
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية لتكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Télécommunication
Spécialité réseaux télécommunication

Présenté par

BOUNSAIRI Malik

&

AZAZ Boutouchent

Etude et simulation de puits quantiques pour la télécommunication

Proposé par : Pr. AISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2018-2019

في هذا العمل ، ركزنا اهتمامنا على دراسة ومحاكاة بنية AlGaAs / GaAs لانبعث الأشعة تحت الحمراء. يتميز هذا المزيج الثلاثي ، وهو مركب من أشباه الموصلات III-V ، بخصائص مهمة للغاية ، وخاصة طاقة الفجوة التي تتناقص باستمرار مع زيادة التركيز في الألومنيوم. لقد درسنا أيضًا العوامل المختلفة المرتبطة بالليزر والتي استخدمناها لحساب طول الموجة المنبعثة من بئر كمية وجدناها بتركيزات مختلفة من الألومنيوم.

كلمات المفاتيح : ليزر؛ بئر كمومي, طول موجة الانبعث.

Résumé

Dans ce travail, nous avons concentré notre attention sur l'étude et la simulation de la structure AlGaAs / GaAs de l'émission infrarouge. Ce mélange ternaire, qui est un composé de semi-conducteurs III-V, a des caractéristiques très importantes, notamment l'énergie de son gap, qui décroît constamment avec l'augmentation de la concentration en l'aluminium. Nous avons également étudié les différents facteurs liés au laser, que nous avons utilisé pour calculer la longueur d'onde émise par un puit quantique que nous avons trouvés à différentes concentrations d'aluminium.

Mots clés : laser, puits quantique, longueur d'onde d'émission.

Abstract

. In this work, we focused our attention on the study and simulation of the AlGaAs / GaAs structure of infrared emission. This ternary mixture, which is a compound of III-V semiconductors, has very important characteristics, in particular the energy of its gap, which decreases constantly with the increase of the concentration in aluminum.

We also studied the various laser-related factors that we used to calculate the wavelength emitted by a quantum well that we found at different concentrations of aluminum.

Keywords: Laser, quantum well, emission wavelength.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Nos honorables parents pour leurs patiences et encouragements.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr. AISSAT Abdelkader pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos remerciements s'étendent aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail, ainsi qu'à nos professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

À ma chère mère,

À mon cher père qui a sacrifié son temps à nous ;

À ma frangine Dina ;

A toute ma grande famille BOUNSSAIRI,

A Toute ma grande famille SENOUCI,

A tous mes ami(e)s, en témoignage de l'amitié qui nous unie et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Nous dédions ce modeste travail à :

*Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs
soutiens tout le long de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout
possible pour nous aider.*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Nos grandes familles.

Nos chers amis et enseignants.

*Tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la
réalisation de ce travail.*

Listes des acronymes et abréviations

Al: Aluminium.

Ga: Gallium.

As: Arsenic.

x : Concentration d'aluminium.

Lw : Largeur du puits quantique.

Δa : Désaccord paramétrique.

Eg : Énergie de gap.

Δ_{so} : Bande spin orbite « split-off ».

Lh : Trou léger (Light hole).

hh: Trou lourd (Heavy holes).

Ec: Energie de la bande conduction.

E_v : Energie de la bande valence.

BC: Bande de conduction.

BV : Bande de valence.

K: Vecteur d'onde.

a : Paramètre de maille.

c: Vitesse de la lumière dans le vide.

ϵ_0 : La permittivité du vide.

m₀: La masse effective de l'électron.

b : Coefficient de courbure (Bowling).

Cfc : Cubique à face centrée.

E_i : Niveaux d'énergies.

$h\nu$: Énergie de photon.

n_1 : Le niveau fondamental.

n_2 : Le premier état excité.

E_{en} : L'énergie des électrons.

$E_{n_{hh}}$: L'énème niveau d'énergie des trous lourds (l'énergie quantifiée).

$E_{n_{lh}}$: L'énème niveau d'énergie des trous légers (l'énergie quantifiée).

ΔE_{sh} : Décalage énergétique induit par la contrainte de cisaillement.

ΔE_{hh} : Décalage d'énergie de la bande de trous lourds.

ΔE_{lh} : Décalage d'énergie de la bande de trous légers.

Γ : Centre de la première zone de Brillouin.

λ : Longueur d'onde.

λ_B : La longueur d'onde De Broglie.

m_e^* : Masse effective des électrons .

KT : L'énergie thermique.

E_n : L'énergie de quantification.

$\rho(E)$: Densité d'états.

$E_{x,l}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant x .

$E_{y,m}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant y .

$E_{z,n}$: Niveaux d'énergie discrets de confinement suivant z .

m_l^* : Masse effective longitudinale.

km_t^* : Masse effective transversal.

m_{hh} : Masses effectives isotropes.

m_{hh}^* : Masse effective supérieure (bande des trous lourds) .

m_{lh}^* : Masse effective inferieure (bande des trous légers) .

γ_1 et γ_2 : Paramètre de Luttinger.

a_{ep} : Le paramètre de maille de la couche épitaxie.

a_{sub} : Le paramètre de maille du substrat (GaAs).

ε : La déformation ou le désaccord de maille.

C_{ij} : Les coefficients d'élasticité.

$\varepsilon_{||}$ (ε_{yy} ou ε_{zz}): Déformation biaxiale.

ε_{\perp} (ε_{xx}) : Déformation uni-axiale.

$E_{v\ moy}$: L'énergie moyenne de la bande de valence.

m_e : la masse de l'électron

E_{HH} : Energie de la bande de trous lourds.

E_{LH} : Energie de la bande de trous légers.

Δ_{hh-lh} : Dégénérescence des états énergétiques entre trous lourds et trous légers en $k = 0$.

$E_{v,moy}^{hyd}$: Énergie de centre de gravité de la bande de valence en $k=0$ qui varient à la contrainte.

E_c^{hyd} : Énergie de centre de gravité de la bande de v conduction en $k=0$ qui varient à la contrainte

α_v : Potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de valence.

α_c : Potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de conduction.

E_{hh}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande de trous lourds.

E_{lh}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande de trous légers.

E_{so}^{cisa} : Énergie induite par la contrainte de cisaillement avec la bande trous spin-splittée.

b : Est le potentiel de déformation tétragonale.

E_V : L'énergie du haut de la bande de valence.

E_C : L'énergie du bas de la bande de conduction.

E_g^{cot} : Énergie de Gap sous contrainte.

h_C : L'épaisseur critique.

β : Coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

γ : Le coefficient de poisson.

m_e : Masse de l'électron.

h : Constante de Planck.

$E_{g_{hh}}$ Et $E_{g_{lh}}$: L'énergie de la bande interdite gap trous lourds et trous légers.

E_{tr} : L'énergie de transition.

λ_e : La longueur d'onde d'émission.

E_{ei} : Énergies de quantifications des électrons.

E_{hi} : Énergies de quantifications des trous.

E_n : Niveaux d'énergie dans la bande de conduction.

E_m : Niveaux d'énergie dans la bande de valence.

Table des matières

Introduction générale	Error! Bookmark not defined.
1 CHAPITRE 1: Etat de l'art sur les semi-conducteurs.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition d'un semi-conducteur	3
1.2.1 Bande de conduction	4
1.2.2 Bande de valence	5
1.2.3 Gap d'énergie	5
1.3 Les semi-conducteurs III-V	6
1.3.1 Les matériaux binaires	Error! Bookmark not defined.
1.3.2 Les alliages.....	7
1.3.5 Les avantages des semi-conducteurs III-V	9
1.4 Conclusion	10
2 CHAPITRE 2: Laser dans les puits quantiques	11
2.1 Introduction	11
2.2 Définition d'un laser.....	11
2.2.1 Les éléments fondamentaux de laser	11
2.2.2 Principe d'un laser.....	13
2.2.3 Principe de fonctionnement d'un laser.....	15
2.3 L'intérêt de laser dans les semi-conducteurs	15
2.4 Puits quantique	16
2.6.1 Définition de puits quantique	16
2.5 Effets du confinement.....	17
2.6 Masse effective	18
2.6.1 Masse effective des électrons.....	18
2.6.2 Masse effective des trous	19
2.7 La contrainte	19

2.7.1	Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie	19
2.8	Epaisseur critique.....	23
2.9	Conclusion.....	28
3	CHAPITRE 3: Résultats et discussion	29
3.1	Introduction	29
3.2	Résultats et discussions des simulations	29
3.2.1	Paramètre de maille.....	30
3.2.2	Désaccord de maille	31
3.2.3	L'épaisseur critique	31
3.2.4	La bande interdite contrainte et non contrainte	32
3.2.5	Barrière de potentiel.....	33
3.3	Énergies de quantifications.....	34
3.3.1	Quantification des porteurs dans le puits.....	Error! Bookmark not defined.
3.4	Énergies de transitions.....	36
3.5	La longueur d'ondes d'émissions.....	37
3.5.1	Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions.....	38
3.6	Conclusion	40
	Conclusion générale.....	41
	Bibliographie	41

Liste des figures

Figure 1.1. Diagrammes énergétiques pour les trois types des matériaux [3].....	4
Figure 1.2. Energie de gap [13].....	6
Figure 1.3. Maille cristallographique de Structure Zinc Blende [19].	9
Figure 1.4. Structure de wurtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 constitué de 2 sous-réseaux hexagonaux [20].....	10
Figure 2.1. Schéma d'un oscillateur laser [22].....	13
Figure 2.2. Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon. (On suppose que le photon a une énergie $h\nu$ égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux de l'atome [22].....	14
Figure 2.3. Représentant les différents composants d'un laser [23].....	15
Figure 2.4. Illustration d'un puits quantique [30].....	16
Figure 2.5. Profil de potentielle dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2 [31].	17
Figure 2.6. Illustration des deux types de déformation [11].	21
Figure 2.7. Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat [11].....	23
Figure 2.8. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct [38].	25
Figure 2.9. Schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et Une couche contrainte relaxée (b) [35].	26
Figure 3.1. Variation du paramètre de maille (a_{AlAs} , a_{GaAs}) de la structure $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ en fonction de la concentration de l'aluminium	29
Figure 3.2. Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'aluminium.	30
Figure 3.3. Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'aluminium.....	31
Figure 3.4. Variation de l'énergie de la bande interdite de la structure contrainte et non contrainte en fonction de la concentration de l'aluminium.....	32
Figure 3.5. (a,b) La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{v h}$, $\Delta E_{v h h}$, ΔE_c) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'aluminium.	34
Figure 3.6. (a,b) Variation des énergies de quantifications des porteurs trous lourd dans le puits quantique pour différentes concentrations d'aluminium.	35
Figure 3.7. Variation des énergies de transition entre la bande de conduction et la bande des trous lourds en fonction de la largeur de puits L_w	36
Figure 3.8. Variation des longueurs d'ondes d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'aluminium.	37

Figure 3.9. Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions pour chaque niveau à concentration d'aluminium $x=0.65$38

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Tableau périodique partiel (les chiffres en bas représentent le nombre atomique) [14]. ...	7
Tableau 1.2 Les alliages ternaires et quaternaires [17].....	8
Tableau 2.1. Les valeurs de β pour différents types de puits quantique [41].....	27
Tableau 3.1. Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration Al (x)	29

Introduction générale

Les semi-conducteurs ont un rôle très important dans l'industrie et de nombreux dispositifs électroniques à base de semi-conducteurs sont présents dans nos vies quotidiennes.

C'est le résultat d'études fondamentales qui ont permis de comprendre les propriétés des semi-conducteurs, telles que la structure des bandes, les caractéristiques de transport et d'autres études appliquées depuis plusieurs années [1].

Le développement des techniques nano technologiques au cours des dernières décennies a conduit à la recherche de presque des matériaux semi-conducteurs dans la plupart des dispositifs électroniques et optiques. Ils fournissent de bonnes émissions pour la lumière, la détection et un bon contrôle. La technologie des semi-conducteurs est d'un grand intérêt en raison de ses caractéristiques exceptionnelles, et il est également possible de modifier les propriétés électroniques des semi-conducteurs par des procédés et une fabrication à l'échelle nanométrique. Particulièrement, les semi-conducteurs III-V, comme par exemple le GaAs et le AlAs, caractérisés par un gap direct et une mobilité électronique importante [2].

Au cours des décennies précédentes, de grands efforts ont été faits pour améliorer les techniques de croissance de structures plus petites, limitées à des systèmes nuls, à l'extrémité inférieure de l'échelle, il y a ce qu'on appelle Les puits quantiques Ils se distinguent du matériau massif par la quantification partielle des états électronique induit par le confinement dans une direction spatiale [3]. Dans ces structures les électrons sont confinés dans les trois dimensions de l'espace [4-7]. Du fait de la réduction des dimensions, les niveaux d'énergie dans ces structures ont un spectre discret semblable aux atomes. Pour cette raison, il est souvent appelé "atomes artificiels" [8,9].

En exposition dans ce mémoire l'étude et la simulation d'une structure a puit quantique à base d'un matériau ternaire AlGaAs/GaAs appliqué aux télécommunications.

Le premier chapitre présente l'état de l'art du matériau III-V, ses propriétés de base, la structure cristalline, les différents d'alliages, les différentes propriétés de GaAs et AlAs.

Dans le second chapitre, nous étudions les types de puits quantiques et leurs caractéristiques, les effets de contrainte, et effets du confinement, et épaisseur critique. Et les modèles mathématiques utilisés dans les simulations Matlab.

Enfin, au troisième chapitre, nous examinons et discutons les résultats en utilisant des logiciels de simulation Matlab pour les puits quantiques.

Chapitre 1 Etat de l'art sur les semi-conducteurs

1.1 Introduction

Après les résultats étonnants obtenus dans la technologie du silicium dans le domaine de la microélectronique, la recherche de plus que celles dans le transfert des propriétés des composants électroniques en silicium a fait que la plupart des grands laboratoires de recherche se concentrent sur de nouveaux matériaux. En particulier, les composés semi-conducteurs III-V [10].

Dans ce chapitre, nous présentons des considérations générales sur les nanomatériaux semi-conducteurs III-V, les concepts théoriques de base de la physique fondamentale qui régissent le comportement des porteurs dans les structures quantiques, et leurs différents paramètres de matériaux composites III-V.

1.2 Définition d'un semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants. On différencie trois types des matériaux : les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs.

Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier :

- La dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence »
- La bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction »

La bande de Valence et la bande de conduction sont séparées par un espace appelé « bande interdite » (Figure1.1) [3].

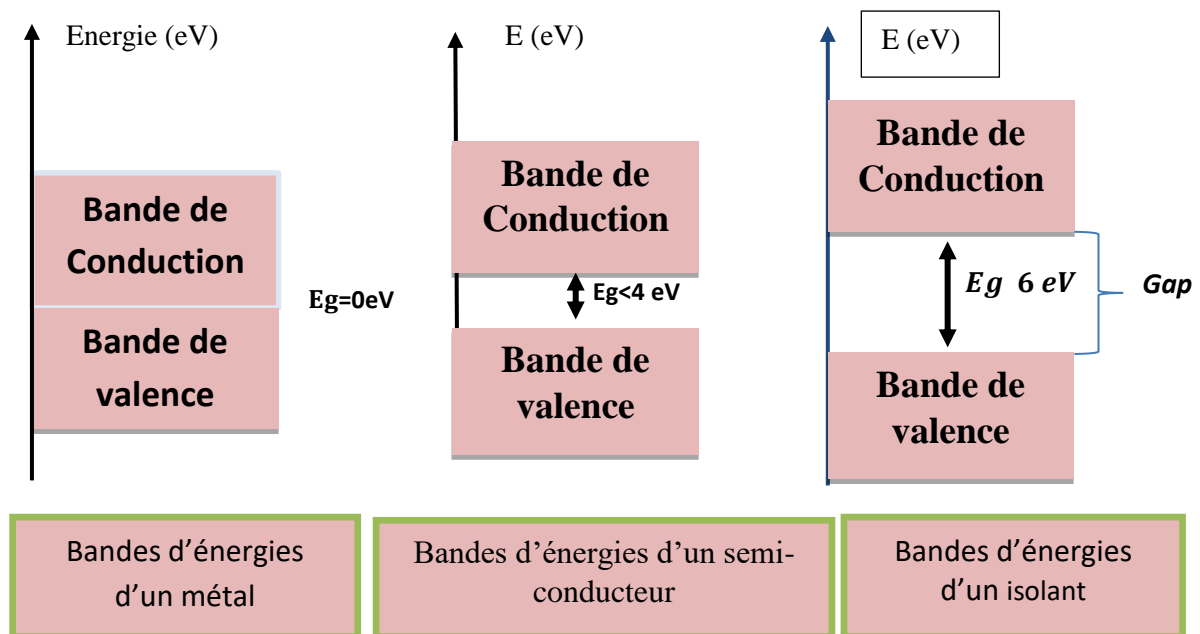


Figure 1.1. Diagrammes énergétiques pour les trois types des matériaux [3].

- Conducteurs : la dernière bande occupée est partiellement remplie, il existe beaucoup de niveaux disponibles et la conduction est grande.
- Semi-conducteurs : le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible. La conduction est faible est varié beaucoup avec la température.
- Isolants : les bandes d'énergie les plus faibles sont entièrement pleines. La hauteur de la bande interdite est grande ($\geq 5 \text{ eV}$), il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction [10].

1.2.1 Bande de conduction

Les structures de bande des semi-conducteurs diffèrent essentiellement par la bande de conduction. En effet, tous les semi-conducteurs ont le maximum de leur bande de valence au centre de la zone de Brillouin, ce qui n'est pas toujours le cas du minimum de la bande de conduction.

Le minimum de la bande de conduction pour le GaAs se trouve au centre de la zone de Brillouin, c'est-à-dire en vallée Γ . Si un électron peut passer directement de la bande de valence à la bande de conduction on dit alors c'est un gap direct.

Dans le cas du Si, les minimas de bande de conduction se trouvent à 85% du bord de zone.

Les électrons doivent changer de vecteur d'onde pour passer de la bande de valence à la bande de conduction [11].

1.2.2 Bande de valence

Il existe 3 bandes de valence dont les maximas sont en Γ . Ces bandes sont issues des orbitaux p-liantes triplement dégénérés. Cette dégénérescence est partiellement levée par l'interaction spin-orbite. La prise en compte de l'hamiltonien d'interaction spin-orbite décale de Δ_{so} . On l'appelle bande « split-off » l'une des 3 bandes de valence. Les 3 bandes présentent des courbures différentes, donc des masses différentes. Les 2 bandes qui restent dégénérées en $k = 0$ sont appelées bande de trous lourds (ou hh pour heavyholes) et bande de trous légers (ou lh pour light holes). Ce sont essentiellement ces deux bandes qui déterminent les propriétés de transport des trous dans le semi-conducteur [11].

1.2.3 Gap d'énergie

Les semi-conducteurs sont caractérisés par leur bande interdite ou gap, qui sépare les derniers états occupés de la bande de valence et les états libres suivants dans la bande de conduction. Les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence ont une énergie qui dépend de leur vecteur d'onde, et suivant laquelle les matériaux semi-conducteurs se divisent en deux types : à gap direct et à gap indirect [12].

a) Gap direct

Quand le minimum de la bande de conduction possède le même vecteur d'onde que le maximum de la bande de valence, le gap est dit direct.

b) Gap indirect

Dans ce gap c'est le contraire de gap direct. Si le minimum de la bande de conduction ne possède pas le même vecteur d'onde que le maximum de la bande de valence, le gap est dit indirect.

Cette différence est très importante pour les transitions optiques car elles s'opèrent à vecteur d'onde quasi constant : les semi-conducteurs à gap direct sont donc, d'une manière générale, plus adaptés que les autres pour les applications optoélectronique [12].

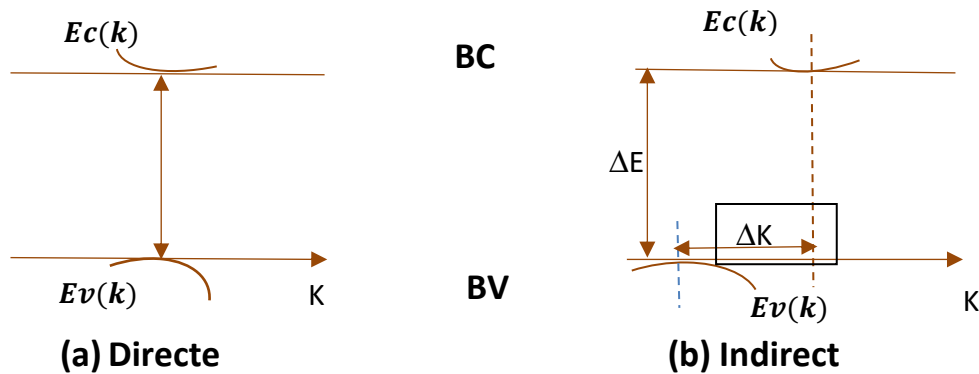


Figure 1.2. Energie de gap [13].

1.3 Les semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et plusieurs éléments de la colonne V de la classification périodique de Mendeleïev, ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés. Différents ensembles de structure ainsi que la concentration des substances qui est dans ce tableau. (Tableau 1.1) [14].

<i>III_b</i>	<i>IV_b</i>	<i>V_b</i>
<i>Al</i> ₁₃	<i>Si</i> ₁₄	<i>P</i> ₁₅
<i>Ga</i> ₃₁	<i>Ge</i> ₃₂	<i>As</i> ₃₃
<i>In</i> ₄₉	<i>Sn</i> ₅₀	<i>Sb</i> ₅₁

Tableau 1.1. Tableau périodique partiel (les chiffre en bas représentent le nombre atomique) [14].

1.3.1 Les alliages

Le but de cette technique est d'extraire des semi-conducteurs avec des structures ternaire et quaternaire ou plus, par mélange homogène de deux ou plusieurs éléments de la même colonne soit avec le colonne III ou le V de différentes manières. Par exemple, obtenez des alliages. Tels que $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ou $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, pour ajuster certaines fonctionnalités telles que les propriétés comme la largeur de la bande interdite (pour les applications optoélectroniques), la mobilité des porteurs (pour les applications électroniques) [10].

Alliage	Structure	Forme Structure	Exemple
Ternaires	2 atomes sur l'un des même colonne	$A_x A'_{(1-x)} B$	$In_x Ga_{(1-x)} As$
Quaternaires 1+3	3 atomes de la même colonne et un de l'autre	$A_x A'_y A''_{(1-x-y)} B$	$Ga_x In_y Al_{(1-x-y)} As$
Quaternaires 2+2	2 atomes de deux colonnes différentes	$A_x A'_{(1-x)} B_y B'_{(1-y)}$	$Ga_x In_{(1-x)} As_y P_{(1-y)}$

Tableau 1.2. Les alliages ternaires et quaternaires [17].

Où (x et y) est un coefficient stœchiométrique qui varie entre 0 et 1 et qui représente la concentration du composé (AB), alors que (1-x) représente la concentration du composé (A'B), et (1-y) représente la concentration du composé (A''B) et (BB') pour Les alliages quaternaires [17].

La plupart des solutions solides ainsi réalisées sont complètes, la loi de *Vegard* (relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition)

Un alliage ternaire est composé des binaires A et B avec les fractions x et (1-x) respectivement, son énergie de bande interdite s'exprime par [17].

$$Eg (A_x B_{1-x}) = x \cdot Eg (A) + (1 - x) \cdot Eg (B) - b \cdot x (1 - x) \quad (1.1)$$

$$\rho(x) = x * p(InAs) + (1 - x) * p(GaAs) \quad (1.2)$$

Où le dernier terme traduit l'écart à la loi d'interpolation linéaire, avec *b* coefficient de courbure de l'alliage. Ce facteur est généralement de l'ordre de la fraction d'électronvolt et indépendant de la composition. Par exemple pour le $Ga_{1-x}In_xAs$, *b* est égal à 0,45 eV.

1.3.2 Les structures cristallines

Le motif constitue le contenu matériel du cristal, par opposition au réseau, entité purement mathématique qui décrit la géométrie de l'édifice cristallin. Les constituants élémentaires du motif peuvent être de différents types, correspondant à différentes catégories de cristaux

Le motif d'un cristal (métallique) est donc les atomes contenus dans une maille élémentaire (à spécifier dans chaque cas), le cristal résultant de la répétition tridimensionnelle de ce motif suivant les translations du réseau associé [18].

La structure cristalline Zinc-blende est une structure qui s'apparente à celle du diamant et elle est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V. Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$, étant le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire [19-21].

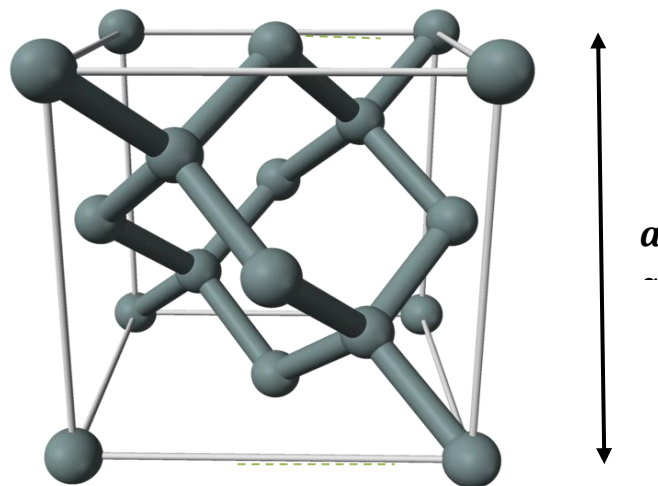


Figure 1.3. Maille cristallographique de Structure Zinc Blende [19].

La structure wurtzite : Les semi-conducteurs existent sous forme de structure zinc blende, mais croissent généralement sous la forme d'une autre structure appelée structure wurtzite formé par deux réseaux de Bravais hexagonaux.

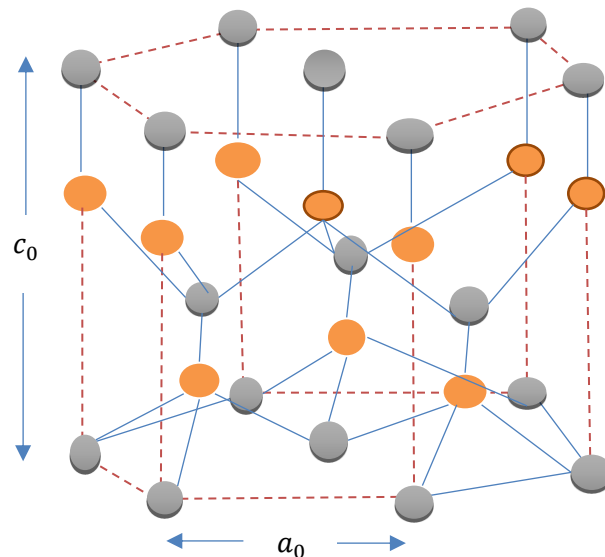


Figure 1.4. Structure de wurtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 constitué de 2 sous-réseaux hexagonaux [20].

1.3.3 Les avantages des semi-conducteurs III-V

Les semi-conducteurs III-V sont presque tous à gap direct. L'arséniure de gallium GaAs est le représentant le plus connu, de gap 1,414 eV. InP en est un autre, de gap 1,35 eV. Leur grande force réside dans le nombre quasi illimité d'alliages possibles entre Ga, As, Al, In et P. Cette particularité essentielle a donné aux semi-conducteurs III-V la première place pour l'optoélectronique et notamment pour les lasers à semi-conducteurs. Cependant, le gap reste toujours inférieur à 2 eV environ et on ne peut pas les considérer comme des matériaux grand gap. En particulier, le domaine visible n'est pas couvert par ces semi-conducteurs III-V classiques. Cette famille de semi-conducteurs III-V s'est agrandie par la venue d'un nouveau matériau, qui complète la gamme spectrale de la famille III-V [10].

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a regroupé quelques propriétés générales des matériaux semi-conducteur III -V (propriétés physique et propriétés électronique et nous avons donné leurs propriétés électriques et optiques. Nous avons aussi étudié les mécanismes de génération et de recombinaison de porteurs en excès par la lumière tout en donnant leurs modèles analytiques.

2.1 Introduction

Le laser a fait son apparition dans les années 1960, dans un modeste laboratoire en Californie. Aujourd'hui le laser est devenu incontournable dans l'industrie, la médecine, dans la recherche, mais aussi dans notre vie quotidienne.

Dans ce chapitre nous décrivons les généralités du système laser, son principe de fonctionnement et ses différentes applications. Nous introduirons une description générale sur les puits quantiques.

2.2 Définition d'un laser

Laser est un acronyme (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) qui signifie amplification de lumière par émission stimulée. La lumière émise par un laser est un rayonnement électromagnétique non-ionisant, qui est l'ultraviolet, le visible (lumière) ou l'infrarouge [22].

2.2.1 Les éléments fondamentaux de laser

Deux éléments fondamentaux de laser :

- Un milieu amplificateur : celui-ci peut être de différents types (gaz, plasma, solide voire liquide). Dans ce milieu, on trouve des atomes, molécules, ions ou électrons dont les niveaux d'énergie sont utilisés pour accroître la puissance d'une onde lumineuse au cours de sa propagation. Le principe physique mis en jeu est l'émission stimulée.
- Un système d'excitation du milieu amplificateur (aussi appelé système de pompage) : il permet de créer les conditions d'une amplification lumineuse en apportant l'énergie nécessaire au milieu. Le système de pompage peut être de différente nature : pompage optique (le soleil, lampes flash, lampes à arc continues

ou lampes à filament de tungstène, diodes laser ou autres lasers ...), électrique (décharges dans des tubes de gaz, courant électrique dans des semi-conducteurs) ou même chimique.

Le milieu amplificateur (et son système de pompage) peut être utilisé seul pour amplifier une lumière déjà existante. On parle alors d'amplificateur laser. Cependant, en général, l'amplificateur est inséré dans un résonateur optique (ou cavité) dont la fonction est de produire un rayonnement lumineux aux propriétés très particulières. On parle alors d'oscillateur laser. En général, un raccourci de langage consiste à appeler "lasers" les oscillateurs laser qui constituent l'immense majorité des dispositifs existants. Les oscillateurs laser ont pour particularité d'avoir des miroirs réfléchissants dont la fonction première est de confiner l'onde à l'intérieur de la cavité et d'augmenter son parcours dans le milieu amplificateur afin d'obtenir des niveaux d'amplification considérables. Ils ont également un miroir de sortie qui permet d'extraire une partie de l'onde lumineuse de la cavité afin de pouvoir utiliser le rayonnement.

Finalement, l'oscillateur laser peut être schématisé par la figure 2.1 avec ses éléments fondamentaux : le milieu amplificateur, le système de pompage, et les miroirs.

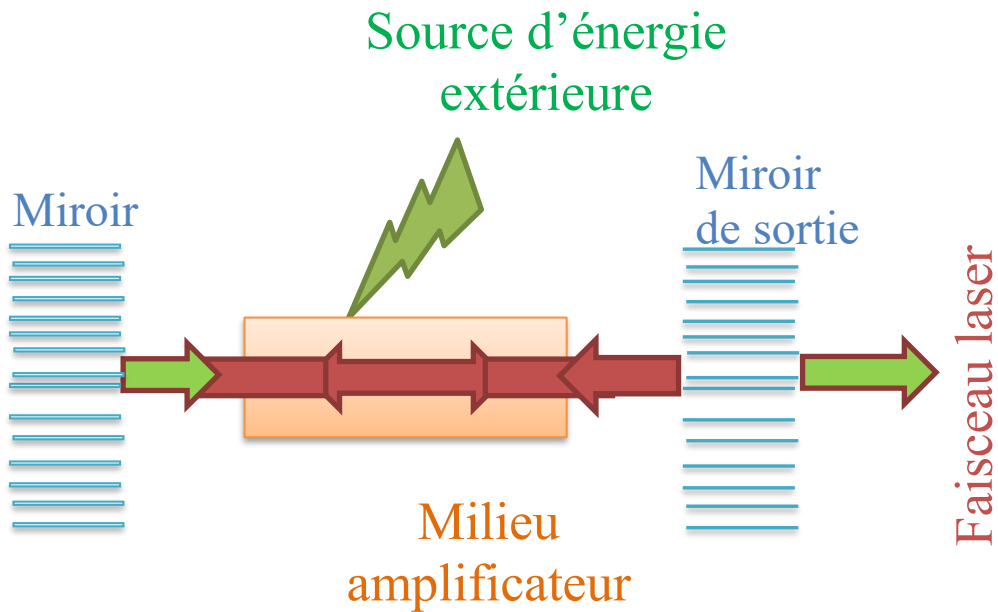


Figure 2.5. Schéma d'un oscillateur laser [22].

2.2.2 Principe d'un laser

Leur niveau d'énergie sont quantifiés et sont tels qu'une lumière d'une fréquence particulière va pouvoir interagir avec la population qui se trouve sur les niveaux. Pour être plus précis, considérons deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 ($E_1 < E_2$) dont la population va pouvoir interagir avec une lumière de fréquence $h\nu = E_2 - E_1$. L'ensemble E_1 - E_2 est appelé transition radiative si le passage des atomes de E_1 à E_2 (ou de E_2 à E_1) ne peut se faire que par interaction avec la lumière. Le niveau d'énergie E_1 est appelé le niveau du bas et celui d'énergie E_2 , le niveau du haut.

Il existe trois mécanismes d'interaction schématisés sur la figure 2.2 :

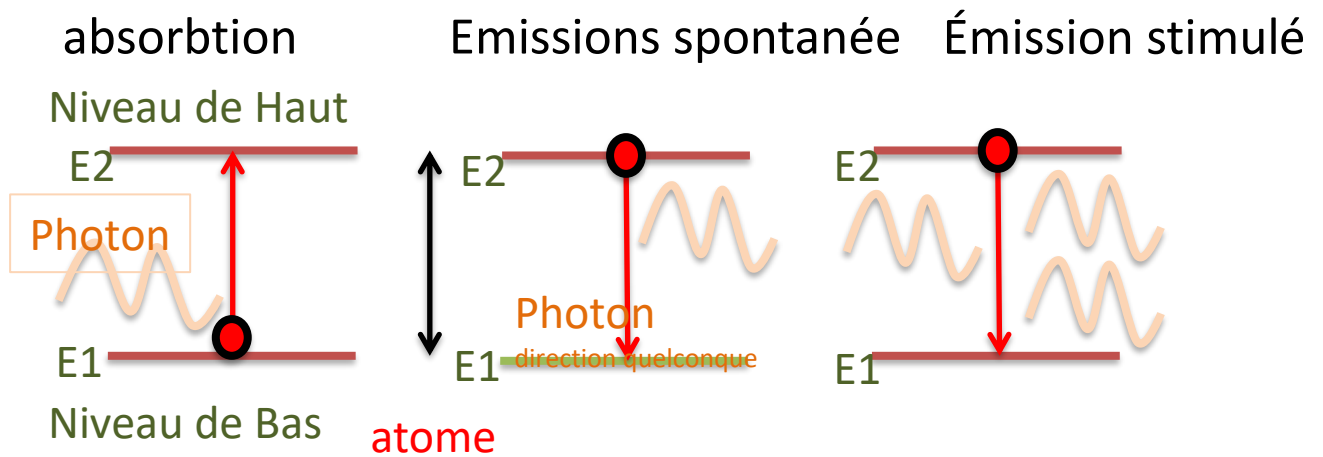


Figure 2.6. Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon. (On suppose que le photon a une énergie $h\nu$ égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux de l'atome [22].

a) Absorption

Un atome du niveau du bas peut monter dans le niveau du haut par effet d'absorption d'un photon de fréquence $h\nu$.

b) Emission spontanée

Un atome du niveau du haut peut se désexciter spontanément vers le niveau du bas et engendrer l'émission d'un photon de fréquence $h\nu$ si la transition entre E_2 et E_1 est radiative. Ce photon a une direction et une phase aléatoire.

c) Émission stimulée

par l'action d'un photon incident, un atome du niveau du haut peut également se désexciter en émettant un photon dit "stimulé" dont les propriétés sont exactement les mêmes que le photon incident. Le terme stimulé souligne le fait que ce type de rayonnement n'existe que si un photon incident est présent pour "stimuler l'émission". L'amplification vient des similitudes entre le photon incident et le photon émis [23].

2.2.3 Principe de fonctionnement d'un laser

Le laser est constitué de 4 éléments principaux :

- **Un milieu actif** ou il y a les atomes que l'on va pomper. Ce milieu peut être sous 3 états : gazeux, solide ou liquide.
- **Une source de pompage**, grâce à celle-ci on va être en mesure d'envoyer de l'énergie dans le milieu actif pour exciter les atomes qu'il contient. Cette énergie peut être électrique ou lumineuse (un second laser par exemple).
- **Un miroir réfléchissant** qui permet de ne pas laisser passer tous les photons incidents. Un miroir de sortie qui réfléchit presque tous les photons incidents
- **Un résonateur optique** un miroir qui réfléchit tous les photons incidents [24].

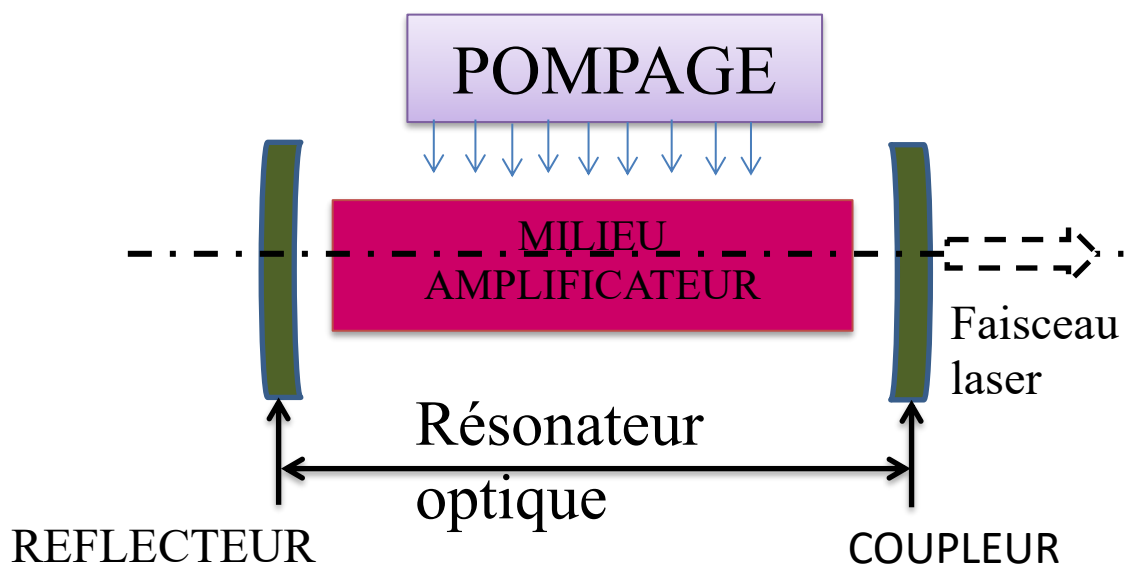


Figure 2.7. Représentant les différents composants d'un laser [23].

2.3 L'intérêt de laser dans les semi-conducteurs

Lorsqu'on utilise les semi-conducteurs pour les lasers ou les amplificateurs optiques objectifs de ces derniers réside dans le fait qu'ils peuvent à la fois conduire des charges et permettre l'émission stimulée par le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de

valence. La longueur d'onde λ du photon ainsi émis correspond à l'énergie E nécessaire pour passer d'une bande à l'autre ($E = hc/\lambda$) c'est l'énergie de transition.

Généralement, les signaux lumineux les moins atténués correspondent aux longueurs d'onde 1,3 et 1,55 μm . Les matériaux qui permettent facilement d'obtenir ces longueurs d'onde sont les composés III-V [25].

2.4 Puits quantique

2.4.1 Définition de puits quantique

Un puits quantique est constitué d'une fine couche quelques nm d'un matériau semi-conducteur de faible gap entourée de matériaux de plus grand gap. On réalise ainsi un puits de potentiel artificiel de taille quantique dans lequel les porteurs libres du semi-conducteur (électrons et trous) vont se retrouver confinés sur des niveaux d'énergie discrets. A chacune des énergies liées permises à l'intérieur du puits est associée une fonction d'onde dont le carré représente la densité de probabilité de présence sur le niveau d'énergie quantifiée. La structure a puits quantique, montrée dans la figure 2.4 [29][28].

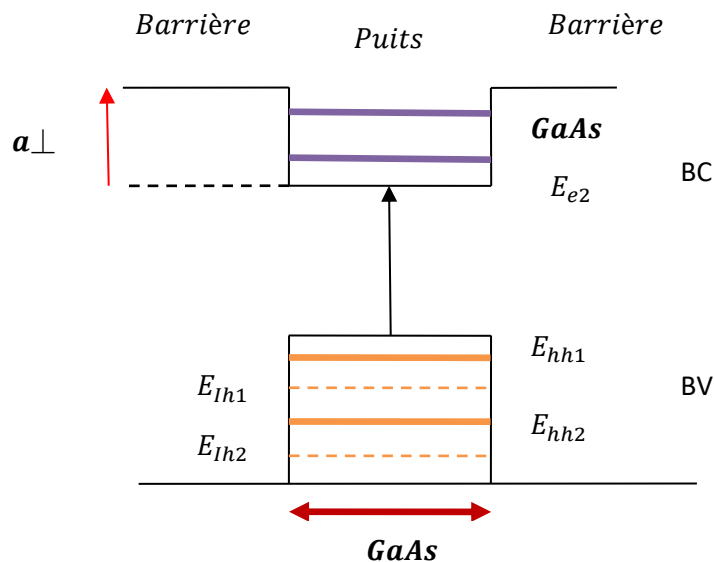


Figure 2.8. Illustration d'un puits quantique [30].

E_{en} : L'énème niveau d'énergie des électrons.

E_{hnn} : L'énème niveau d'énergie des trous lourds.

E_{Ihn} : L'énème niveau d'énergie des trous légers.

L'utilisation de puits quantiques au sein de la zone active engendre un confinement des électrons et des trous dans un plus faible volume, ce qui pour une injection donnée qui permet d'augmenter la densité de porteurs et donc d'atteindre l'inversion de population plus facilement. Selon la nature de la discontinuité de bandes interdites à l'interface puits-barrière, deux types de puits quantiques existent figure 2.5.

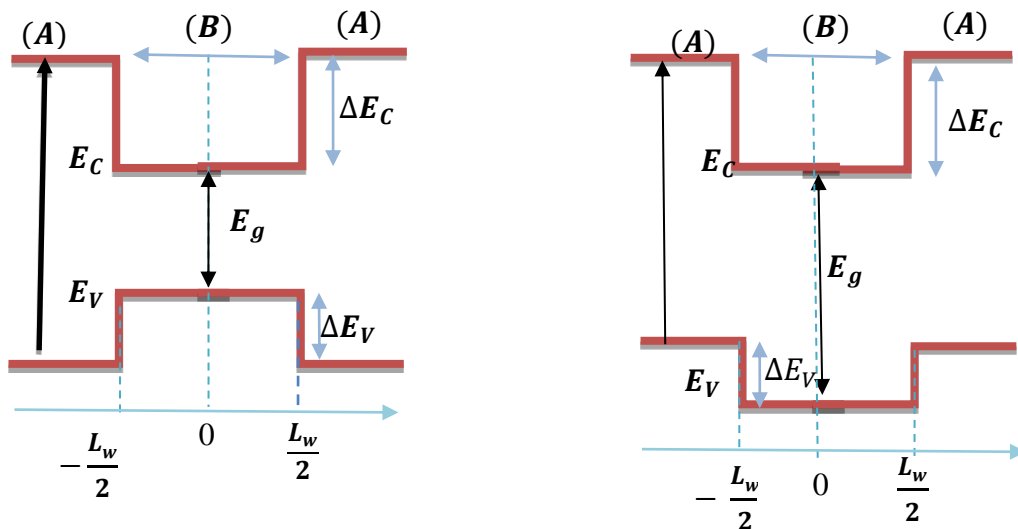


Figure 2.9. Profil de potentielle dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2 [31].

a) Puits quantiques de type-I

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.

b) Puits quantiques de type-II

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'hétéro structure [32].

2.5 Effets du confinement

La longueur d'onde λ_B de Broglie associée à l'électron de conduction, de masse effective m_e^* et d'énergie thermique kT s'écrit [33].

$$\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m_e^*kT}} \quad (2.1)$$

Si on restreint le mouvement de l'électron suivant une ou deux directions sur des distances inférieures ou égales à λ_B , les énergies des niveaux sont quantifiées suivant ces directions de confinement et peut s'écrire :

$$E_{n,\vec{k}} = E_{n,\vec{0}} + \frac{\hbar^2\vec{k}^2}{2m_{e,n}^*} \quad (2.2)$$

Où E_n est l'énergie quantifiée associée au système. Le second terme est l'énergie cinétique due au mouvement libre de l'électron dans les directions sans confinement et k le vecteur d'onde associé. $\hbar = h/2\pi$.

Si un matériau semi-conducteur ayant un gap optique E_g 1 appelé couche active est entouré par un matériau de gap E_g 2 plus grand, appelé barrière, ceci crée des zones dans lesquelles les porteurs (électrons et trous) sont confinés avec des énergies quantifiées. La relation de dispersion dans le matériau massif s'écrit :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (2.3)$$

Cette relation de dispersion donne une densité d'états $\rho(E) \propto 1/\sqrt{E}$ comme on peut le voir sur la figure 2.4, cette quantification de l'énergie, différente selon le confinement, on confine l'électron suivant les directions x , y et z .

➤ Puits quantique (2D)

Si l'on confine l'électron suivant z , par exemple, le vecteur d'onde de l'électron est quantifié dans la direction z et prend des valeurs discrètes tandis que le mouvement reste libre dans le plan xy . La relation de dispersion s'écrit alors :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (k_x^2 + k_y^2) + E_{z,n} \quad (2.4)$$

Où $n \in \mathbf{N}$ et les $E_{z,n}$ correspondent aux niveaux d'énergie discrets dus au confinement suivant z , qui sont définis par la taille du piège. Pour un $E_{z,n}$ donné, la densité d'états 2D est constante et définie pour $E > E_{z,n}$. La densité d'états finale est donc une fonction en marches d'escalier, où chaque marche correspond au passage de l'énergie $E_{z,n}$ d'un état confiné.

➤ Fil quantique (1D)

Si le confinement a lieu suivant z et y , le mouvement ne reste libre que dans la direction x . La relation de dispersion s'écrit :

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} k_x^2 + E_{y,m} + E_{z,n} \quad (2.5)$$

Où $m, n \in \mathbb{N}$. Dans un fil quantique, pour chaque combinaison $E_{m,n} = E_{y,m} + E_{z,n}$, la densité d'états sera de la forme $\rho(E) \propto 1/\sqrt{E - E_{m,n}}$. Pour chaque $E_{m,n}$ on obtient donc des pics similaires à ce qui est tracé sur la figure 2.6.

2.6 Masse effective

2.6.1 Masse effective des électrons

Dans la bande de conduction un électron est caractérisé par une fonction d'onde qui représente la somme d'ondes de Bloch d'orbitale anti liante. En termes corpusculaires, c'est une particule dans un potentiel cristallin. On représente cette particule quasi-libre de charge e^- et de masse m_e^* qu'on appelle masse effective de l'électron.

La masse effective des électrons est inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion de l'énergie dans l'espace k

$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{d^2E/dk^2} \quad (2.7)$$

Dans le cas d'un semi-conducteur à gap direct, la bande de conduction est une vallée, centrée en $k_0=0$ et isotrope au voisinage de k_0 . Si on appelle E_c l'énergie minimum, l'expression $E(k)$ s'écrit :

$$E(K) = E_c + \frac{1}{2} \frac{d^2E(K)}{dk^2} K^2 \quad (2.8)$$

Ou, compte tenu de la définition de la masse effective (équation (2.8)).

$$E(K) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.9)$$

Ainsi l'électron au voisinage du minimum de la bande de conduction se comporte comme un électron libre de masse m_e^* .

Dans la mesure où la courbure de la bande de conduction varie peu au voisinage du minimum, la masse effective est constante et par suite l'énergie $E(K)$ varie quadratiquement en fonction du vecteur d'onde K .

Cette loi de variation constitue ce que l'on appelle l'approximation des bandes paraboliques. Lorsque l'énergie cinétique des électrons devient très importante, l'électron s'éloigne de E_c dans l'espace des énergies, sa masse varie et l'approximation parabolique n'est plus justifiée. Dans le cas d'un semi-conducteur à gap indirect, la bande de conduction est multi vallée et anisotrope avec plusieurs minima équivalents situés en différents points de la zone de Brillouin. Les surfaces d'énergies constantes au voisinage des minima K_0 sont des ellipsoïdes. Les expressions des masses effectives sont données par :

$$m_l^* = \frac{\hbar^2}{dE^2/dk^2} \quad m_t^* = \frac{\hbar^2}{dE^2/dk^2} \quad (2.10)$$

Avec : m_l^* : masse effective de l'électron de la vallée considérée, dans son mouvement suivant l'axe de révolution de l'ellipsoïde, appelée aussi masse effective longitudinale.

m_t^* : masse effective de l'électron dans son mouvement dans le plan perpendiculaire à l'axe de révolution, appelée aussi masse effective transversal [34].

2.6.2 Masse effective des trous

La masse effective des trous est définie comme celle des électrons, cependant la bande de valence des semi-conducteurs cubique est composée de deux branches dégénérées en $K=0$.

Les énergies des trous sont comptées positivement vers le bas. La bande de plus grande courbure, bande inférieure, correspond à des trous de masse effective inférieure (bande des trous légers) et la bande de plus faible courbure, bande supérieure, correspond à celle des trous lourds.

$$m_{hh} = \frac{m^*_{hh}}{\gamma_1 + 2\gamma_2} \quad m_{lh} = \frac{m^*_{lh}}{\gamma_1 - 2\gamma_2} \quad (2.11)$$

γ_1 et γ_2 paramètre de Luttinger [34].

2.7 La contrainte

L'épitaxie du matériau AlGaAs sur GaAs de paramètre de maille initialement différent provoque une contrainte. La maille du matériau épitaxie se déforme de manière élastique dans les deux directions parallèle et perpendiculaire. Dans le cas où les couches épitaxiales sont suffisamment fines, la maille du matériau épitaxie se déforme de manière élastique dans les deux directions parallèle et perpendiculaire à la surface de croissance, et selon que le paramètre de la couche épitaxie a_e est plus petit ou plus grand que celui du substrat a_s , la déformation est soit un allongement "couches en tension", soit un rétrécissement "couche en compression" [35].

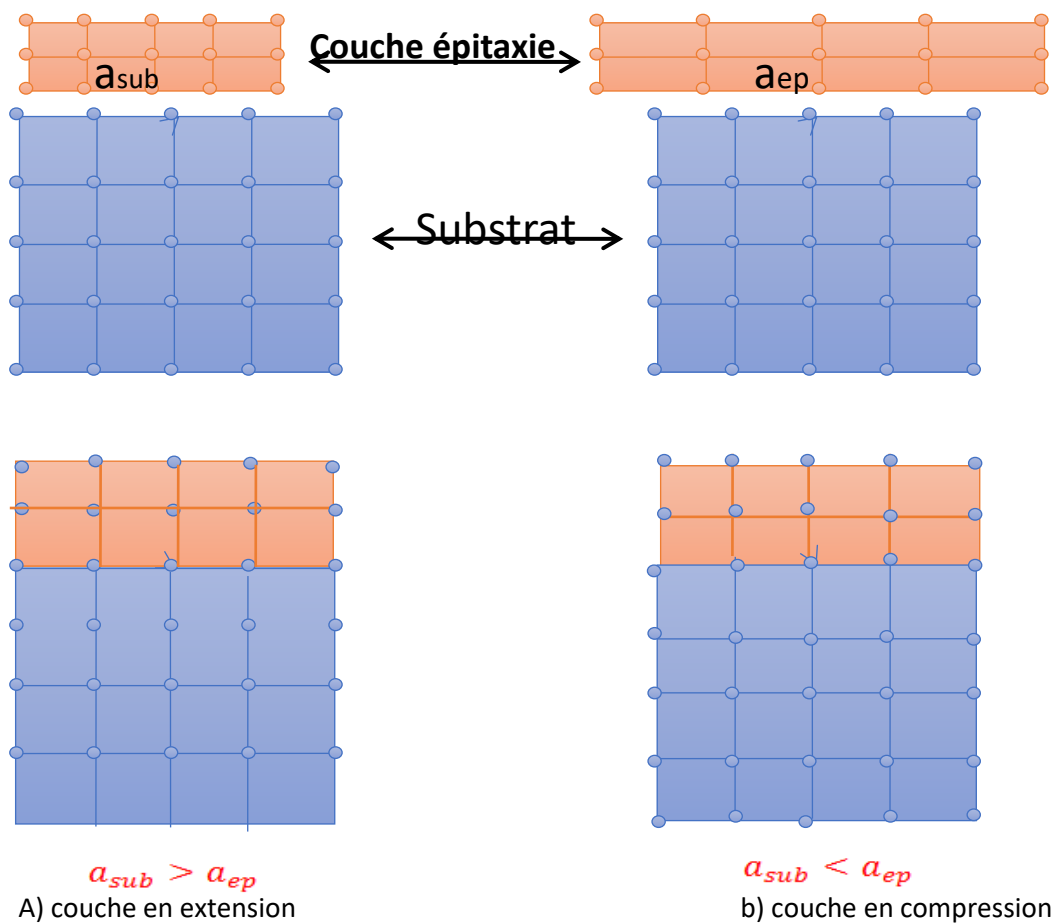


Figure 2.6. Illustration des deux types de déformation [11].

Cette différence de maille provoque une déformation de la couche épitaxie, soit en extension figure 2.7.a, ou en compression figure 2.7.b. Par des déformations biaxiales (ε_{xx} et ε_{yy}) et uni axiales (ε_{zz}).

- Biaxiales dans le plan de croissance :

$$\varepsilon_{//} = \varepsilon_{xx}(x) = \varepsilon_{yy}(x) = \frac{a_s - a_e(x)}{a_e(x)} \quad (2.12)$$

- Uni-axiales dans la direction de croissance :

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{zz}(x) = -2 \frac{c_{12}(x)}{c_{11}(x)} \varepsilon_{xx}(x) \quad (2.13)$$

ε : la déformation ou le désaccord de maille.

a_s : le paramètre de maille du substrat (GaAs).

a_e : le paramètre de maille de la couche épitaxiée.

C_{ij} : les coefficients d'élasticité.

2.7.1 Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux composantes [36].

- Une composante hydrostatique, qui diminue l'énergie de bande interdite dans le cas d'une augmentation de volume ou qui l'augmente dans le cas contraire.
- Une composante de cisaillement qui a pour effet de lever la dégénérescence trous lourds, trous légers du haut de la bande de valence figure 2.8.

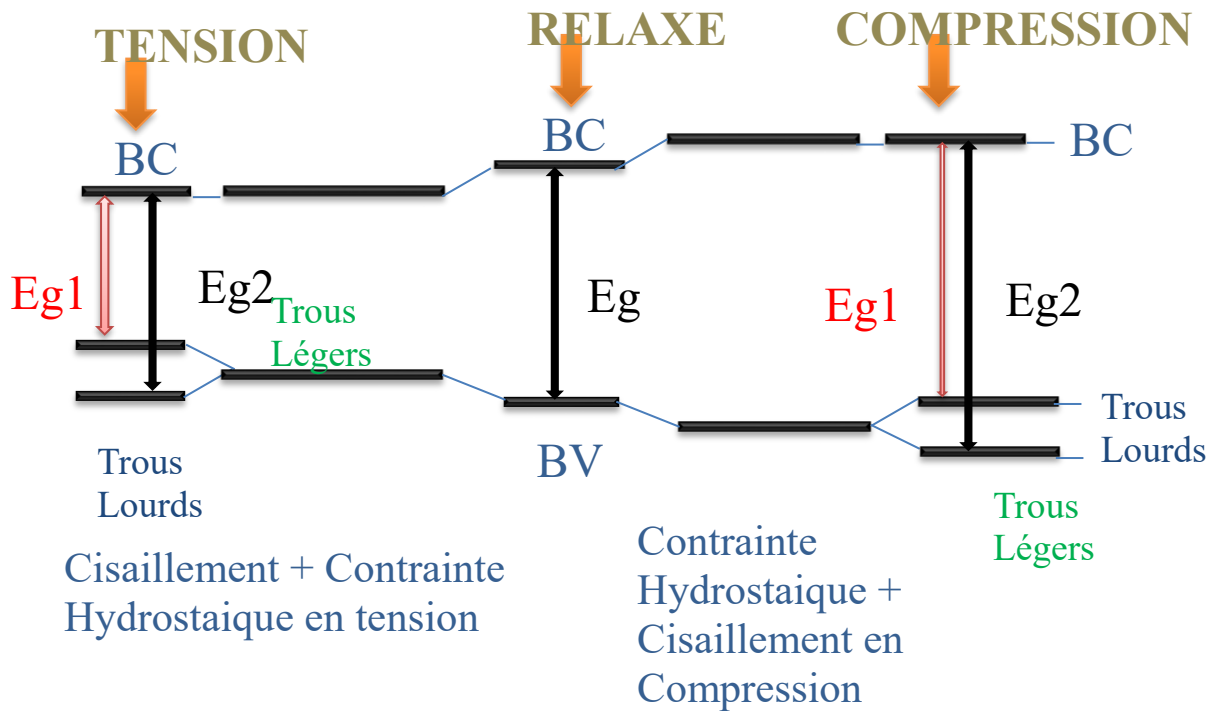


Figure 2.7. Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat [11].

Nous savons que la composante hydrostatique a pour effet de variation de l'énergie de la bande interdite, alors que la composante uniaxiale lève la dégénérescence différenciée entre les niveaux de trous lourds et trous légers.

Le rôle de la contrainte biaxiale sur la structure de bandes de la couche épitaxie est schématisé sur la figure 2.9 Celle-ci présente la structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct en l'absence de contrainte figure 2.9-b, soumis à une compression biaxiale la bande de plus haute énergie (bande hh) restant légère selon k_{\parallel} , Figure 2.9-a et soumis à une contrainte de tension biaxiale la bande de plus haute énergie bande lh) restant légère selon et lourde selon k_{\parallel} . figure 2.9-c.

En l'absence de contrainte les bandes de trous lourds et trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes figure 2.9 [37].

$$E_{V,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (2.16)$$

Avec :

E_{HH} : Energie de la bande de trous lourds.

E_{LH} : Energie de la bande de trous légers.

Δ_0 : Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée.

Les décalages en énergie des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en $k=0$ varient proportionnellement à la contrainte :

$$\Delta E_{V,moy}^{hyd} = a_v(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.17)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.18)$$

Avec a_c et a_v les potentiels hydrostatiques de déformation, respectivement, pour la bande de conduction et la bande de valence.

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement dans chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants, dans le cas d'une croissance sur substrat (100).

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{1}{2}\delta E^{cisa} \quad (2.19)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{cisa} + \frac{1}{2}\sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{cisa} + \frac{9}{4}(\delta E^{cisa})^2} \quad (2.20)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{1}{2}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E^{cisa} + \frac{1}{2}\sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E^{cisa} + \frac{9}{4}(\delta E^{cisa})^2} \quad (2.21)$$

avec
$$\delta E^{cisa} 100 = 2 \cdot b \cdot (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.22)$$

Où b est le potentiel de déformation tétragonale.

E_V : l'énergie du haut de la bande de valence est :

$$E_V = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,moy}^{hyd} + \max(\Delta E_{lh}^{hyd}, \Delta E_{hh}^{hyd}) \quad (2.23)$$

E_c : l'énergie du bas de la bande de conduction est :

$$E_c = E_{V,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + E_c^{hyd} \quad (2.24)$$

Dans ces expressions $E_{V,moy}$, l'éclatement Spin-orbite Δ_0 et l'énergie de gapsont relatifs au matériau non contraint. Via les équations (2.24) et (2.23) on peut déterminer l'équation du Gap contraint E_g^{cot} :

$$E_g^{cot} = E_c + E_V = \Delta E_C^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \max(\Delta E_{lh}^{cisa}, \Delta E_{hh}^{cisa}) \quad (2.25)$$

Pour une couche soumise à une contrainte en compression la bande des trous lourds est au-dessus de la bande des trous légers (figure 2.8. b) et l'on a :

$$\max(\Delta E_{lh}^{cisa}, \Delta E_{hh}^{cisa}) = \Delta E_{lh}^{cisa} \quad (2.26)$$

Donc l'équation (2.24) devient pour une couche en compression :

$$E_g^{cot\ comp} = E_g + \Delta E_C^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{hh}^{cisa} \quad (2.27)$$

Et pour une couche en tension :

$$E_g^{cot\ tent} = E_g + \Delta E_C^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{lh}^{cisa} \quad (2.28)$$

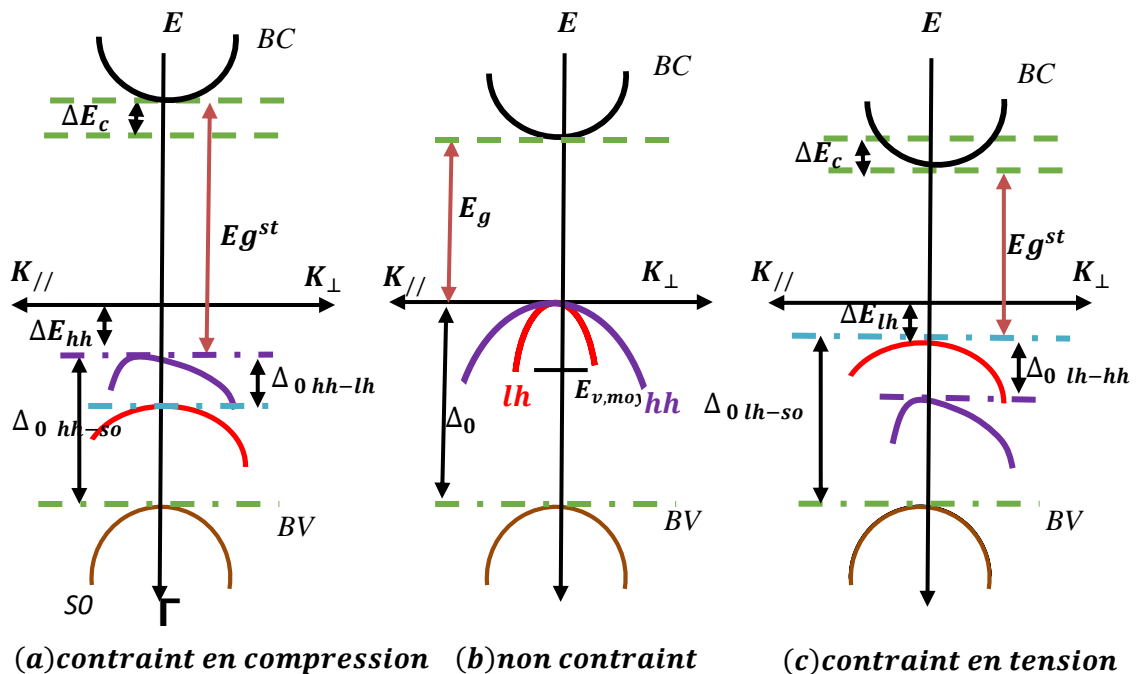


Figure 2.8. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct [38].

2.8 Epaisseur critique

L'épaisseur au-delà de laquelle la couche épitaxiale commence à relaxer est appelée épaisseur critique. Cette épaisseur critique dépend des propriétés mécaniques des matériaux (coefficients élastiques C_{ij}), ainsi que du degré de désaccord paramétrique entre le substrat et la couche épitaxiale [39].

Si l'épaisseur de la couche épitaxiale est supérieure à l'épaisseur critique, les mailles ne subissent plus les contraintes mécaniques imposées par le substrat et le paramètre de maille atteint celui du matériau massif. Le réseau est totalement relaxé [40].

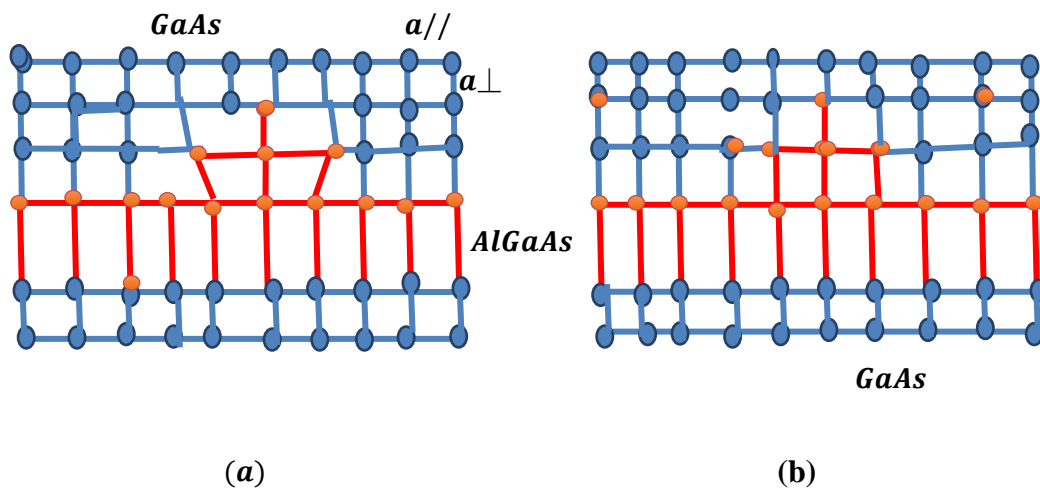


Figure 2.9. Schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et Une couche contrainte relaxée (b) [35].

Dans notre calcul, on a utilisé le modèle le plus classique, celui de K. Köksal et B.Gonul, qui traite le cas d'un matériau faiblement désaccordé par rapport au substrat (désaccord de maille $< 2\%$). La valeur de l'épaisseur critique h_c qui en résulte dans le cas d'un matériau de structure sphalérite (zinc blende) épitaxiale sur la surface n'est donnée par l'équation suivante [41].

$$h_c = \frac{a_e}{\beta \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta_a} \times \frac{1 - (0.25 \cdot \gamma)}{(1 + \gamma)} \times \ln \left(\frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_e} + 1 \right) \quad (2.29)$$

Δ_a : Le désaccord paramétrique qui est donné par :

$$\Delta_a = \frac{a_s - a_e}{a_s} \quad (2.30)$$

γ : Le coefficient de poisson qui est donné par :

$$\gamma = \frac{c_{12}}{c_{11}+c_{12}} \quad (2.31)$$

Où, C_{11} et C_{12} sont les constantes d'élasticité obtenues par l'interpolation linéaire des binaires AlAs, GaAs.

a_e : Paramètre de maille de la couche relaxée.

β : C'est un coefficient égal à 1 dans le cas d'un super-réseau ; à 2 pour un puits quantique

Où : C_{ij} : sont les coefficients élastiques.

β : est un coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

Structure	Puits quantique	Super réseaux
Valeur de β	2	1

Tableau 2.2. Les valeurs de β pour différents types de puits quantique [41].

2.9 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a regroupé quelques les notions fondamentales de laser le milieu amplificateur, la source de pompage et la cavité résonante et aussi les définitions du laser à semi-conducteur et les puits quantique ont été mentionné.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer des simulations sur la structure a puits quantique *Al/GaAs*. Nous nous sommes aidés du logiciel de simulation Matlab pour présenter et interpréter les résultats obtenus pour déterminer la concentration optimale l'aluminium, qui permet d'avoir une longueur d'onde d'émission souhaitée pour les télécommunications. Des simulations ont été faites afin d'étudier l'effet de la contrainte crée entre le substrat et la couche active sur les différents paramètres comme le gap, l'épaisseur critique, la longueur d'onde d'émission.

3.2 Résultats et discussions des simulations

3.2.1 Paramètre de maille

Pour déterminer l'effet de l'aluminium (Al) sur le paramètre de maille de la structure *AlGaAs* nous avons varié x dans l'intervalle $[0, 1]$. La figure (3.1) représente la variation du paramètre de maille de la structure *AlGaAs* en fonction des concentrations de Al.

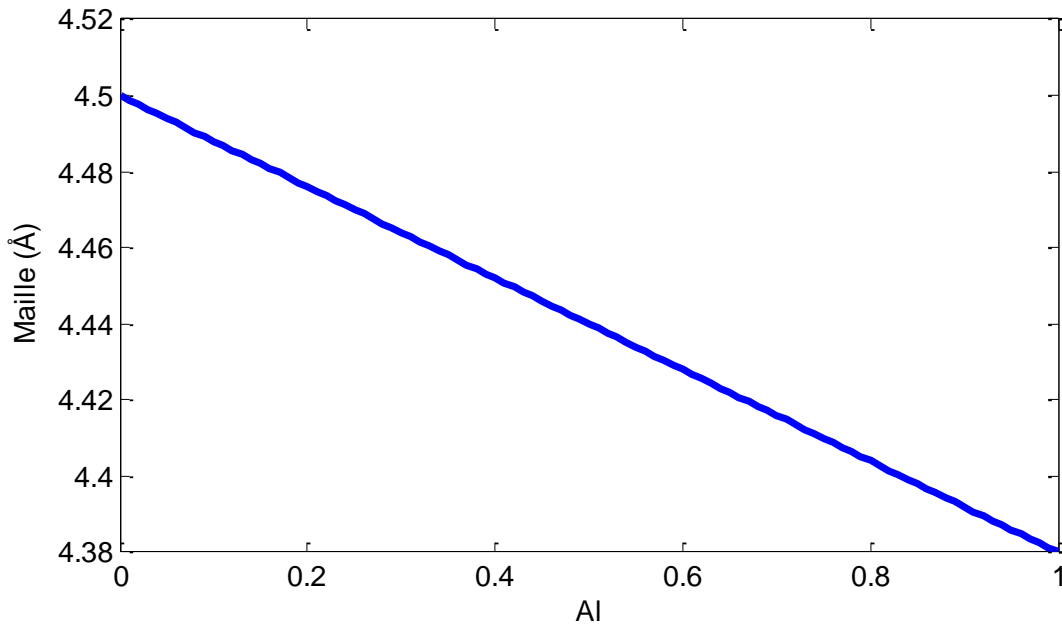


Figure 3.10. Variation du paramètre de maille (a_{AlAs}, a_{GaAs}) de la structure $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ en fonction de la concentration de l'aluminium.

En considérant cette variation linéaire par la loi de Vegard, les paramètres de mailles a varient de manière constante par rapport à la concentration de l'aluminium (x). On sait que les paramètres de mailles a obéit bien à la loi de Vegard, c'est-à-dire qu'elle varie linéairement avec la composition [42].

$$a_{AlGaAs}(x) = a_{AlAs} \cdot x + (1 - x) \cdot a_{GaAs} \quad (3.1)$$

avec :

$$a_{AlAs} = 6.0583$$

$$a_{GaAs} = 5.6532$$

On présente quelques résultats dans ce tableau :

Concentration Al (x)	0	0.5	0.6	1
Paramètre de maille (Å)	4.5	4.44	4.43	4.38

Tableau 3.3. Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration Al(x)

À partir de là, nous observons que l'augmentation de la concentration d'aluminium induit une diminution de paramètre de maille.

3.2.2 Désaccord de maille

La figure (3.2) montre la variation du paramètre de contrainte ε en fonction de concentration l'aluminium (x) d'après l'utilisation de l'équation suivante.

$$\varepsilon = \frac{a_{\text{sub}} - a_{\text{ep}}}{a_{\text{ep}}} \quad (3.2)$$

Comme $a_{\text{sub}} < a_{\text{ep}}$ est presque toujours contrainte compressive malgré l'augmentation de la concentration de l'aluminium (Al). Par exemple, pour $x = 0.40$ la déformation est égale à $\approx 1\%$. Si les concentrations augmentent jusqu'au $x = 0.60$, la déformation reste encore compressive et égale à $\approx 2\%$, On déduit alors que l'augmentation de la concentration de l'aluminium induit une augmentation du désaccord de maille.

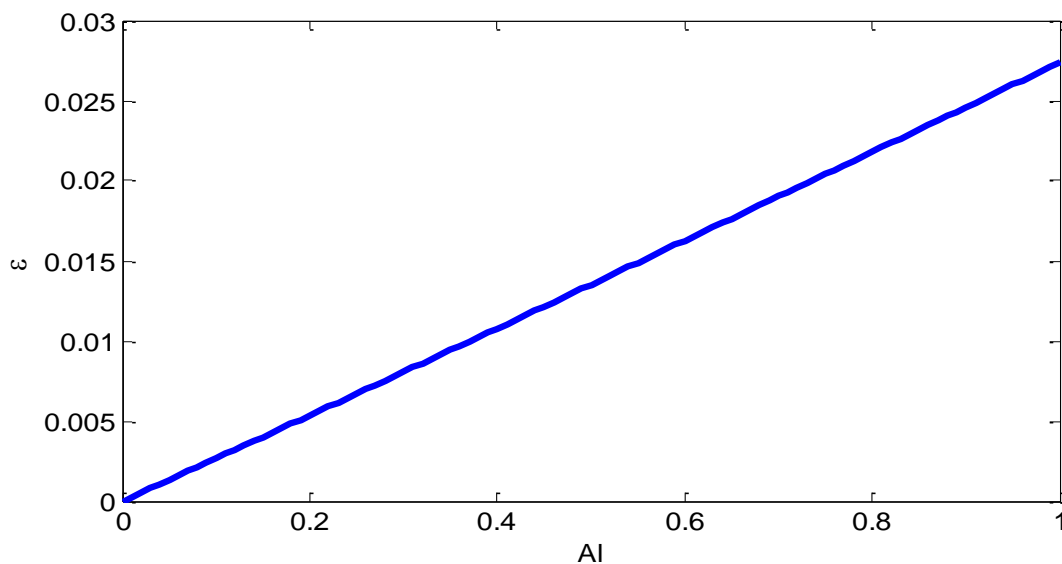


Figure 3.11. Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'aluminium

Nous concluons à partir de nos résultats comparons avec la limite pratique que la valeur x optimale correspond à une valeur de déformation minimale allant jusqu'à 2 %. D'après la figure on constate que pour $x=0,38$ la déformation ($\varepsilon \approx 1\%$).

3.2.3 L'épaisseur critique

La figure (3.3) décrit la variation de l'épaisseur critique de l'alliage AlGaAs en fonction des concentrations de l'aluminium.

Pour calculer l'épaisseur h_c de cette couche active $Al_xGa_{1-x}As$ épitaxie sur un substrat de GaAs. On a exploité le modèle de Matthews et Blackeslee.

On constate si on augmente la concentration de l'Al l'épaisseur entamera une diminution atteignant 500\AA pour des concentrations de Al à 0.38.

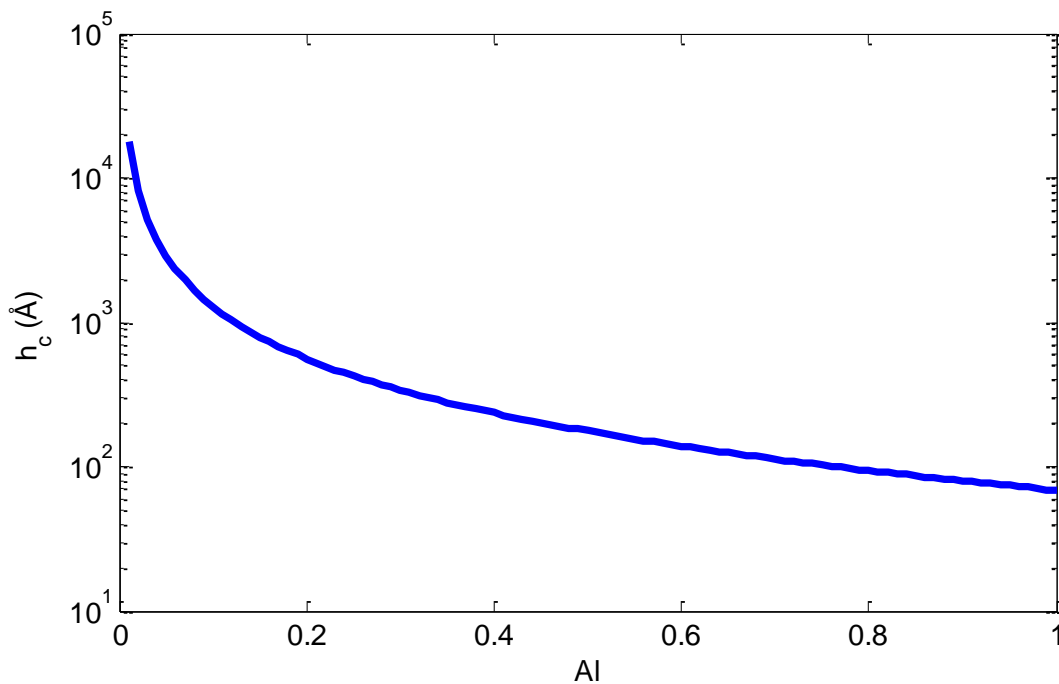


Figure 3.12. Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'aluminium.

Pour une concentration d'aluminium $x=0.3$ l'épaisseur critique vaut $h_c=616$ (Å) et en augmentant la concentration de l'aluminium jusqu'à atteindre $x=0.5$ on a $h_c=200$ (Å). On constate alors que l'augmentation de la concentration de l'aluminium cause une diminution de l'épaisseur critique.

3.2.4 La bande interdite contrainte et non contrainte

La Figure (3.4), illustre la variation de l'énergie de la bande interdite (gap) de la structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ contrainte sur un substrat de GaAs. Avec l'incorporation de concentration d'aluminium dans l'alliage, l'énergie de la bande interdite (E_g) augmente. Suite à la contrainte compressive de notre structure l'énergie de bande interdite gap trous lourds est toujours inférieur a l'énergie de la bande interdite gap trous légers ($E_{g_{hh}}$ et $E_{g_{lh}}$) quel que soit les concentrations de l'aluminium (Al). La figure montre l'influence de concentration d'Al. Par exemple, pour $x = 0,3$ la valeur de bande interdite est de 3.6eV, en augmentant x à 0.5, la bande interdite augmente jusqu'à 3.9 eV.

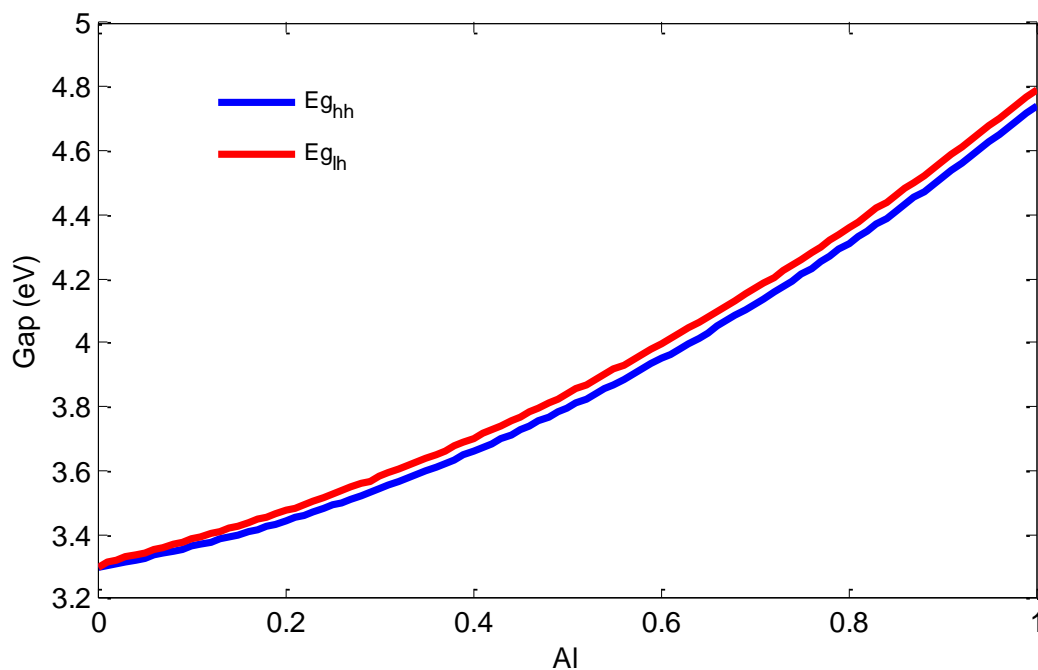


Figure 3.13. Variation de l'énergie de la bande interdite de la structure contrainte et en fonction de la concentration de l'aluminium.

Et la contrainte rend les bandes de valence fortement anisotropes, le Gap des trous lourds ($E_{g_{hh}}$) est au-dessous de celui des trous légers ($E_{g_{lh}}$) pour une contrainte en compression.

3.2.5 Barrière de potentiel

La figure 3.5, illustre La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{V_{hh}}$, $\Delta E_{V_{lh}}$, ΔE_c) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'aluminium. On note que L'augmentation de la concentration en aluminium entraîne une augmentation des différences d'énergie $\Delta E_{V_{hh}}$, $\Delta E_{V_{lh}}$, ΔE_c . Pour la barrière de potentiel dans la bande de valence, d'après nos résultats on remarque que l'effet de la contrainte produit les décalages d'énergies ($\Delta E_{V_{lh}} > \Delta E_{V_{hh}}$)

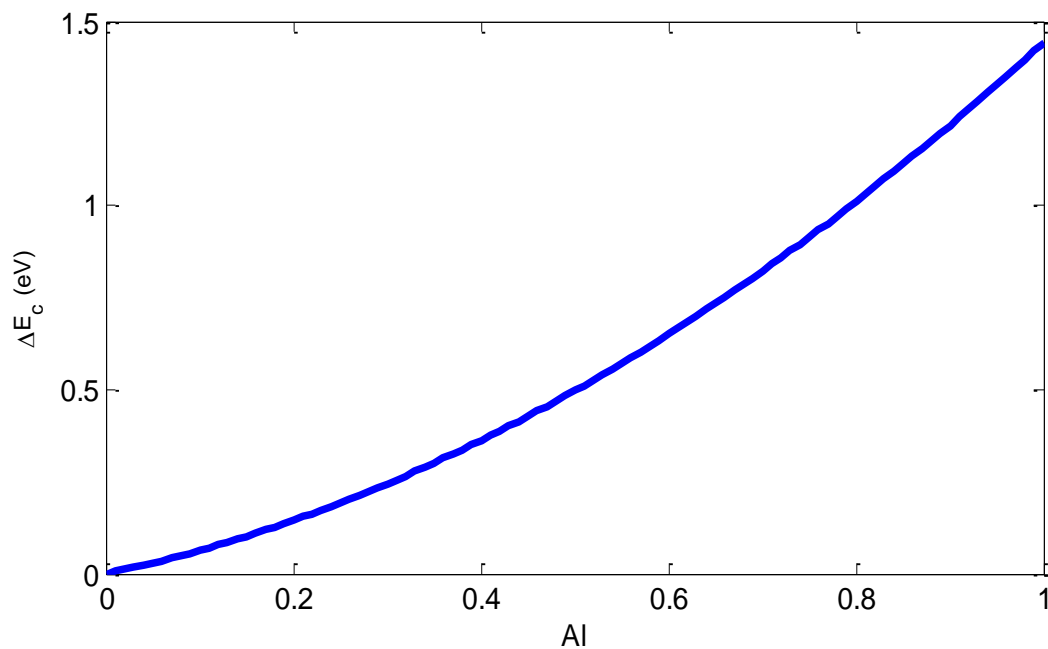


Figure a

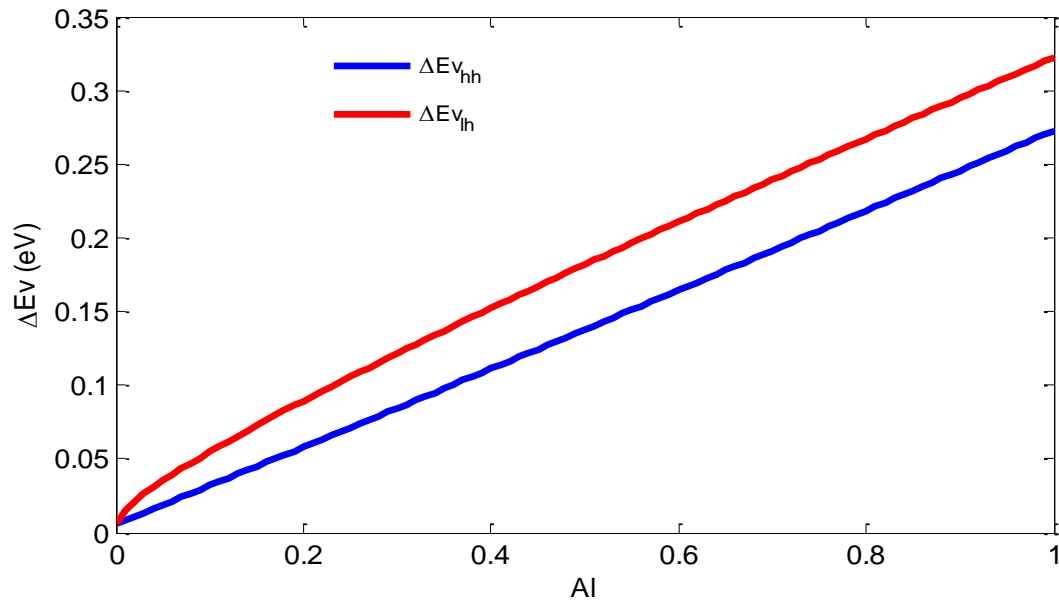


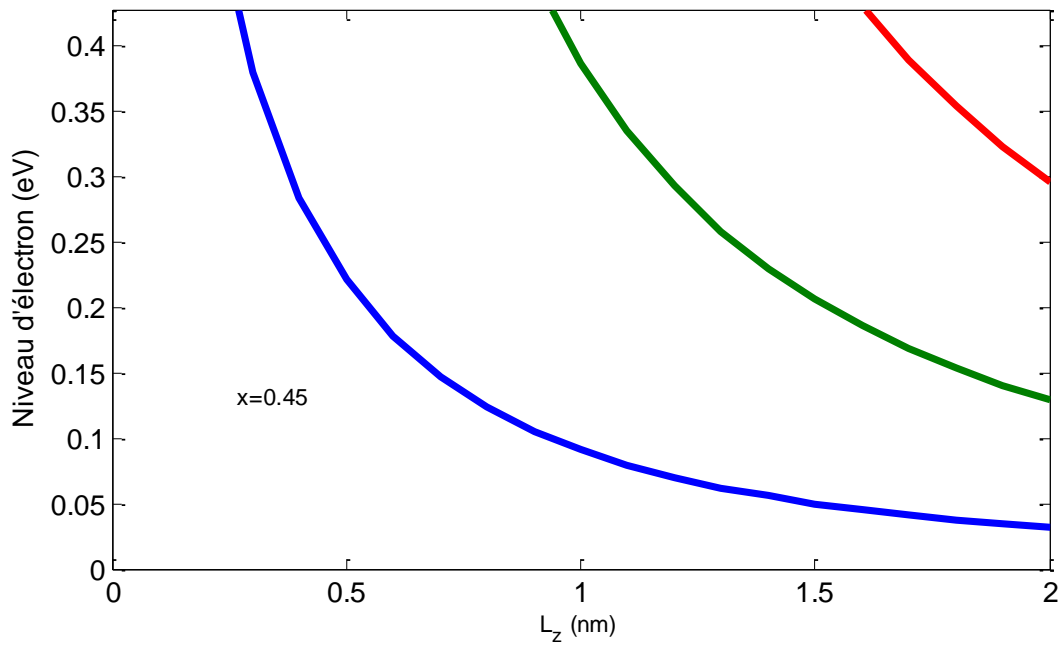
Figure b

Figure 3.14(a,b). La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{v_{lh}}, \Delta E_{v_{hh}}, \Delta E_c$) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'aluminium.

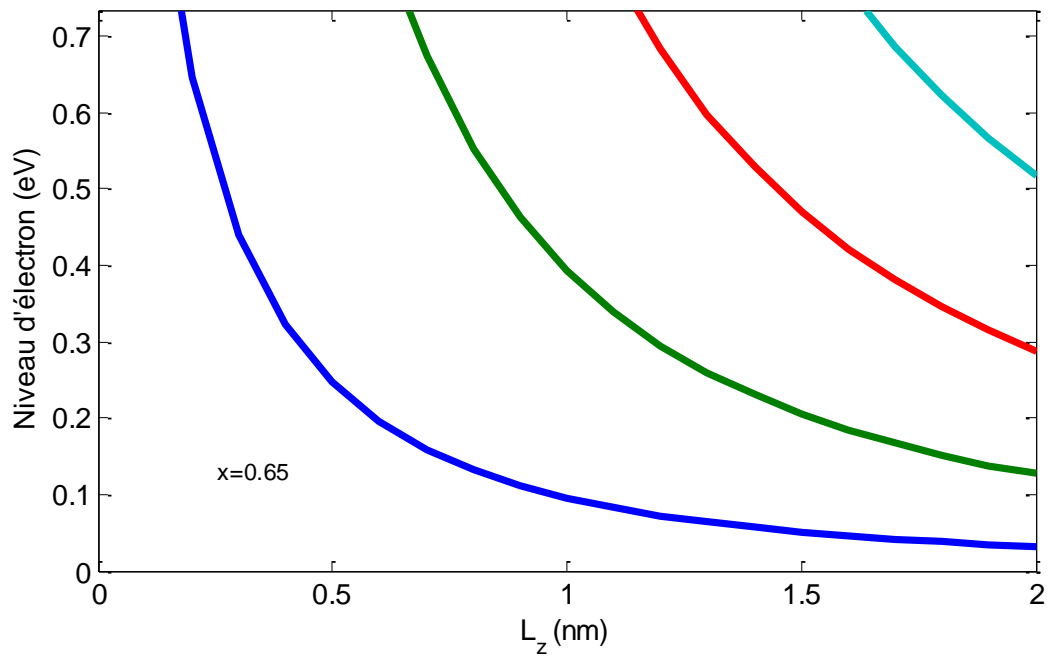
3.3 Énergies de quantifications

3.3.1 Énergies de quantifications des trous lourds

Les figures (3.6_(a,b)) montrent la variation des énergies de quantifications des porteurs, on constate qu'il y a une augmentation des niveaux d'énergies des électrons dans le puits quantique AlGaAs/GaAs en fonction de l'accroissement largeur L_w . Ces niveaux d'énergie augmentent aussi avec l'incorporation de l'aluminium.



« figure a »



« figure b »

Figure 3.15. (a,b) Variation des énergies de quantifications des porteurs trous lourd dans le puits quantique pour différentes concentrations d'aluminium.

3.4 Énergies de transitions

Les figures 3.6 illustrent la variation de l'énergie transitions en fonction de la largeur du puits quantique pour les trous lourds.

La contrainte, induit un décalage du centre de gravité de la bande de valence dans la couche active AlGaAs et rend les bandes de valence anisotropes. Comme le nombre des niveaux d'énergie dans la bande des trous lourds et supérieur à celui des trous légers, donc les trous lourds plus intense (expérimentalement) donc on s'intéresse aux transitions entre la bande de conduction et la bande trous lourd. Aussi avec l'élargissement du puits, on remarque une diminution des énergies de transition avec une augmentation du nombre des transitions possible entre la bande de conduction et la bande des trous lourds.

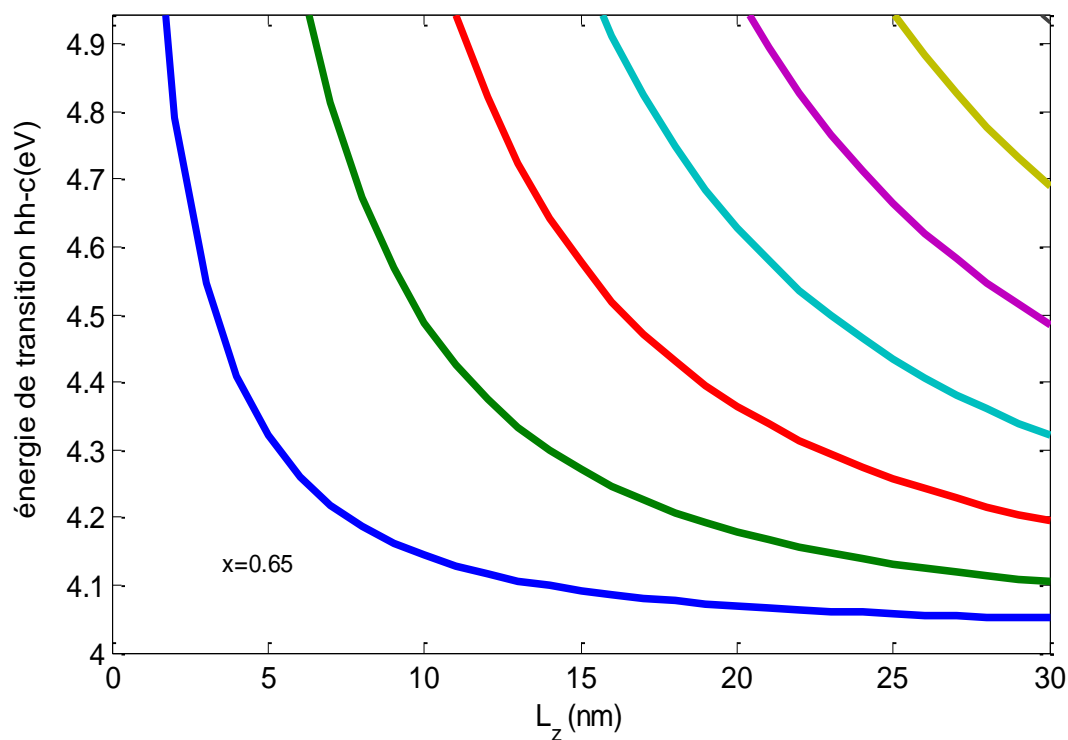


Figure 3.7. Variation des énergies de transition entre la bande de conduction et la bande des trous lourds en fonction de la largeur de puits L_w .

3.5 La longueur d'ondes d'émissions

Les figures 3.9 (a,b) montrent la variation des longueurs d'onde d'émissions relatives aux transitions bande de conduction et bande trous lourds, On remarque que cet longueur d'onde augmente d'abord très rapidement entre 0 et 10 nm puis reste pratiquement inchangé entre 10 et 15 nm avec tous les concentrations d'aluminium. Nous concluons que La longueur d'onde augmente avec l'élargissement de puits quantique.

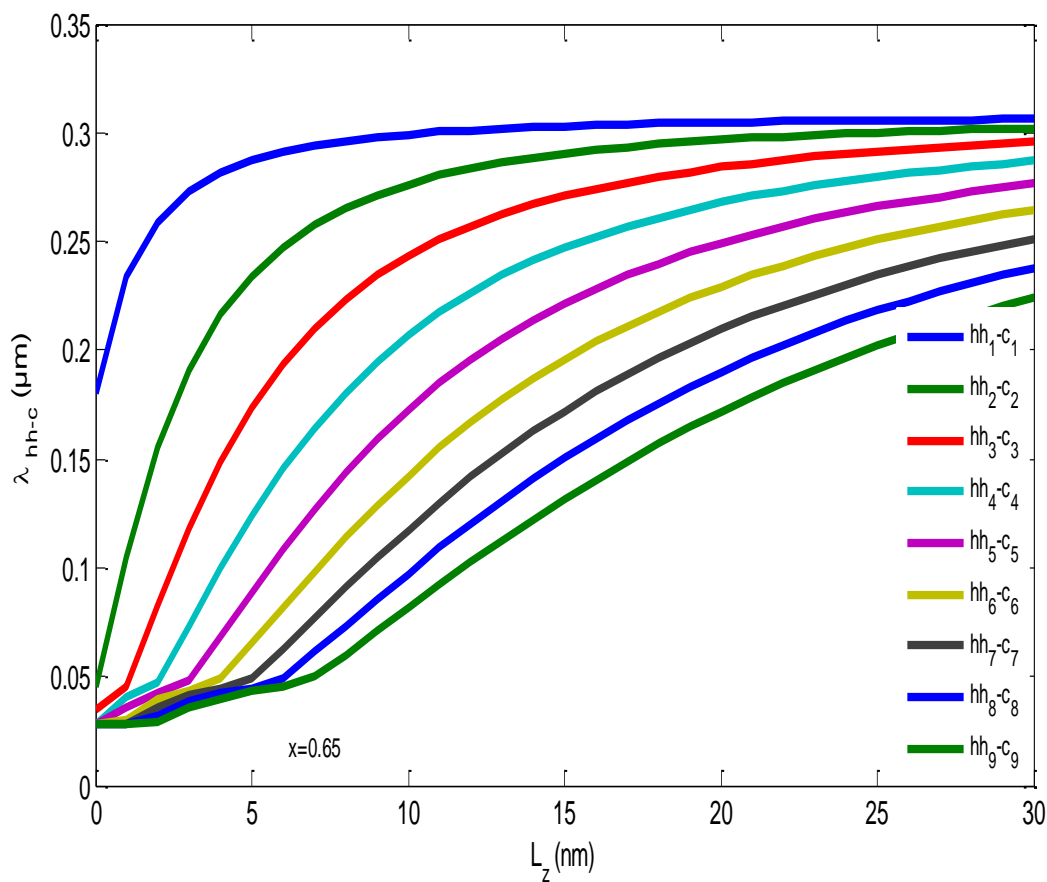


Figure 3.8. Variation des longueurs d'ondes d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'aluminium.

3.5.1 Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions

La longueur d'onde d'émission correspondant à la transition entre les niveaux d'énergie quantifiés des bandes de conduction et de valence avec le même nombre de quantification est donnée par [45 ,46].

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{Eg + Ec_{ni} + Ev_{hhi}} \quad (3.4)$$

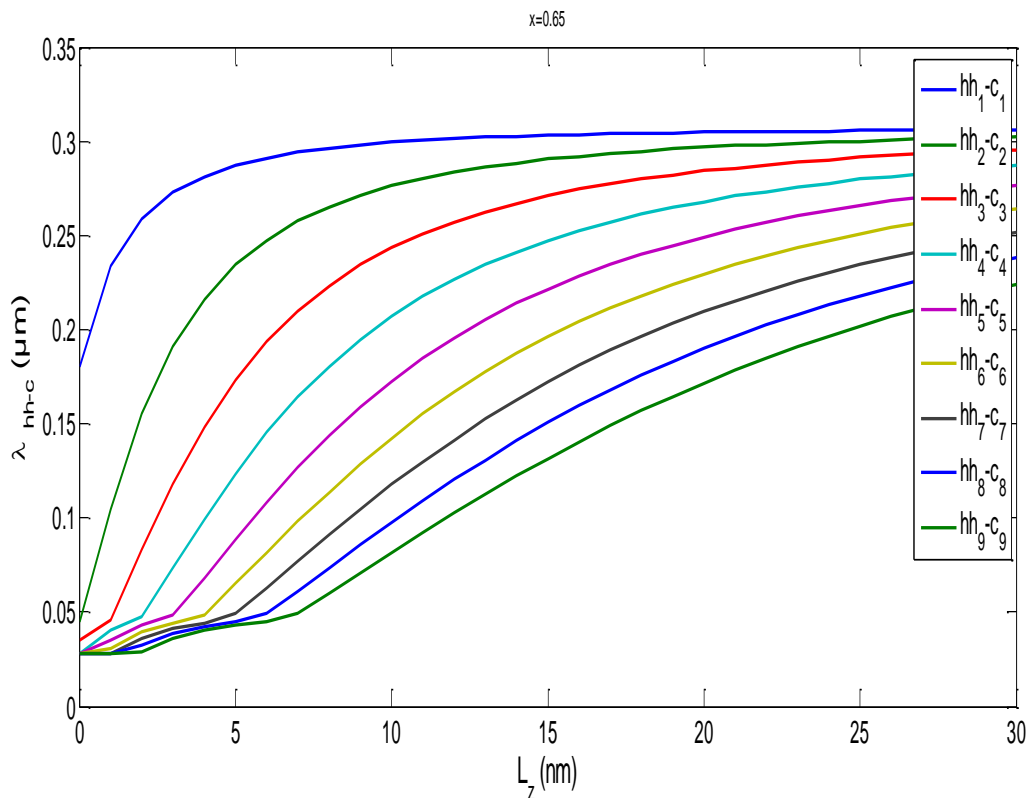


Figure Error! No text of specified style in document..9. Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions pour chaque niveau à concentration d'aluminium $x=0.65$.

3.6 Conclusion

Expansion des puits réduit l'énergie de transition et $\lambda_e = 1.42/E_{tr}$ donc plus l'énergie en mouvement est petite, plus la longueur d'onde de l'émission est grande.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est basé sur l'étude physique de Nano-composants (puits quantiques) sur la structure AlGaAs/GaAs, appliqué aux systèmes de télécommunications.

En premier lieu nous avons aperçu des modèles théoriques traitent les matériaux semi-conducteurs de type III-V. Nous rappelons brièvement quelques propriétés structurales et électroniques des semi-conducteurs composées (alliages) après nous avons cités leurs applications en télécommunication.

En deuxième lieu, a été consacré sur des généralités sur les lasers, les différents types de lasers et leurs principes de fonctionnements, leurs applications. Après nous avons présenté les différents paramètres qui influent sur la longueur d'onde d'émission qui caractérise les lasers.

En dernier lieu, nous avons présenté nos résultats de simulations à base de notre structure (AlGaAs) sur un le substrat de GaAs étudions l'effet de contrainte en compression ,qui faite sur le logiciel MATLAB .Ces résultats étant en bon accord avec les résultats expérimentaux assurons les conditions optimales comme (la stabilité : minimum déformation rapprochons à l'accord du maille),on a conclu que l'effet de la contrainte varie en fonction de la concentration d'aluminium qui permet une augmentation de paramètres de maille et de l'énergie de quantification des porteurs (électrons et des trous lourds) .Par la suite nous avons calculé l'épaisseur critique de la couche active et l'énergie de transition qui donne la longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur de boite et Puits, nous avons conclu que on peut atteindre la longueur d'onde d'émission $1.55\mu m$ optimale et exploitable en télécom.

Finalement la simulation de la structure AlGaAs / GaAs à base de puits quantique en fonction de la concentration d'aluminium résulte une longueur d'onde d'émission optimale pour $x=30\%$ et $x= 65\%$ pour le puits .

Bibliographie

- [1] Andrey Pankratov. 'Propriétés des boites quantiques GaAs/AlGaAs obtenues par remplissage des nano trous',. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017.
- [2] Jihene Zribi ' Croissance et caractérisation des boîtes quantiques InAs/GaAs pour des applications photovoltaïques ',these de doctorat, UNIVERSITÉ de Sherbrooke, Québec, Canada, 26 Novembre 2014.
- [3] KHELIFI ZAHRA & MOUAICI SARAH 'Etude et simulation des boites quantiques à base de InAs/GaAs', Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2013-2014.
- [4] Y. Kayanuma,' Physical Review' B, 38 (1987).
- [5] T. Rajh, M. I. Vucemilovic, N. M.Dimitrijevic, O. I. Micic, A. J. Nozik, 'Chem. Phys'. Lett. 143 (1988).
- [6] L. Katsikas, A. Eychmuller, M. Giersig, H. Weller,' Chemical Physics', Lett. 172 (1990).
- [7] A. Eychmuller, L. Katsikas, H. Weller, 'Langmuir '6 (1990).
- [8] G. Schmid,' Nanoparticles from Theory to Applications', Wiley-Vch Ed. (2004).
- [9] A. Abdelali : 'Rôle du rayonnement dans l'élaboration et l'étude nanoagrégats semi-conducteur de ZnS', mémoire de magister, université de Mentouri Constantine 2014.
- [10] BENATMANE Khaled,'Etude de lasers à base de semi-conducteurs III-V ', thésE de Magister, Université Elhadj Lakhdar Batna ;2011.
- [11] Abdelmoumene BENAHMED 'ETUDE ET MODÉLISATION DES STRUCTURES À BASE DES BOITES QUANTIQUES POUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE ', THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE BLIDA 1, 2017.
- [12] Jean-Yves DUBOZ ' Matériaux semi-conducteurs à grand gap III-V à base de GaN ',Réf : E1995 v1 10 août 1999.

- [13] Alain CHOVET & Pascal MASSON 'Cours de Physique des Semi-conducteurs' École Polytechnique Universitaire de Marseille, IMT, Technopole de Château-Gombert, 13451 MARSEILLE cedex 20 2004/2005
- [14] P.Chevalier,' Conception et réalisation de transistors à effet de champ de la filière AlInAs/GaInAs sur substrat InP. Application à l'amplification faible bruit en ondes Millimétriques', thèse de doctorat, Université de Lille I, 1998.
- [15] H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques', Masson, 1987.
- [16] Gerald Bastard, 'Wave mechanics applied to semiconductor heterostructures', les éditions de physique, paris, 1988.
- [17] EL OUCHDI AHMED AMINE 'caractéristique du phénomène de transport électronique dans les matériaux composé ternaire application au matériaux $GaxIn_{1-x}Sb$ ' these de magister ,univ Abou Baker belkaid TLEMCEM ,2011.
- [18] A. RASKIN 'Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques' ,Université Médicale Virtuelle Francophone , 2009-2010.
- [19] Gerald Bastard,les éditions de physique, paris, 1988.
- [20] C. Kittel ,'Introduction a la physique de l'état solide', Dunod (1972).
- [21] J.S.Blakemore, 'Semiconducting and other major properties of gallium Arsenide', J. Appl. phys. 53(10), October 1982.
- [22] François BALEMBOIS Sébastien FORGET,' Lasers et optique non linéaire Le laser' ,Fondamentaux Université Paris - Nord 13 2007.
- [23]D. Dangoisse, D. Hennequin et V. Zehnlé-Dhaoui,' Les lasers', Dunod, 2004.
- [24] D.A.B Miller : "physical 'reasons for optical interconnecting'. Optoelectronicx (1997).
- [25] Nicolas Trenado 'Modélisation et simulation des composants optoélectroniques à puits quantiques' HAL Id: tel-00010221 20 Sep 2005.
- [26] Legér Lefevre ,'Applications industrielles Transmission par fibre optique ',2015.
- [27] Claire-Marie Simon,'Contrôle optique de l'exciton dans des boîtes quantiques individuelles' ,HAL Id: tel-00707530 Submitted on 12 Jun 2012.
- [28] H. Y. Fan, 'Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors', Phys. Rev., vol. 82, p. 900, 1951.
- [29] J. Piprek,' Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and

Simulation', California : Academic Press, 2003.

[30] AISSAT Abdelkader, "Cours matériaux pour l'optoélectronique" Université de Blida 2017.

[31] Frédéric Fossard 'Spectroscopie infrarouge des fils et boîtes quantiques InAs /InAlAs /InP (001) ', université Paris XII Orsay; 2002.

[32] AouatiRedha, 'Etude de l'interaction électron-matière des nanostructures de l'arséniure de gallium', université Mentouri Constantine, 2011.

[33] Raïssa RAY-DJONDANG 'Spectroscopie optique de boîtes quantiques d'InAs sur substrats d'InP et de GaAs Nanopixel semiconducteur pour l'étude de l'influence d'un champ électrique', No d'ordre 2010-ISAL-OXXX Année 2010.

[34] B .Hadda , ' Modélisation et étude d'un puits quantique contraint à base de GaInAs/GaAs et calcul du courant de seuil ', mémoire Magister, Université de Blida, juillet 2011.

[35] SEGHILANI Mohamed Seghir , 'Modélisation et simulations d'une structure à multi-puits quantiques à base de GaInAs (N,Sb)/GaAs', Thèse de magistère. Université de Blida. Département d'électronique juin 2011.

[36] Y. Zhang, A. Mascarenhas, H.P. Xin, and C.W. Tu, 'Valence-band splitting shear deformation potential of dilute GaAs_{1-x}N_x alloys', Phys. Rev., 61, n° 7, 4433- 4436 (2000).

[37] RACHID BESTAM 'MODELISATION ET SIMULATION D'UNE STRUCTURE A BASE DE SEMICONDUCTEUR III-V POUR LE PHOTOVOLTAIQUE ', MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE SAAD DAHLED DE BLIDA, 2011.

[38] A. Aissat ,M. El bey, R. Bestam, J.P. Vilcot , 'Modeling and simulation of Al_xGa_{1-x}In_{1-x}LyAs/InP quaternary structure for photovoltaic ', LATSI Laboratory, Faculty of the Engineering Sciences, Blida, Algeria 2014.

[39] AISSAT ABDELKADER , 'Modélisation et calcul du gain optique et du courant de seuil d'un laser à puits quantique contraint à base de GaInAs/InP', Thèse de magistère. Université BLIDA, 1999.

[40] Bethoux, J.-M , 'Relaxation des Contraintes dans les Hétérostructures épaisses (Al,Ga)_n : une Piste Originale pour la Réalisation de Diodes Electroluminescentes à Cavité Résonante', Université de Nice Sophia-Antipolis, septembre 2004.

[41] Ghione, G., 'Semiconductor Devices for High-Speed optoelectronics', Politecnico Dtorino, Italy, Cambridge university press, 2009 .

[42] Sadao Adachi, 'Material parameters of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ and related binaries' Musashino Electrical Communication Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Musashino-shi, Tokyo 180, Japan (Received 15 March 1982; accepted for publication 20 July 1982).

[43] Publicité dans FUTURASCIENCES, <https://www.futursciences.com/sciences/definitions/physique-boite-quantique-4754>.

[44] S. MÉNARD 'ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS MAGNÉTO-OPTIQUES DE STRUCTURES A POINTS QUANTIQUES $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ', Mémoire présenté au département de physique en vue de l'obtention du grade maître ès science (M.Sc.), FACULTÉ DES SCIENCES UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE Sherbrooke, Québec, Canada, août 2001.

[45] Abdelkader NASSOUR¹, Malika KANDOUCI¹, Hamza ABID¹, Abderrahmane NAAS² et Kada BITEUR¹ 'L'effet de la température sur les paramètres fonctionnels d'un laser à boîte quantique InAs/GaAs ', ElWahat pour les Recherches et les Etudes Vol.7n°2 (2014).

[46] Masahiro Asada, Yasuyuki Miyamoto and Yasuharu Suematsu., 'Gain and the Threshold of Three-Dimensional Quantum-Box Lasers' IEEE Journal of Quantum Electronics. VOL. QE-22. 1986.