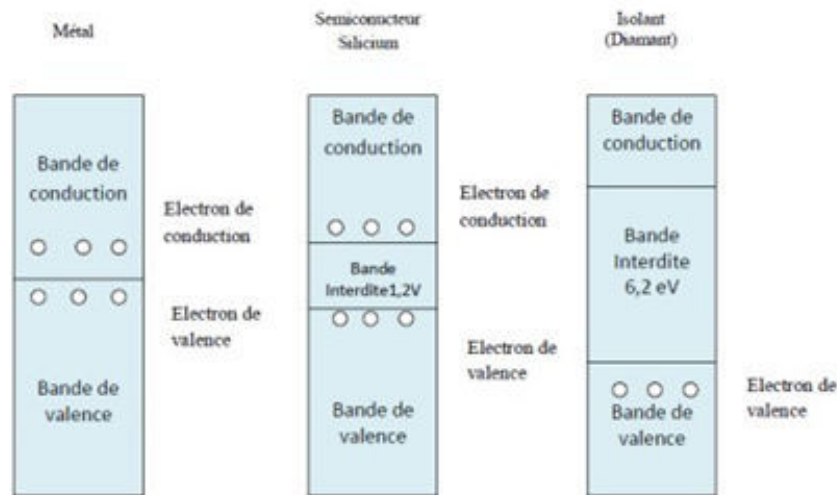


FIGURE 1.3 – Les structures des bandes énergétiques : Métal, semi-conducteur, isolant.

Le tableau suivant présente quelques exemples de largeur de bande interdite ainsi que la distance interatomique.

### 1.4.3 Gap direct et gap indirect

Pour un cristal semi-conducteur, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont caractérisés par une énergie  $E$  et un vecteur d'onde  $k$ . Le gap étant défini, comme étant la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence [10]. Les structures de bandes représentées sur la figure (1.4) font apparaître deux types fondamentaux de semi-conducteurs .

Atome	$E_G$ (eV)	Type de matériau	d (Å)
C (Carbone)	5.5	Isolant	3.567
Si (Silicium)	1.12	Semi-conducteur	5.431
Ge (Germanium)	0.7	Semi-conducteur	5.646
Sn (Etain)	0	conducteur	6.489

FIGURE 1.4 – Les transitions optique directes et indirectes.

## 1.5 Effet de la température sur les semi-conducteurs

La variation de l'énergie de bande interdite  $E_g$  (T) en fonction de la température est généralement décrite par la formule empirique de Varshni : [9-11]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T} \quad (1.1)$$

Avec :  $E_g(0)$  : gap d'énergie à la température 0 K.

$\alpha$  et  $\beta$  : Coefficients de Varshni

## 1.6 Effet de la pression sur le gap d'énergie

Généralement sous l'effet d'une pression, il y a des variations remarquables dans les écarts d'énergie entre les bandes de valence et les bandes de conduction. Le gap d'énergie en fonction de la pression est donné par le modèle de MURNAGAN : [8]

$$E_g(p) = E_g(0) + \frac{dE_g}{dp} \cdot p + \frac{d^2E_g}{dp^2} \cdot p^2 \quad (1.2)$$

$E_g(p)$  et  $E_g(0)$  : représentent les gaps d'énergie en fonction de pression P et une pression normale.  $\frac{dE_g}{dp}$  : Coefficient de pression linéaire.

$\frac{d^2E_g}{dp^2}$  : Coefficient de pression quadratique.

## 1.7 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V :

Une attention toute particulière est donnée à la fonction diélectrique complexe qui est le coeur de l'analyse de la réponse optique des semi-conducteurs. La connaissance des propriétés optiques est d'une importance majeure dans la conception des dispositifs optoélectroniques.[12]

### 1.7.1 Phénomènes d'absorption dans les semi-conducteurs :

Le phénomène d'absorption peut se produire soit selon un processus intra-bande, soit selon un processus inter-bande. L'absorption inter-bande se produit lors d'une transition électronique d'un état initial  $(E_v, k_v)$  de la bande de valence vers un état  $(E_c, k_c)$  de la bande de conduction (fig. I-7). On dit que cette transition est directe si les conditions de conservation de l'énergie et du vecteur d'onde imposent que :  $k_v = k_c$ . Une transition indirecte ne peut, cependant, exister que si l'absorption s'accompagne de l'émission ou de l'absorption d'un phonon et dans ce cas la relation devient : [13]

$$\vec{\rho} = \vec{k}_c - \vec{k}_v \quad (1.3)$$

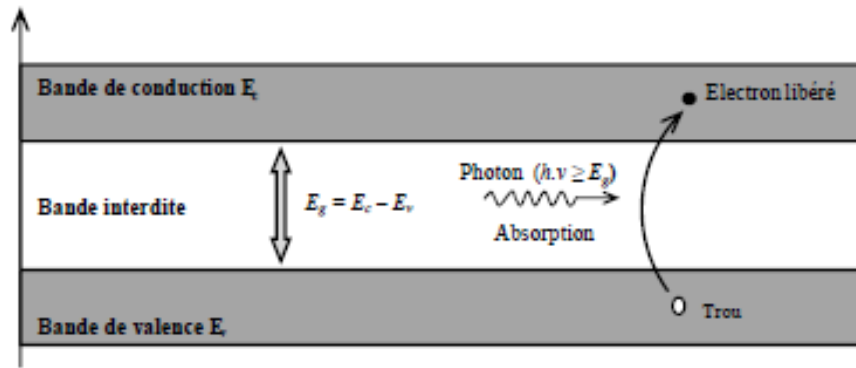


FIGURE 1.5 – Phénomène d'absorption.

## 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives aux alliages semi-conducteurs III-V, telles que la structure cristalline, la liaison atomique, la structure de bande d'énergie et les propriétés optiques. Nous avons, également, vu quelques généralités sur les matériaux nitrures d'éléments III (III-N). Nous avons, enfin, donné les propriétés des binaires GaN

## Références

[1] L.L.Y. Voon, M. Willatzen, M. Cardona, N. Christensen, Physical review B 53 (1996) 10703.

[2] S. Adachi, Properties of semiconductor alloys : group-IV, III-V and II-VI semiconductors, John Wiley Sons, 2009.

[3] H. Grimmeiss, H. Koelmans, Zeitschrift für Naturforschung A 14 (1959) 264-271.

[4] J.-F. Goullin, Bulletin de Minéralogie 92 (1969) 590-594.

[5] I. Akasaki, Journal of Crystal Growth 237 (2002) 905-911.

[6] H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide, N. Sawaki, Thin Solid Films 163 (1988) 415-420.

[7] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, Applied Physics Letters 64 (1994) 1687-1689.

[8] A. Chakroun, R. ARES, V. AIMEZ, S. CHARLEBOIS, REALISATION DE STRUCTURES METAL-ISOLANT-SEMICONDUCTEUR SUR GaN PAR DÉPOSITION PECVD DE SixNv, 2012.

[9] A. Souguir-Aouani, Conception d'une nouvelle génération de redresseur Schottky de puissance en Nitrure de Gallium (GaN), étude, simulation et réalisation d'un démonstrateur, in : Lyon, 2016.

[10] A. Trampert, O. Brandt and K. H. Ploog, in Crystal structure of group III Nitrides, edited by J. I. Pankove

[11] Mémoire de mastre « étude propriété de matériaux semi-conducteurs III-V Présenté par : BENDAOUIDI Sofiane .Anne unvirtaire 2012/2013

[12] Thèse de doctorat de H.Abid « contribution à l'étude des propriétés électroniques et optiques des alliages semi-conducteurs de type III-V.

[13]E. Al Alam<sup>1,2,\*</sup>, A. Cazarré<sup>1,2</sup>, F. Morancho<sup>1,2</sup>, K. Isoird<sup>1,2</sup>, Y. Cordier<sup>3</sup> 1 CNRS-LAAS; 7, avenue du colonel Roche, 31077 Toulouse, France 2 Université de Toulouse; UPS, INSA, INP 3 CNRS-CRHEA; rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne, France

---

---

## CHAPITRE 2

---

# GÉNÉRALITÉ SUR LES HÉTÉROJONCTIONS

### 2.1 Introduction

La physique des semi-conducteurs joue un rôle très important pour la réalisation des nouvelles composants technologiques soit électronique à bande interdite indirecte ou optoélectronique à bande interdite directe ,cela a permis une large diffusion des utilisations dans plusieurs domaines. Dans ce chapitre nous allons traiter essentiellement des techniques sur les semi-conducteurs comme suivants :

### 2.2 Jonction Métal - semi-conducteur

#### 2.2.1 Travail de sortie

Dans l'étude des structures Métal / Semi-conducteur est la détermination de la barrière de potentiel qui existe à différentes interfaces Métal / Semi-conducteur. L'énergie minimum qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal au niveau du vide. Cette dernière appelée travail de sortie du métal (Le travail de sortie des métaux peut varier de 2 eV à 6 eV) la fonction du travail du semi-

TABLE 2.1 – donne les travaux de sortie de quelques métaux[1].

Métal	$q\phi_m$	Métal	$q\phi_m$	Métal	$q\phi_m$
Ag	4.63	Ga	4.32	Pd	5.41
Al	4.17	Hf	3.9	Pt	5.55
Au	5.38	Hg	4.47	Re	4.72
Ba	2.52	In	4.09	Rh	4.98
Be	4.98	Ir	5.46	Ru	4.71
Bi	4.34	K	2.29	Sb	4.63
Ca	2.87	Mg	3.66	Sm	2.7
Fr	4.6	Na	2.3	Rb	1.8

conducteur est définie comme étant l'énergie qu'il faut fournir pour extraire un électron depuis le niveau de Fermi  $E_{fsc}$  au niveau du vide  $N_v$ , cette dernière est donnée par la relation :[1]

$$\phi_m = N_v - E_{fm} \quad (2.1)$$

$$\phi_{sc} = q(\chi - \phi_n) \quad (2.2)$$

$$\phi_n = E_{Csc} - E_{fsc} \quad (2.3)$$

$\Phi$  et  $\chi$  la barrière de potentiel dans le semi-conducteur et l'affinité Electronique.

Le tableau ci-dessous donne les travaux de sortie de quelques métaux :

### 2.2.2 Affinité électronique

Afin de définir la référence énergétique, le semi-conducteur avait été entraté en charge de la bande de conduction. Cette énergie avait été intégrée par un électron de la bande de conduction, pour l'extraire du Sc et l'amener dans le vide sans vitesse initiale ; C'est l'affinité électronique  $q$ , une grandeur spécifique du Sc ou de l'isolant.[2]

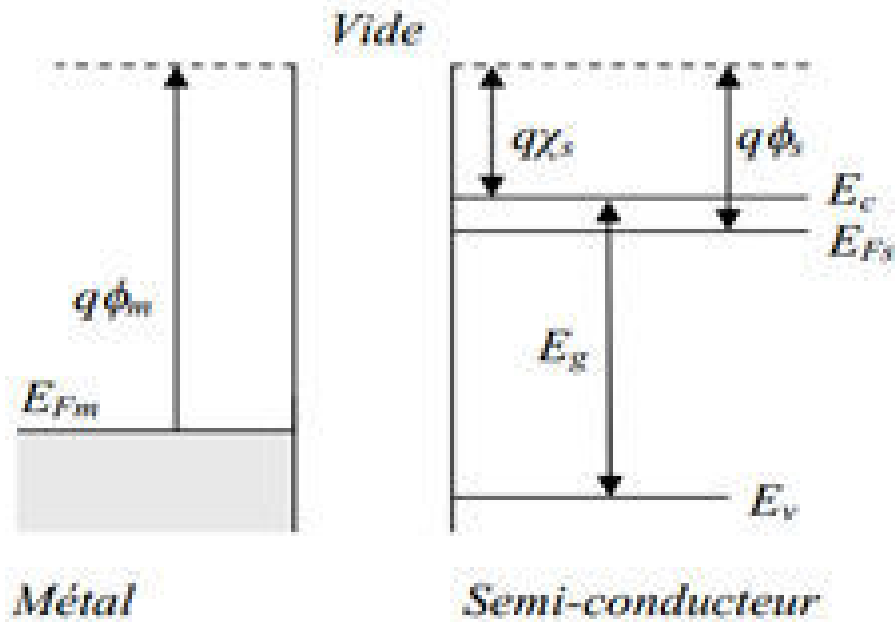


FIGURE 2.1 – Structure de bande métal-semi-conducteur de type n[3].

## 2.3 Théories de formation de barrière Schottky

### 2.3.1 Hétérojonction

Une hétérostructure est une jonction formée par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes. Les hétérostructures semi-conducteur-semi-conducteur sont généralement des hétéroépitaxies car les deux semi-conducteurs mis en présence ont la même structure cristallographique (cubique faces centrées la plupart du temps) et un relatif accord de maille. Quand les deux Semi-conducteurs ont une conductivité du même type, l'hétérostructure est dite isotype. Dans le cas contraire elle est anisotype [3].

#### Les différents types d'hétérojonctions

Par définition, une hétérojonction est obtenue lorsque deux matériaux semi-conducteurs différents sont associés. Sa réalisation s'effectue par croissance cristalline d'un matériau sur l'autre et nécessite l'utilisation de semi-conducteurs ayant des propriétés cristallines voisines (la taille des atomes doit être notamment assez proche). Selon les matériaux utilisés pour les semi-conducteurs, on peut distinguer trois types d'hétérojonctions [4].

Le schéma de la figure 2.2 donne une description schématique des décalages de bandes de conduction et de valence pour trois types d'hétérojonction [4].

TABLE 2.2 – Les travaux de sortie et les affinités de semi-conducteur[1, 2].

semi-conducteur	$q\chi$	$q\phi_{sc}$	
Si	4.01	5.13	Simple IV
Ge	4.13	4.79	
AlP	3.44	5.89	Composés III-VI
AlAs	3.5	5.66	
AlSb	3.6	5.2	
GaP	4.3	6.55	
GaSb	4.06	4.74	
GaN	4.1		
ZnS	3.9	7.84	Composés II- VI
ZnSe	4.09	6.76	
ZnTe	3.5	5.76	
CdS	4.5	6.92	

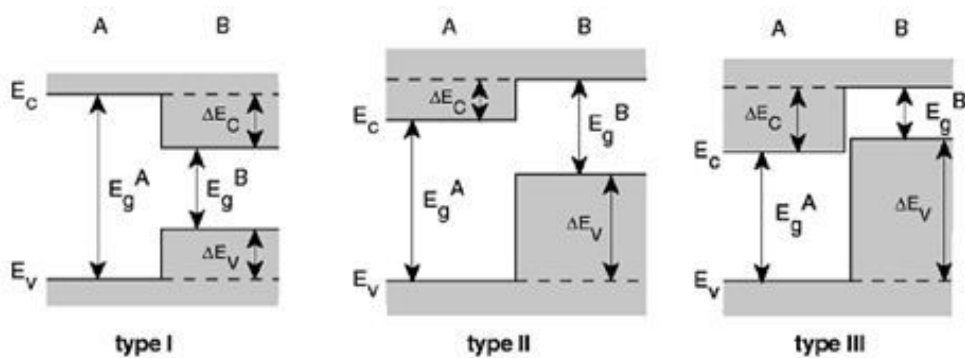


FIGURE 2.2 – Diagrammes schématiques montrant deux types différents d'hétérojonction.

type I : la bande interdite  $E^B$  est entièrement dans  $E^A$ .

type II : Une des discontinuités est plus grande que  $E^A - E^B$  mais inférieure à  $E^A$ .

type III : une des discontinuités est supérieure à  $E^A$ .

le Diagramme de bande d'énergie Soient SC 1 et SC2, deux semi-conducteurs, le premier de type (p), et le second de type (n), caractérisés par les affinités électroniques  $e_p$  et  $e_n$ , pour les gaps ( $E_{gp}$ ) et ( $E_{gn}$ ), les travaux d'extraction  $e_p$  et  $e_n$ ; en l'absence de tout contact, les diagrammes énergétiques dans chacun des

semi-conducteurs, sont représentés sur la Figure 2.3. Les deux semi-conducteurs étant indépendants, la distribution des électrons dans chacun d'eux est indépendante de l'autre, de sorte que les distributions sont caractérisées par deux niveaux de Fermi différents  $E_{Fp}$  et  $E_{Fn}$ . [4]

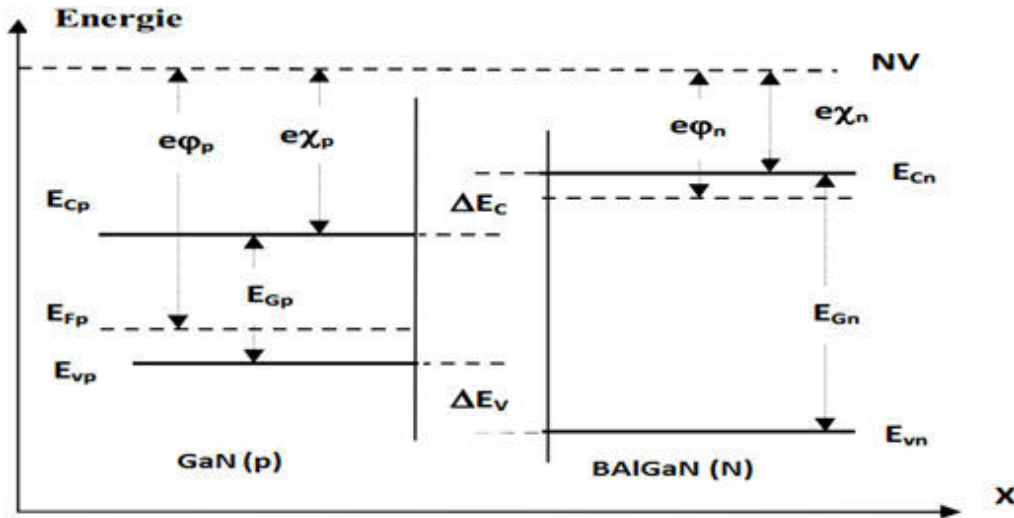


FIGURE 2.3 – Diagramme d'énergie d'une hétérojonction anisotype BAlGaN/GaN avant contact.

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi, de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentiel (la tension de diffusion) qui arrête la diffusion des porteurs et des charges qui définit l'état d'équilibre [5], la figure (2.3) est donnée :

$$Vd = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.4)$$

La différence d'énergie de bande de conduction  $E_c$  et bande de valence  $E_v$  est donner par :

$$\Delta E_c = \Delta \chi \quad (2.5)$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta \chi \quad (2.6)$$

$\Delta \chi$  et  $\Delta E_g$  représentent respectivement les différences d'affinité électronique, et de bande interdite entre les deux semi-conducteurs [6]

## 2.4 Structure MOS :

La structure M.O.S (Métal Oxyde Semi-conducteur, Métal Oxyde Semi-conducteur) c'est une structure du type M.I.S. (Métal Isolant Semi-conducteur, Métal Isolant Semi-conducteur). Ces structures, (première réalisations en 1970) sont devenues le composant fondamental de l'électronique moderne. Depuis les années 70, on observe une augmentation du nombre des structures intégrées sur une puce d'un facteur 4 tous les 3 ans, Elles sont d'éléments des bases des réseaux denses adressables capable de remplir des fonctions variées telle que la détection d'image, le stockage de données, les opérations logiques, le traitement des signaux.[3-5] L'élément actif d'un nouveau type de transistor le M.O.S.F.E.T. (Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor).

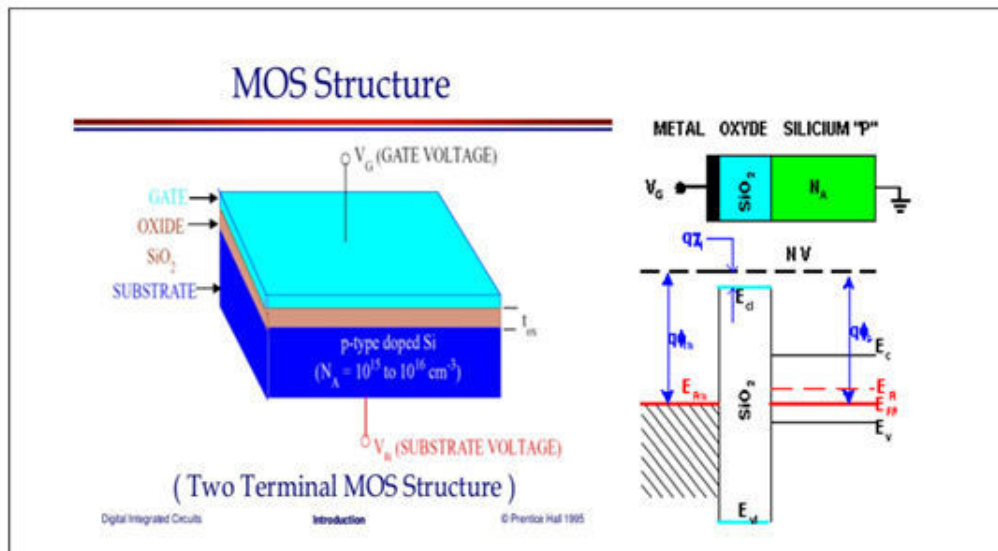


FIGURE 2.4 – la Structure MOS.

## 2.5 Puits quantiques

Un puits quantique peut s'obtenir par l'empilement successif des couches planes à partir des matériaux différents, par exemple un matériau de petit gap tourné à chaque côté par un matériau de plus grand gap. Dans ce cas, les électrons voient un puits de potentiel carré avec une barrière de hauteur finie.[7] Figure 2.5 : Il existe trois types de puits quantique :

Figure 2.5 : Il existe trois types de puits quantique :

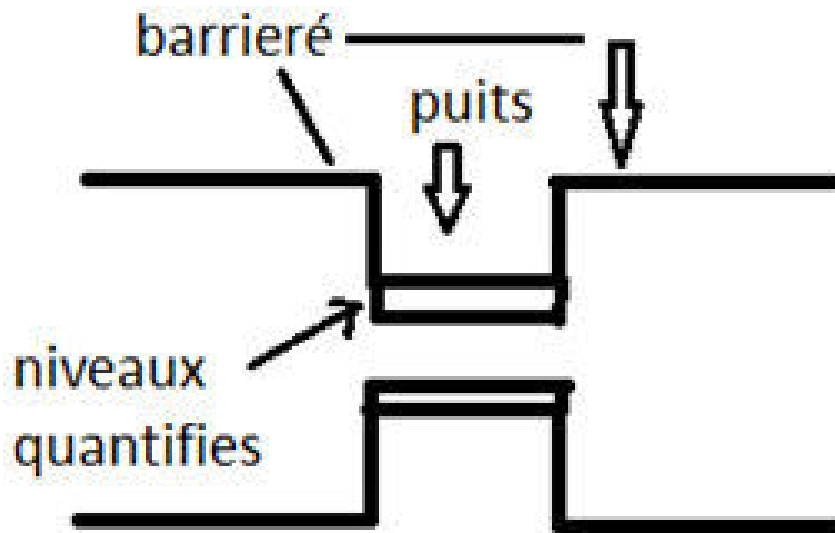


FIGURE 2.5 – le Schéma d'une structure de puits quantique.

### 2.5.1 Puits quantiques de type-I :

Si les électrons et les trous sont confinés dans le même matériau constituant le puits. L'énergie du photon dépend des énergies de confinement des porteurs et du gap du matériau puits

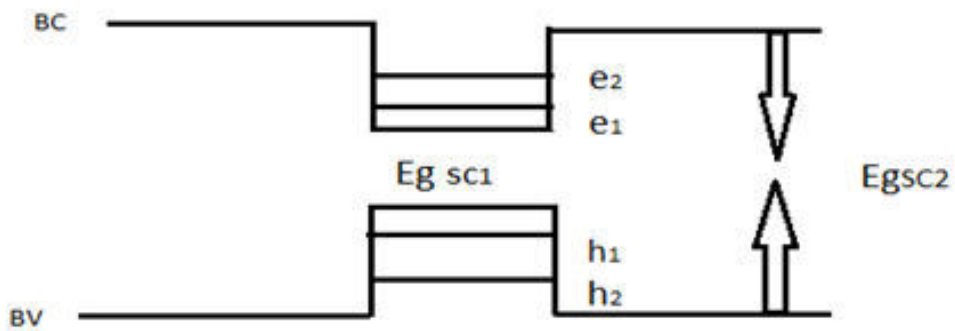


FIGURE 2.6 – Profil de puits quantique de type I.

### 2.5.2 Puits quantiques de type-II :

Des puits quantiques de type-II où les porteurs sont confinés dans deux matériaux adjacents. Dans ce cas, l'énergie du photon est fonction des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux formant l'hétérostructures

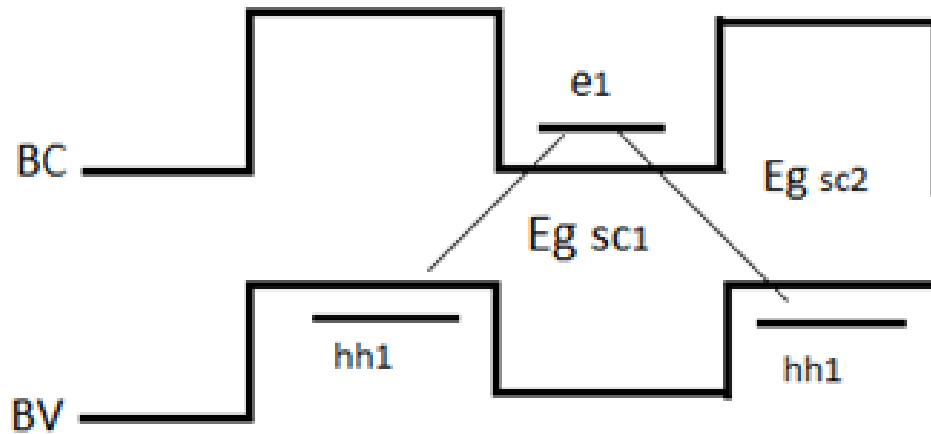


FIGURE 2.7 – Profil de puits quantique de type II.

### 2.5.3 Puits quantiques de type-III :

La configuration dite de type-III qui est un cas particulier du type-II dans lequel le bas de la bande de conduction se trouve en dessous du haut de la bande de valence. Cette situation appelé aussi configuration semi-métallique, Elle offre une grande souplesse dans le choix de la longueur d'onde d'émission.

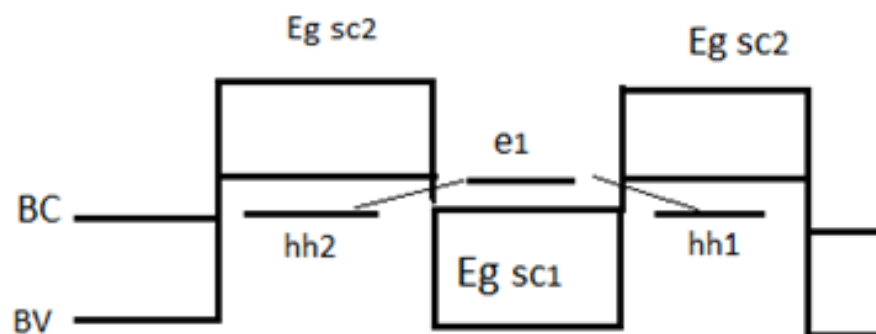


FIGURE 2.8 – le Profil de puits quantique de type III.

## 2.6 L'épitaxie

C'est une méthode technologique consistant à faire croître un cristal sur un cristal. Etymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", si "l'arrangement". La technique va donc consister à utiliser le substrat comme le neutre de germe de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche.[6-8]

### 2.6.1 Epitaxie en phase vapeur :

Cette technique est la plus connue pour le matériau silicium. Cette opération consiste à faire croître le cristal à partir de sources de gaz contenant les éléments dopants qui se fait dans un réacteur ou épi-réacteur (tube en quartz à axe horizontal ou vertical). Dans le réacteur, les gaz se dissocient pour fournir par exemple le silicium qui se dépose à la surface des plaquettes. Pour assurer une bonne croissance ces dernières sont chauffées. Suivant la température de croissance, les réactions mises en jeu sont très différentes et qu'elles peuvent même conduire à des effets négatifs. Il faudra donc aussi contrôler les équilibres chimiques par injections de gaz résultant de la décomposition de la source. Il trois type de réacteur : (a) système horizontal, (b) système vertical et (c) système à barillet.

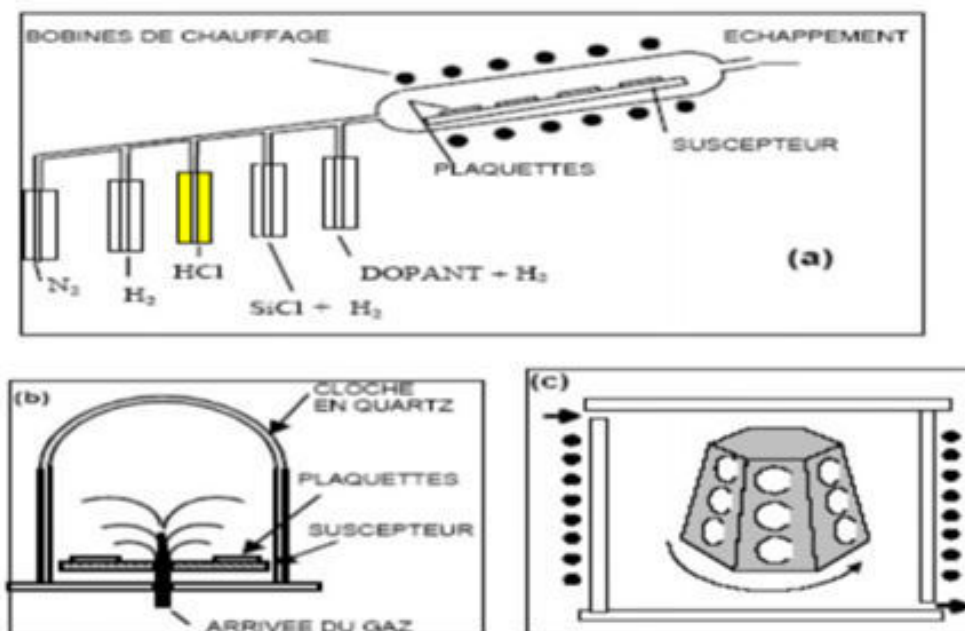


FIGURE 2.9 – Epitaxie en phase vapeur.

### 2.6.2 Epitaxie en phase liquide :

Cette technique est notamment utilisée pour la réalisation des couches de GaAs. Elle permet le dépt au cours d'un même cycle, d'une ou plusieurs couches de GaAs ou d'un composé de celui-ci tel que le GaAlAs. La technique dite de « four horizontal » met en euvre un creuset de graphite muni de cloisons et traversé par une tirette ou glissière mobile porte-substrat .

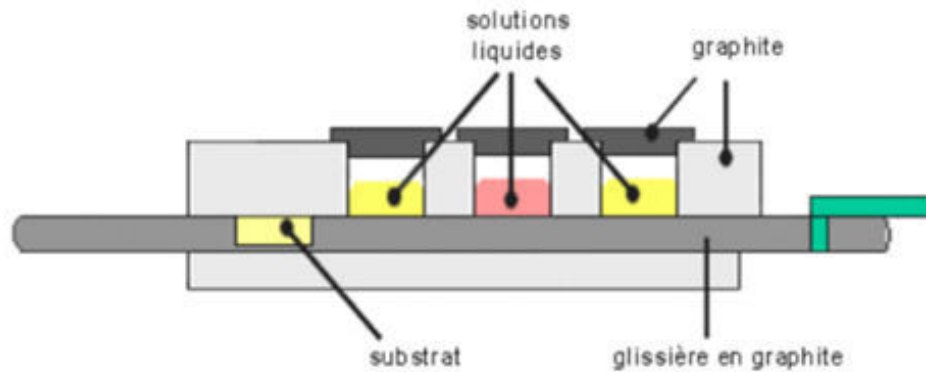


FIGURE 2.10 – Epithaxie en phase liquide.

Par simple déplacement de la tirette, on peut mettre le substrat en contact avec plusieurs solutions liquides successivement et réaliser ainsi des couches d'épaisseur et de dopage différents. -l'ensemble est placé dans un tube en quartz chauffé et balayé par un flux d'H<sub>2</sub> pour éviter toutes contaminations du graphite et des matériaux d'épithaxie. -Pour doper les couches épithaxiques, on les introduit sous atmosphère neutre dans les bains en même temps. Type N (tellure Te et surtout l'étain Sn) et pour type P (Zn et Ge).

### 2.6.3 Epithaxie par jet moléculaire EJM : MBE (Molecular Beam Epitaxy)

L'épithaxie par jets moléculaires est une version très sophistiquée de l'évaporation sous vide par chauffage (cellule de Knudsen). Elle permet à partir d'une ou plusieurs sources de faire interagir dans une enceinte, des flux contrôlés d'atomes ou de molécules formant un jet moléculaire sur un substrat porté à une température convenable dans des conditions d'ultra vide (10<sup>-10</sup> Pa). On peut ainsi réaliser couche par couche des structures très complexes telles que les super réseaux, les diodes laser, les transistors à forte mobilité d'électron (HEMT). Elle permet de faire croître ainsi des couches homoépithaxiques ou hétéroépithaxiques tout en contrôlant pendant l'opération :[10]

- ▷ la composition chimique
- ▷ l'épaisseur
- ▷ la perfection cristalline
- ▷ le dopage

Le processus s'avère particulièrement bien adapté à la préparation de films de composés III-V. Sa souplesse est telle qu'elle permet : -obtention d'un bon état de surface : rugosité  $< 10 \text{ \AA}$  -obtention de variations de dopage et/ou composition des couches, soit graduellement, soit abrupte sur une épaisseur de qlqs  $\text{\AA}$  -T de substrat relativement faible (500c) don ça évite les phénomènes de diffusion couche-substrat -bon contrôle de la vitesse de croissance (0.1 à 5  $\mu\text{m/h}$ ) et donc une maîtrise de l'épaisseur . Les bâtis d'épitaxie EJM si=ont complexes :

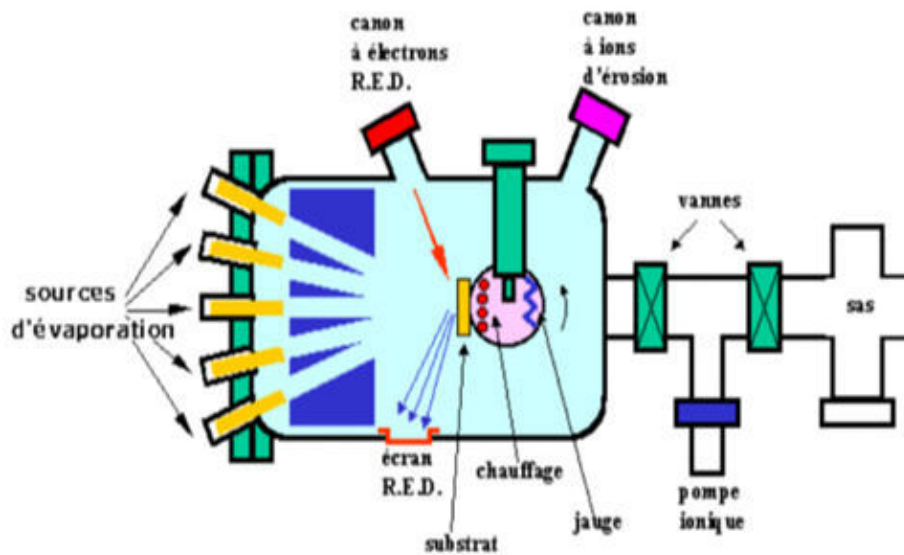


FIGURE 2.11 – Epitaxie par jet moléculaire EJM .

## 2.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons étudié les structures Homo-jonction, Jonction Métal - semi-conducteur ainsi la Structure MOS et les Hétérojonctions on citant les différents types des puits quantiques et on terminant par des méthodes de croissance de ces dernies.

## Références

D.R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics, CRC press, 2004.

[2] H. Mathieu, H. Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Dunod Paris, 2001.

[3] S. Sze, There is no corresponding record for this reference.[Google Scholar] 790-838.

[4] G. Greco, F. Iucolano, F. Roccaforte, Applied surface science 383 (2016) 324-345.

[5] J. Bardeen, Physical review 71 (1947) 717.

[6] O. TERGHINI, Simulation numérique des effets de radiation dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p, in : Université de Biskra, 2015.

[7] N. Vellas, Études expérimentales de transistors HFET de la filière nitrure de gallium pour des applications de puissances hyperfréquences, in : Lille 1, 2003.

[8] A. Cowley, S. Sze, Journal of Applied Physics 36 (1965) 3212-3220.

---

---

## CHAPITRE 3

---

### LES DIODES LASER

### 3.1 Introduction

Depuis le début des télécommunications par la fibre optique, le choix des sources Optiques s’est porté sur les émetteurs à semi-conducteur à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité et moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique. Nous exposons dans ce chapitre les paramètres nécessaires à l’optimisation du gain optique, du facteur de confinement et la longueur d’onde pour de la structure BAIGaN/GaN à base de nitrures.

### 3.2 Diode laser

Le laser (amplification optique par l’émission stimulée du rayonnement) basé sur le phénomène de l’émission stimulée, qui a été postulée par Einstein dans les années 1910. La lumière laser est intense et cohérente. Le principe du laser est illustré dans (figure 3.1). Le milieu actif, d’où le laser prend son nom, peut être gaz, liquide, solide amorphe, ou semi-conducteur. le trois principale composants d’un laser sont les suivants :un milieu active et un mécanisme du pompage et un résonateur optique.[1][2]

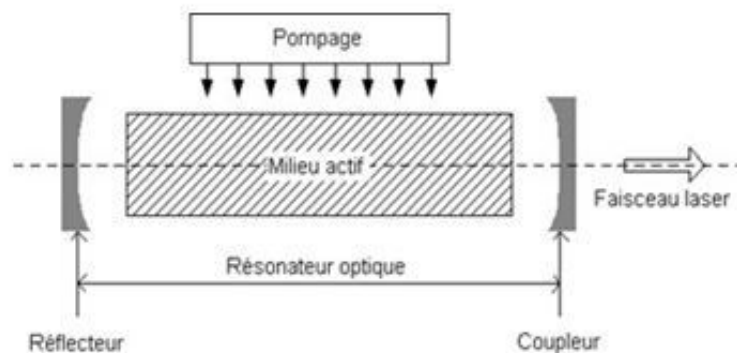


FIGURE 3.1 – Schéma d’un system laser

Le laser à semi-conducteur s’appelle également laser à injection, laser à jonction ou diode laser.

### 3.3 Les Paramètres physique d’un laser

Description Paramètre physique le tableau 3-1 : qui résume Les Paramètres physiques d’un laser

TABLE 3.1 – Les Paramètres physiques d'un laser

Description	Paramètre physique
Longueur d'onde	$\lambda$
Le gain maximal	G
la densité de porteur	J ( $\text{cm}^{-3}$ )
courant de pompage	J ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
La largeur de la zone active	Lz (nm)
Le facteur confinement optique	$\Gamma$

## 3.4 Interaction électron-photon

### 3.4.1 Absorption

Un atome stable situé au niveau d'énergie inférieur E2 peut absorber un photon de fréquence  $\nu$ , déjà présent dans le milieu et se déplace vers un niveau d'énergie supérieur E1, l'importance de cette absorption dépend évidemment du nombre de photons de fréquence  $\nu$  présents dans le milieu. Un atome excité situé au niveau d'énergie supérieure E1 a une durée de vie limitée.[3] Cette transition a pour conséquence de diminuer d'une unité la population N2 des atomes situés au d'énergie E2 et d'augmenter d'une unité la population N1 des atomes situés au niveau d'énergie E1.

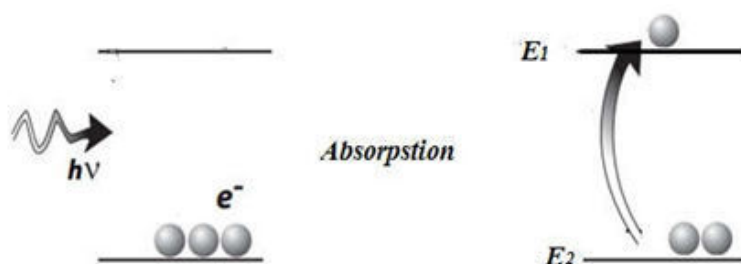


FIGURE 3.2 – Absorption dans un système à deux niveaux.

### 3.4.2 Emission spontanée

Un atome excité situé au niveau d'énergie supérieur E1 retourne spontanément et aléatoirement vers un état stable situé au niveau d'énergie inférieur E2 en émettant un photon. Au cours d'un processus d'émission spontanée, les photons émis par des atomes excités qui se désexcitent en même temps ont une fréquence

rigoureusement égale à la fréquence mais ont une direction aléatoire et une phase quelconque; le rayonnement émis par émission spontanée est quasi monochromatique mais isotrope; c'est le mécanisme d'émission qui régit le fonctionnement des diodes électroluminescentes (DEL).

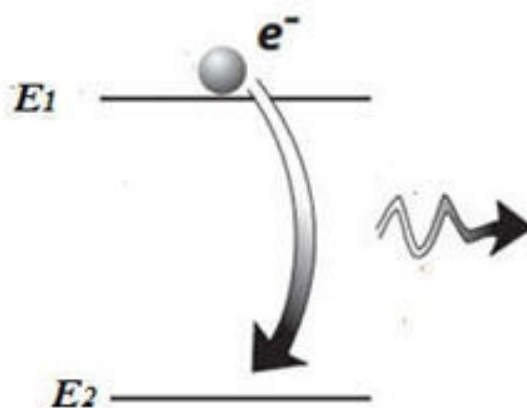


FIGURE 3.3 – Emission spontanée dans un système à deux niveaux.

### 3.4.3 Emission stimulée

Sous l'action d'un photon de fréquence  $\nu$ , présent dans le milieu atomique, un atome excité situé au niveau d'énergie supérieur  $E_1$  peut retourner à l'état stable situé au niveau d'énergie inférieur  $E_2$  en émettant un photon identique en tout point au photon inducteur. Lors du processus de l'émission stimulée, les photons émis par les atomes qui se dés excitent en même temps ont la même fréquence, la même phase, la même direction et la même polarisation que les photons inducteurs. Le principe de l'émission stimulée est connu depuis 1917.[4]

L'émission stimulée crée une population des photons aux caractéristiques identiques, et c'est le principe de base du laser. Cependant l'émission stimulée et l'absorption sont deux phénomènes concurrents. Pour favoriser l'émission stimulée, il faut que la population du niveau excité  $E_1$  soit plus élevée que celle des niveaux fondamental  $E_2$ .

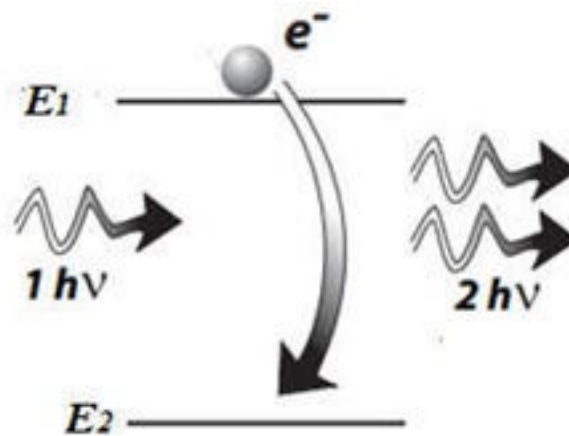


FIGURE 3.4 – Emission stimulée dans un système à deux niveaux.

### 3.4.4 Absorption- Emission spontanée- Emission stimulé SC hors équilibre

Notion de pseudo-niveau de Fermi La fonction (ou distribution) de Fermi-Dirac représente la probabilité qu'un niveau d'énergie  $E$  soit occupé à une température  $T$  donnée.[5] La distribution de Fermi-Dirac pour les électrons est donnée par :

et est illustrée par la figure (3.5) : Cependant, la distribution de Fermi-Dirac

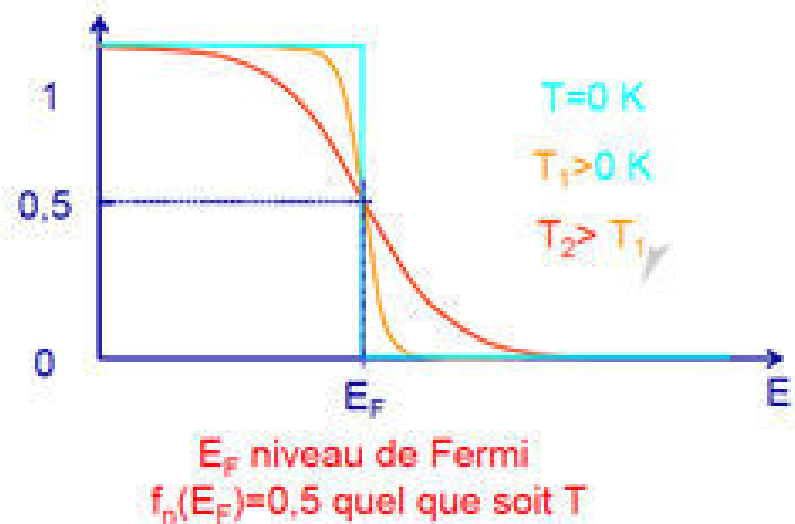


FIGURE 3.5 – Distribution de Fermi-Dirac pour les électrons.

pour les trous est donnée par :

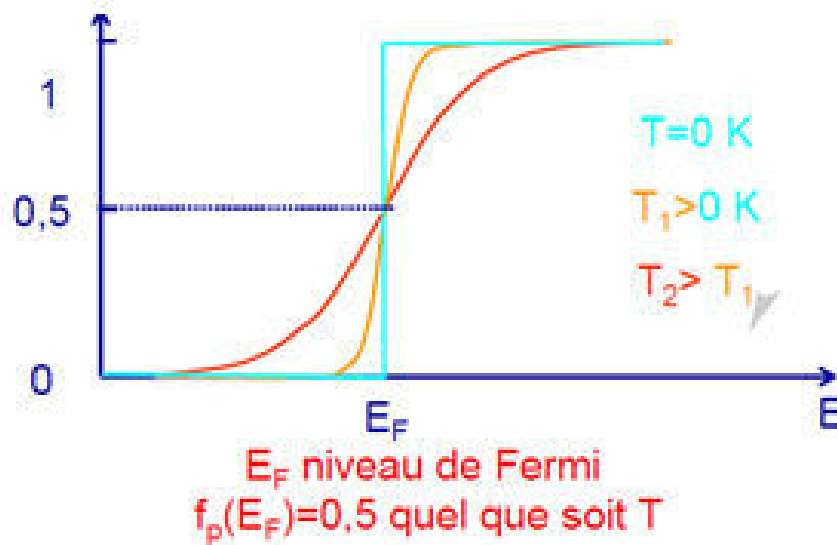


FIGURE 3.6 – Distribution de Fermi-Dirac pour les trous.

Pour l'étude des semi-conducteurs basés sur le silicium, on distingue : La bande de valence(BV) : dernière bande permise « pleine » d'énergie  $E_V$ . La bande de conduction(BC) : première bande permise « vide » d'énergie  $E_C$ . la bande interdite caractérisée par son gap qui est un paramètre intrinsèque d'énergie

$$E_g = E_C - E_V \quad (3.1)$$

### 3.5 Le facteur de confinement

Il exprime la fraction du mode optique qui interagit avec la zone active, étant donné que le mode n'est pas entièrement confiné dans celle-ci comme le montre la figure suivante :[2] Le facteur confinement optique La longueur de la zone active L La largeur de la zone active w La hauteur de la zone active d

Les dimensions w et d sont importantes car elles définissent l'aire de la zone active. Elles entrent notamment dans le calcul du facteur de confinement comme le montre le Calcul suivant. Le calcul du facteur de confinement n'est pas très facile et nécessite une approche numérique, une expression analytique simple permet d'obtenir avec une bonne approximation.[6]

$$\Gamma = \frac{D^2}{2 + D^2} \quad (3.2)$$

$D$  : largeur normalisée de la zone active.

$$D = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(n_a^2 + n_b^2)}.L_z \quad (3.3)$$

$n_a$  : Indice de réfraction de la zone active.  $n_b$  : Indice de réfraction de barrière.  $L_z$  : largeur de puits.  $\lambda$  : La longueur d'onde du rayonnement dans le vide.

### 3.6 Longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur du puits

A la sensation spatiale des électrons, par le champ électrique des trous, s'est essentiellement par leur interaction coulombienne et leur variation des énergies de confinement, et nous pouvons écrire :

$$\Delta\hbar\omega \approx \Delta Ee_1 + \Delta Eh_1 \quad (3.4)$$

Si l'inversion de population des sous bandes fondamentales des électrons et des trous permet de créer un gain supérieur aux pertes, la raie d'émission du laser est donnée par :

$$\Delta\hbar\omega \approx E_g + \Delta Ee_1 + \Delta Eh_1 \quad (3.5)$$

Avec :  $E_g$  : Le gap du matériau constituant le puits.  $Ee_1, E_{h1}$  : Énergies de confinement des électrons et des trous respectivement.

$$Ee_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_e^* L_z^2} (eV) \quad (3.6)$$

$$E_{h1} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_h^* L_z^2} (eV) \quad (3.7)$$

La structure des bandes dans le puits est représentée sur la figure 3.7 ; nous avons voyez que le gap effectif du matériau dans le puits  $E_{g1}$  est augmenter par apport à matériau massif  $E_g$ . La longueur d'onde émise dépend de la largeur de

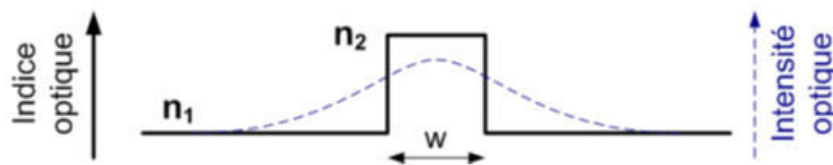


FIGURE 3.7 – le Gap effectif d'une structure à puits quantique

bande interdite du semi-conducteur, dans le cas d'un alliage, celle-ci varie de façon continue en fonction de la composition.

### 3.7 Amplification optique

Lorsqu'on écrit les expressions des taux d'absorption, d'émission spontanée et d'émission stimulée. On obtient alors la façon qualitative pour l'expression suivante du gain.

$$g(E) = k\rho_v(E_e)\rho_c(E_h).[f_c(E_e) + f_v(E_h) - 1] \quad (3.8)$$

Cette relation signifie que dans un semi-conducteur, le gain est proportionnel à : La probabilité de la transition optique (force d'oscillateur)  $K$  À l'inversion de population représentée par le facteur  $f_c+f_v-1$  qui une fois développé permet de retrouver la condition de Bernard et Durraffourg Aux densités d'états des électrons et des trous.[7]

### 3.8 Gain modal :

Dans une hétérostructures, l'expression du coefficient de gain se développe en fonction du nombre  $N$  de puits insérés dans le guide optique. Si les puits, sont découplés (leurs fonctions d'onde ne se recouvrent pas), chaque puits quantique. Nourrit l'amplification du mode optique en fonction de son interaction avec lui,et quantifiée par le facteur de confinement , et de son gain propre .

Dans ce cas appelé lors un gain modal et sera ici noté [5]

$$g_{\text{mod } e} = \sum_i^N \Gamma_i g_i \quad (3.9)$$

### 3.9 gain maximal

Nous utilisons le modèle optique du gain d'Asada [6], dans lequel nous supposons que toutes les sous-bandes sont paraboliques et que les transitions optiques obéissent aux règles de sélection (k.p) .Le gain parabolique pour un puits quantique simple est exprimé comme :

$$g(w) = w \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sum_{n=0}^{N-1} \left( \frac{mr}{\hbar^2 \pi L_z} \right) \int_{E_g}^{\infty} \langle R_{cv}^2 \rangle . (f_c - f_v) F\tau(E_{cv}) dE_{cv} \quad (3.10)$$

Avec :  $\omega$  : La fréquence angulaire de la lumière.

$\mu$  : La perméabilité du matériau.

$\varepsilon$  : La constante diélectrique du matériau.

$m_r$  : La masse effective réduite.

$E_{cv}$  : L'énergie de transition entre les électrons et les trous lourds.

$\langle R_{cv}^2 \rangle$  : L'élément matrice du moment dipolaire constitué par un électron de la sous-bande n dans la bande de conduction et un trou de la sous-bande n dans la bande de valence donné par :

$$\langle R_{cv}^2 \rangle = \frac{\hbar}{\mu} \left( \frac{m_0}{m_e^*} - 1 \right) \frac{(E_g + \Delta_1 + \Delta_2)(E_g + 2\Delta_2) - 2(\Delta_3)}{E_g + 2\Delta_2} \quad (3.11)$$

Nous supposons que le temps de relaxation entre les bandes est le même pour les sous-bandes, le gain optique ainsi donnée par l'expression suivante :

$$R_{cv} = \frac{1}{j} \int \psi_2^*(r) \cdot \nabla_A \psi_1(r) d^3r \quad (3.12)$$

Gain maximal en fonction de la densité de courant d'injection pour un laser [5] :

$$g(\omega) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \omega \cdot \frac{m_e^* \cdot m_v^*}{(m_e^* + m_v^*) \pi \hbar^2 L_z} \sum_{i=0}^{\omega_n} \int_{E_{C1} + E_{hh1} + E_g}^{\infty} R_{CV} \cdot \frac{(f_c + f_v) \frac{\hbar}{\tau_{in}}}{(E_{cv} - \hbar\omega)^2 + \frac{\hbar^2}{\tau_{in}^2}} dE_{cv} \quad (3.13)$$

$J$  : La densité de courant de pompage.

$J_{tr}$  : La densité de courant de transparence. Avec :

$$g(J)_{\max} = \Gamma g_0 \ln\left(\frac{J}{J_{tr}}\right) \quad (3.14)$$

$$J_{tr} = q \frac{n_{th}}{t_{tot}} \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{t_{tot}} = \frac{1}{t_{nrad}} + \frac{1}{t_{rad}} \quad (3.16)$$

Et  $t_{tot}$ ,  $t_{nrad}$  et les temps de recombinaison.

## 3.10 taux de recombinaisons

### 3.10.1 Recombinaisons radiatives

L'énergie de cette recombinaison est libérée sous forme de photons, la recombinaison bande à bande entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence, c'est la recombinaison radiative la plus dominante.

$$R_r = B.N^2 \quad (3.17)$$

B : coefficient de recombinaison radiative (coefficient de recombinaison bi-moléculaire).  
N : concentration des porteurs injectés.

### 3.10.2 Recombinaisons non radiatives

Il y a deux types :

#### Les recombinaisons Shockley-Hall-Read :

Dans lesquelles les impuretés jouent un rôle essentiel, un électron est d'abord capturé sur une impureté et ensuite un trou est capturé sur la même impureté, ce qui entraîne la disparition d'une paire électron-trou.

$$R_{SHR} = A.N \quad (3.18)$$

A : taux de recombinaison non-radiative.

#### Les recombinaisons Auger :

Dues à l'interaction électron – électron, dans laquelle un électron se recombine avec un trou en transférant l'énergie ainsi gagnée à un autre électron (ou trou) sous forme d'énergie cinétique. Ce processus est intrinsèque et ne nécessite pas la participation de défauts ou d'impuretés.[8]

$$R_a = C.N^3 \quad (3.19)$$

C : coefficient de recombinaison Auger.

## 3.11 Puissance optique

La diode laser fonctionne en trois zones lesquelles :

▷ lorsque  $J < J_{th}$ , l'émission spontanées alors prépondérante elle émit dans toutes les directions de l'espace, la diode laser est donc se comporte comme une diode électroluminescente.

▷ quand  $J_{tr} < J < J_{th}$ , l'émission stimulée l'emporte sur l'émission spontanée et elle est directionnelle car le gain  $g$  z avantage l'émission pour les directions proches de l'axe de la diode, lorsque  $g_{max}$  atteint  $g_{th}$  les modes d'ondes électromagnétiques de ce maximum sont amplifiées dans le plan de la couche de la double hétérojonction.

▷ lorsque  $J > J_{th}$ , la densité de porteurs dans la jonction est limitée à  $N_{th}$ , cette dernière qui pour laquelle la condition d'égalité entre le gain et les pertes de la cavité est satisfaite, les porteurs injectés dans la zone active se recombinent résultants l'émission stimulée, au rendement quantique  $\eta_i$  près qui tend vers 1 lorsque le courant s'élève au-dessus du  $J_{th}$ . La relation entre le courant incident  $J$  et la densité de porteurs  $N$  en incluant le phénomène d'émission stimule :[9]

$$\frac{J}{qd} = A.N + B.N^2 + C.N^3 + R_{st}S \quad (3.20)$$

$R_{st}$  : Taux d'émission stimulée.

$S$  : densité volumique de photons dans la cavité .

A l'émission laser, au-dessus de seuil, le gain du milieu est égal à  $g_{th}$ , ainsi la densité de porteurs est à la valeur  $N_{th}$  .

### 3.12 Conclusion

Dans ce chapitre on a rappelé quelques notions sur l'équation que nous avons utilisée aussi dans le quatrième chapitre pour optimiser la structure de  $AlGaIn/GaN$ . En fonction des paramètres suivant : La densité de courant de pompage, gain maximal, Longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur du puits et Facteur de confinement .

## Références

[1] cours composant optoélectronique de 1er master université SBA année 2014/2015.

[2]Thèse de doctorat « modélisation des amplificateurs optiques a semi-conducteur : des composant au système » ; présenté par Pascal Morel ; l'Université de Bretagne Occidentale 14 Jan 2011

[3] Mémoire de Magister "Modélisation et optimisation des lasers à puits quantiques à base de nitrures et de matériaux II- VI utilisant des hétérostructures de l'ordre de l'Angstrom Présenté par : SELMANE Djamel Université Hassiba Benbouali Chlef Le : 26/04/2009

[4] D. Hervé « Etude et réalisation d'un laser à semi-conducteur compact de type à pompage électronique (par micro pointes) émettant dans le visible (bleu) » Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, (1995).

[5] Gain optique d'un laser a puits quantique contraint à base de  $GaxIn_{1-x}NyAs_{1-y}/GaAs$  A. Aissat, F. Kerkar S. Nacer, M. El Bey, K. Ferdjani, LASICOM Laboratory University Saad Dahlab, BP270 Blida Algeri

[6] Mémoire de Magister étude et optimisation d'une diode laser a multi puits quantiques a base du quaternaire  $BAlGaN/AlN$ . Présenté par : Lakhdar DJOUDI Université sba le 17decembre 2009.

[7] M. MANCER, Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en  $(AlGaAs/GaAs)$ , Thèse de doctorat, in : Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.

[8] Thèse de doctorat de H.Abid « contribution à l'étude des propriétés électroniques et optiques des alliages semi-conducteurs de type III-V.

---

---

## CHAPITRE 4

---

# RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

## 4.1 Introduction

Dans cette partie du chapitre, on étudiera l'optimisation des paramètres physiques d'une structure AlGaAs sur le substrat modèle GaAs pour déterminer les valeurs maximales et des paramètres fonctionnels à partir des méthodes graphiques et l'outil de Nous allons utiliser le programme informatique logiciel Atlas Silvaco, sans oublier la fixation des paramètres technologiques, que nous avons proposés.

## 4.2 Paramètres de simulation

La bande interdite, l'affinité électronique, la permittivité relative, la densité effective d'états dans la bande de conduction et la densité effective d'états dans la bande de valence paramètres utilisés dans la simulation sont résumées dans le tableau 4.1. afin de calculer les caractéristiques courant-tension du (AlGaAs/-GaAs) et les effets du phénomène de température sur les performances des structures, La modélisation et la simulation ont été réalisées à l'aide du module ATLAS du logiciel SILVACO basé sur les modèles mathématique [1-3]

- ▷ Modèle de bande interdite
- ▷ Modèle de mobilité
- ▷ Modèle Shockley–Read–Hall
- ▷ Recombinaison Auger
- ▷ Ionisation par impact
- ▷ Émission thermoionique
- ▷ Tunnellisation Schottky universelle
- ▷ Réduction de la force d'image

TABLE 4.1 – Paramètres électroniques utilisés pour la simulation.

	<b>GaAs</b>
<b><math>N_C</math> (cm<sup>-3</sup>)</b>	4.10 <sup>17</sup> [1]
<b><math>N_V</math> (cm<sup>-3</sup>)</b>	1.3.10 <sup>19</sup> [1]
<b><math>\epsilon_r</math></b>	12.8 [1]
<b><math>\chi</math> (eV)</b>	4.07 [1, 7]
<b><math>\mu_n</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	8500 [7]
<b><math>\mu_p</math> (cm<sup>2</sup>/V.s)</b>	400 [7]
<b><math>E_g</math> (eV)</b>	1.42 [1]

Notre structure est constituée d'une couche active type P d'épaisseur  $d$  et de concentration d'Aluminium  $x_1$ , entourée de deux couches latérales de concentration d'Aluminium  $x_0$  et des paramètres qui dépendent de ce dernier. et les équations Paramètres électroniques utilisés pour la simulation

$$n_{i0} = \sqrt{N_{c0}N_{v0}} \exp\left(\frac{-E_{g0}}{0.05}\right) \quad (4.1)$$

$$n_{i1} = \sqrt{N_{c1}N_{v1}} \exp\left(\frac{-E_{g1}}{0.05}\right) \quad (4.2)$$

$$N_{c0} = 2.5.10^{25}(0.063 + 0.083x_0)^{3/2} \quad (4.3)$$

$$N_{c1} = 2.5.10^{25}(0.063 + 0.083x_1)^{3/2} \quad (4.4)$$

$$N_{v0} = 2.5.10^{25}(0.51 + 0.25x_0)^{3/2} \quad (4.5)$$

$$N_{v1} = 2.5.10^{25}(0.51 + 0.25x_1)^{3/2} \quad (4.6)$$

## 4.3 Résultats et Interprétations

### 4.3.1 Variation du gain en fonction du courant, de la tension

La Figure (4.1)(4.2), montre Variation du gain en fonction de la tension et la Variation du gain en fonction du courant de structure AlGaAs/GaAs

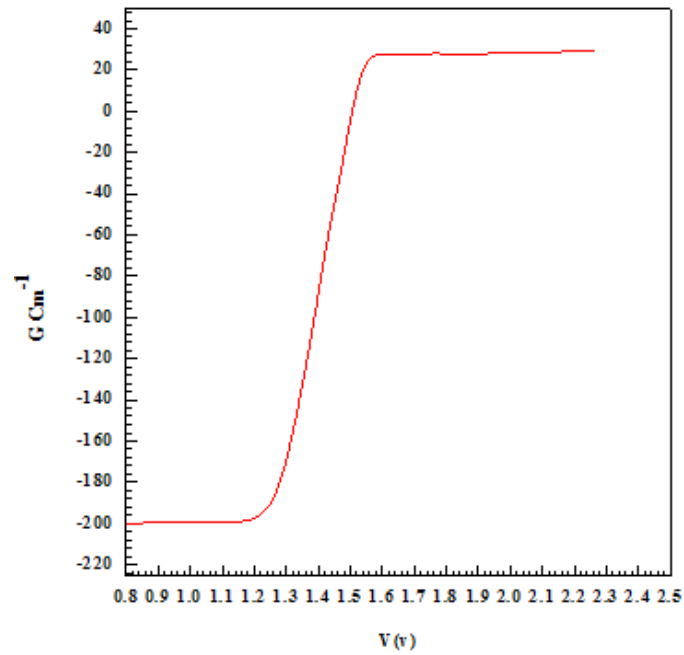


FIGURE 4.1 – Variation du gain en fonction de la tension.

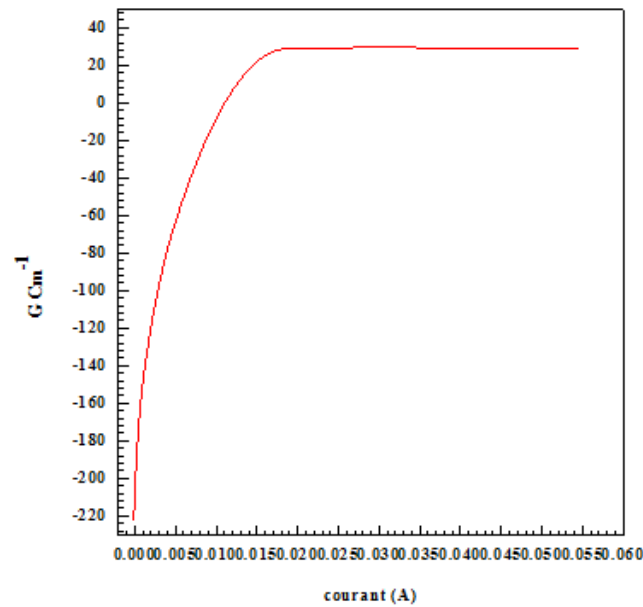


FIGURE 4.2 – Variation du gain en fonction du courant..

L'émission LASER résulte de la recombinaison des porteurs de charges (électrons et trous) dans la région active du dispositif. Sur la figure (4.1), on constate que pour des faibles tensions de polarisation ( $< 1.6$  v) le gain est négatif ce qui traduit l'absence de l'émission LASER, mais au-delà de cette valeur, il devient positif ce qui traduit l'apparition de l'émission LASER.

Lorsque la tension de polarisation (ou bien la densité de courant) atteint une certaine valeur ( $>1.6$ ) le gain reste constant, c'est le phénomène de saturation.[7]

### 4.3.2 La variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant

La Figure (4.3) présente la variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant de structure AlGaAs/GaAs

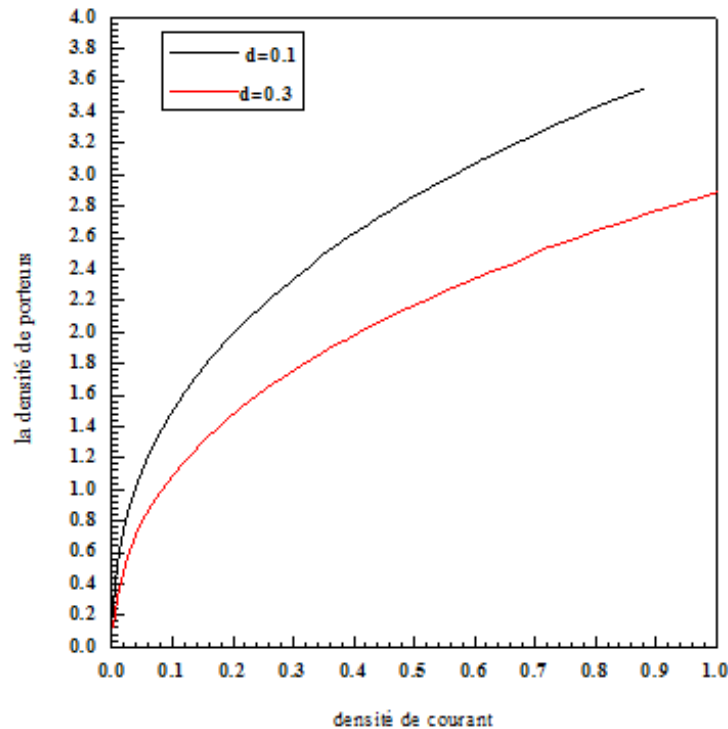


FIGURE 4.3 – La variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant.

### 4.3.3 Variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant

La Figure (4.4) présente la variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant de structure AlGaAs/GaAs.

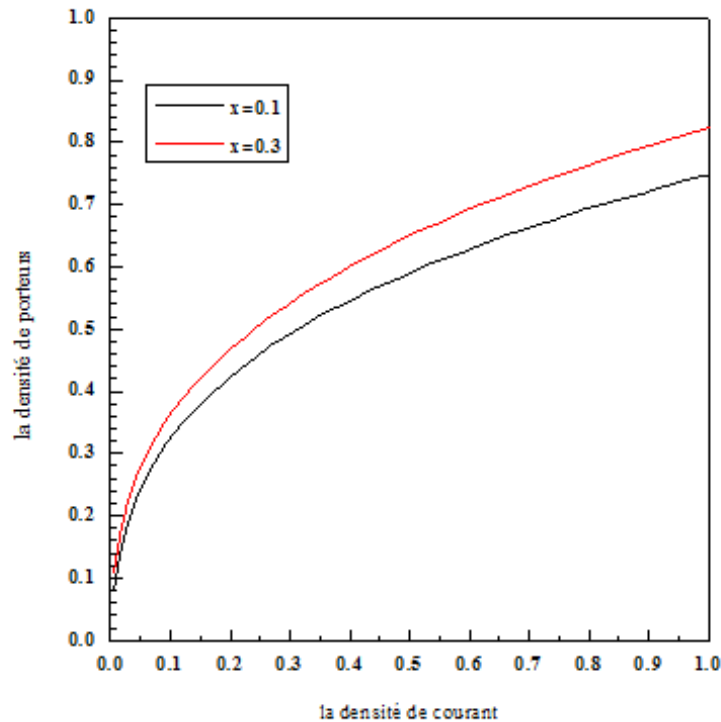


FIGURE 4.4 – Variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant.

On remarque que :

Si on augmente la concentration de l'aluminium en remarquant que la concentration d'électrons injectés augmente

Si on augmente la densité de courant en remarquant que la concentration d'électrons injectés augmente

ensuite elle sature ceci est dû au fait que lorsque  $x_0$  augmente le gap des couches latérales augmente

#### 4.3.4 La variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active

Nous reportons donnez (4.5) La variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active de structure AlGaAs/GaAs.

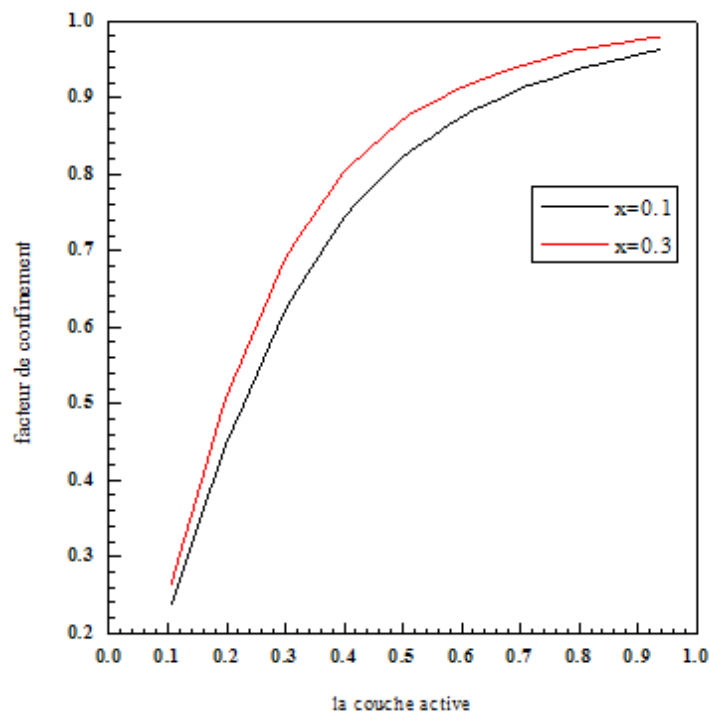


FIGURE 4.5 – La variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active.

On remarque que :

Si on augmente la concentration de l'aluminium en remarquant que le facteur de confinement augmente

Si on augmente le facteur de confinement en remarquant que l'épaisseur de la couche active augmente

On constate que l'épaisseur de la couche active et la concentration de l'aluminium augmentent, du fait que l'augmentation de la concentration de l'aluminium entraîne l'augmentation de l'indice de réfraction des couches latérales ce qui assure un bon confinement de la lumière dans la couche active

### 4.3.5 Variation de la densité d'électrons injectés au seuil Nth en fonction de l'épaisseur de la couche active

La figure (4.6) représente la Variation de la densité d'électrons injectés au seuil Nth en fonction de l'épaisseur de la couche active de structure AlGaAs/GaAs

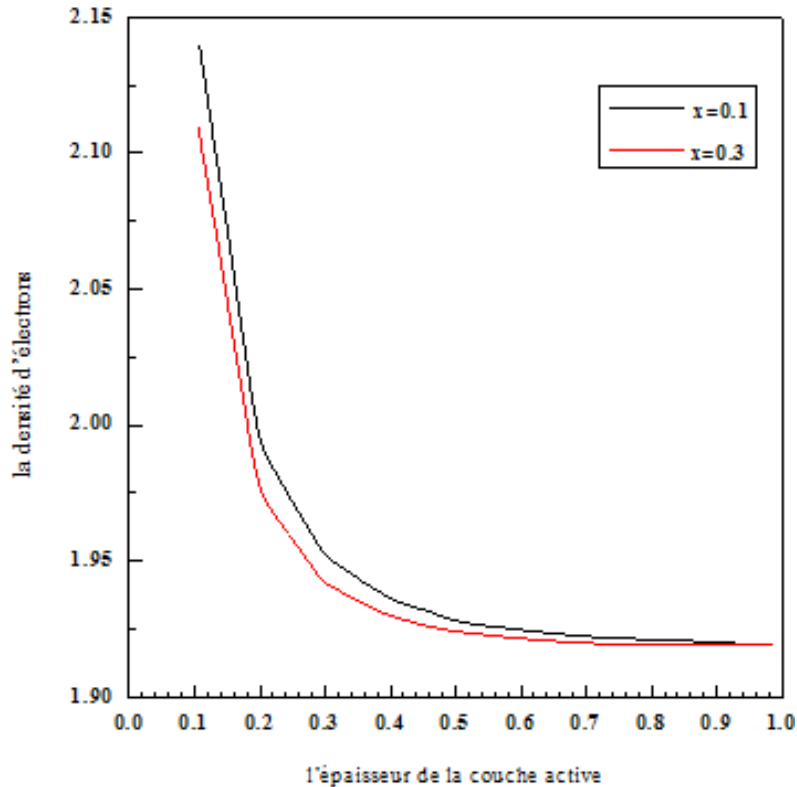


FIGURE 4.6 – Variation de la densité d'électrons injectés au seuil Nth en fonction de l'épaisseur de la couche active

On remarque que :

Si on augmente la densité d'électrons injectés au seuil en remarquant que la concentration de l'aluminium diminue

Si on diminue le facteur de confinement en remarquant que de l'épaisseur de la couche active augmente

a cause de On constate que Nth diminue lorsque d et x0 augmentent entraînant l'augmentation de (Nth et varient en sens inverse

### 4.3.6 Variation du courant de seuil en fonction de l'épaisseur de la couche active

La figure (4.7) représente la variation de la densité de courant seuil en fonction de l'épaisseur de structure AlGaAs/GaAs

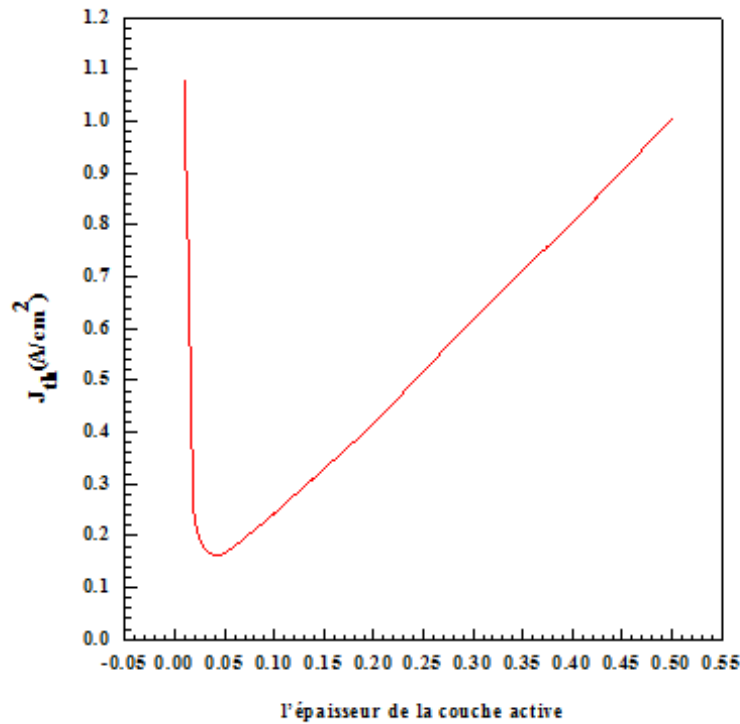


FIGURE 4.7 – Variation du courant de seuil en fonction de l'épaisseur de la couche active.

La figure 2.8 représente la variation de la densité de courant seuil en fonction de l'épaisseur  $d$  pour la concentration de l'aluminium ( $x_0=0,3$ ). Le courant seuil présente une valeur optimale  $J_{th} = 1,1$   $kA/cm^2$  pour une épaisseur de couche active  $d=0,06$  m.

La densité de courant seuil augmente lorsque l'épaisseur  $d$  augmente parce que le courant nécessaire pour avoir une injection  $N_{th}$  augmente avec  $d$  (voir Fig.4.5). Pour les faibles épaisseurs, la densité de courant seuil est importante à cause du facteur de confinement faible (Fig.4.7) donc des pertes qui sont importantes.[7]

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés électriques des structure AlGaAs/GaAs, simulée des caractéristiques courant-tension . Nous avons utilisé le programme Atlas Silvaco. nous avons étudié l'influence des paramètres physiques et technologiques des structures précédentes cela nous permis de voir nettement sur quel paramètre influe chaque étape de simulation, pour obtenir les meilleures. performances.

## Références

[1] Henry Mathieu Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Edition MASSON, 2009.

[2]A. SADOUN, Etude, simulation et caractérisation de structures MIS et diodes Schottky à base de GaN massif, in : 2021.

[3] B. R. Nag, Electron mobility in indium nitride, J. Cryst. Growth 269, (2004) 35.

[4] S. M. Sze Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. (Wiley, New York, 1981), 245.

[5]S. Ali, M. Sedik, C. Mohammed, L. Nacereddine, H. Abdelkader, B. Zineb, Materials Science-Poland 38 (2020) 165-173.

[6] A. Sadoun, S. Mansouri, M. Chellali, N. Lakhdar, A. Hima, Z. Benamara, Materials Science-Poland 37 (2019) 496-502.

[7]Mekfoudji Saliha Ait Mebarek Toufik Etude et simulation de Laser à semi-conducteur à double hétérojonction GaAlAs/GaAs Université SAAD DAHLAB de BLIDA ,Année Universitaire 2016-2017

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Durant ces dernières années, le développement des composées III-V a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures à celles des semiconducteurs plus classiques comme le silicium. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications micro-électroniques et optoélectroniques. Or les caractéristiques de ces matériaux et des composants sont sensibles à l'état de surface et à l'interface. L'étude du fonctionnement des différents types de composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semi-conducteur. Il est donc devenu essentiel de comprendre les mécanismes de formation des hétérostructures et des nanostructures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés, à l'heure où les nanotechnologies ouvrent de nouvelles voies.

La partie suivante de ce travail a donc consisté à étudier tous les modèles analytiques des mécanismes de conduction pour les deux types d'hétérojonctions métal/ semiconducteur et semiconducteur/ semiconducteur et étudier l'effet des différents paramètres électriques

nous avons montré que :

- ▷ La variation de la densité de porteurs injectés en fonction de densité de courant.
- ▷ Variation de la densité de porteurs injectés en fonction de la densité de courant.
- ▷ variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche active.
- ▷ Variation de la densité d'électrons injectés au seuil  $N_{th}$  en fonction de l'épaisseur de la couche active.
- ▷ Variation du courant de seuil en fonction de l'épaisseur de la couche active.

Les résultats de simulation montrent que la densité de courant seuil présente une valeur optimale égale à  $1,6 \text{KA.cm}^{-2}$  pour une épaisseur de l'ordre de 0,04 m. La suite de ce travail peut être envisagée en considérant un laser à puits quantiques qui Théoriquement permet d'abaisser encore le courant seuil.

## Résumé

Durant cette dernière décennie, Les nitrures d'éléments III tels que le GaN, l'InN, l'AlN et BN, sont entrain de connaitre un essor considérable. L'intérêt croissant pour la construction des dispositifs électroniques à Semi-conducteur pour les applications dans les domaines de la micro, de la nano et de l'optoélectronique. Ce travail se rapporte sur l'étude de structure diode laser à base de nitrures de galium, le structure Ni/AlGaAs/ GaAs Ce travail est une simulation basée sur le logiciel SILVACO Atlas pour obtenir .les caractéristiques électriques et optiques de la photodiode jonction à savoir la caractéristique courant-tension (I-V) .

Mots clés : Semi-conducteurs ; GaN ; Photodiode PIN ; SILVACO ; AlGaN

## Abstract

During the last decade, nitrides of III elements such as GaN, InN, AlN and BN, are experiencing a considerable boom. The growing interest in the construction of semiconductor electronic devices for applications in the fields of micro, nano and optoelectronics.

This work relates to the study of the structures of the diode laser based on gallium nitrides, the Ni/AlGaAs/ GaAs structure. This work is a simulation based on the SILVACO Atlas software to obtain the electrical and optical characteristics of the photodiode junction namely the current-voltage (I-V) characteristic .

Keywords : Semiconductors ; GaN ; PIN photodiode ; SILVACO ; AlGaN