
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

ZERG L AINE Ibrahim

&

BADANI Samiha

Etude et simulation boîtes et puits quantiques pour la télécommunication

Proposé par : **Pr. AISSAT Abdelkader**

Année Universitaire 2017-2018

ملخص

في هذا العمل صببنا اهتمامنا على دراسة ومحاكات لبنية InGaAs/GaAs للانبعثات الاشعة تحت الحمراء. هذا الخليط الثلاثي الذي هو مركب من اشباه النواقل III-V، ذو خصائص جد مهمة وخاصة طاقة فجوته التي تتناقص باستمرار مع زيادتنا في تركيز الإنديوم.

قمنا كذلك بدراسة العوامل المختلفة التي تخص الليزر، التي استخدمناها في حساب طول الموجة المنبعثة من بئر ونقط كمومية التي وجدناها على النحو الاتي بتركيزات مختلفة للإنديوم ($In_{0.38}Ga_{0.62}As$ $In_{0.3}Ga_{0.7}As$) بالنسبة للبئر و($In_{0.5}Ga_{0.5}As$) بالنسبة لنقط.

كلمات المفاتيح : ليزر؛ بئر كمومي؛ لنقط كمومي طول موجة الانبعثات.

Résumé

Dans ce travail, nous avons concentré notre attention sur l'étude et la simulation de la structure InGaAs / GaAs de l'émission infrarouge. Ce mélange ternaire, qui est un composé de semi-vecteurs III-V, a des caractéristiques très importantes, notamment l'énergie de son gap, qui décroît constamment avec l'augmentation de la concentration en indium.

Nous avons également étudié les différents facteurs liés au laser, que nous avons utilisé pour calculer la longueur d'onde émise par un puits et les points quantiques que nous avons trouvés à différentes concentrations d'indium ($In_{0.30}Ga_{0.70}As$ et $In_{0.38}Ga_{0.62}As$) pour le puits et ($In_{0.50}Ga_{0.50}As$) Pour un point.

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

Abstract

In this work we have focused our attention on studying and simulating the InGaAs/ GaAs structure of infrared emission. This triangular mixture, which is a compound of semi-vectors III-V, has very important characteristics, especially the energy of its gap, which decreases constantly with increasing the concentration of indium.

We also studied the various factors related to the laser, which we used to calculate the wavelength emitted from a well and quantum dots that we found at different concentrations of indium ($In_{0.3}Ga_{0.7}As$, $In_{0.38}Ga_{0.62}As$) for the well and ($In_{0.5}Ga_{0.5}As$) For a dot.

Keywords: laser; quantum well; quantum dots, 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.

Nous tenons également à remercier une personne Mr. LAIDOUCI Abdelmoumen, pour l'intérêt qu'il a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par ses propositions.

Nous remercions aussi Mr. BENYETTOU Fethi, Mr. Rachid bestam, Mr.GUESMI Houcine, Mr. CHEFFI Abdelhak.

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.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma très chère mère 'Nassima', honorable et aimable,.
Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu
mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma
naissance.

A mon cher père 'Salem', rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit
pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices
que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mes adorables sœurs 'Sarah' et 'Fahima', Je vous dédie ce travail avec tous
mes vœux de bonheur et de santé.

A mes très chers frères 'Fayçal' et 'Hamza', Je vous exprime à travers ce travail
mes sentiments de fraternité et d'amour.

A une personne très chère à mon coeur qui a toujours été à mes côtés et m'a
soutenue dans les moments les plus durs, kelthoum boutheldja.

A une personne très chère Abdellah je vous dédie ce travail

A mon binôme je te souhaite que du bonheur et de réussite dans ta vie.

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

SAMIHA BADANI

À ma chère mère,

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

À mon frère Abdo ;

À mes adorables sœurs : DJahida ; Assia, Hadjira, Safia
Karima, Fatma; et Linda

À mes très chers frères : Morad, Mostapha, Youssef, Mohamed, Ilyas,
Lhadj, Amine

Pour les enfants Asile ; Jawad ; Younes ; Houda ;

À toute ma grande famille ZERG LAINE

À tous mes amis, Sofian ; Madjid ; Fateh ; Miloud. Abdullah »

ZERG LAINE Ibrahim

Listes des acronymes et abréviations

In: Indium.

Ga: Gallium.

As: Arsenic.

x : Concentration d'indium.

L_w : Largeur du puits quantique.

Δa : Désaccord paramétrique.

E_g : Énergie de gap.

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

L_h : Trou léger (Light hole).

h_h: Trou lourd (Heavy holes).

E_v: Energie de la bande conduction.

E_c : 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 (Bowing).

Cfc : Cubique à face centrée.

E_i : Niveaux d'énergies.

$h\nu$: Énergie de photon.

n_1 : Le niveau fondamental.

n_2 : La première 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(InGaAs).

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

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

a_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 de 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.

L_{dot} : Largeur de la boîte.

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

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

k : Constant de Boltzmann

E_{G-QD} : Gap d'énergie de la boîte quantique

E_{G-B} : Gap d'énergie de la couche barrière

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 CHAPITRE 1: 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.....	7
1.3.2 Les alliages.....	8
1.3.3 Les structures cristallines	10
1.3.4 Réseau réciproque et zone de Brillouin	11
1.3.5 Les avantages des semi-conducteurs III-V.....	12
1.4 Conclusion	12
2 CHAPITRE 2: Laser dans les puits et boîtes quantiques	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 Définition d'un laser	13
2.2.1 Les éléments fondamentaux de laser	13
2.2.2 Principe d'un laser	15
2.2.3 Principe de fonctionnement d'un laser	16
2.3 L'intérêt de laser dans les semi-conducteurs.....	17
2.4 Les applications du laser	17
2.5 Boîte quantique	18
2.6 Puits quantique	19
2.7 Effets du confinement.....	20
2.8 Masse effective	22

2.8.1	Masse effective des électrons	22
2.8.2	Masse effective des trous.....	24
2.9	La contrainte.....	24
2.9.1	Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie	26
2.10	Epaisseur critique	29
2.11	Conclusion	31
3	CHAPITRE 3: Résultats et discussion	32
3.1	Introduction.....	32
3.2	Résultats et discussions des simulations.....	32
3.2.1	Paramètre de maille	32
3.2.2	Désaccord de maille	34
3.2.3	L'épaisseur critique	35
3.2.4	La bande interdite contrainte et non contrainte	35
3.2.5	Barrière de potentiel	37
3.3	Énergies de quantifications	38
3.3.1	Quantification des porteurs dans le puits	38
3.3.2	Énergies de quantifications des trous lourds	39
3.4	Énergies de transitions	39
3.5	La longueur d'ondes d'émissions	40
3.6	Boite quantique	42
3.6.1	Structure de bande.....	43
3.6.2	Energie de quantification pour les électrons	44
3.6.3	Energie de quantification pour les trous lourds.....	44
3.7	Energie de transitions.....	45
3.7.1	Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions.....	46
3.8	Conclusion	47
	Conclusion générale	48
	Bibliographie	49

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].	10
Figure 1.4. Structure de wurtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 constitué de 2 sous-réseaux hexagonaux [20].	11
Figure 1.5. Première zone de Brillouin de la structure zinc blende [17].	11
Figure 2.1. Schéma d'un oscillateur laser [22].	15
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].	16
Figure 2.3. Représentant les différents composants d'un laser [23].	17
Figure 2.4. Illustration d'un puits quantique [30].	19
Figure 2.5. Profil de potentielle dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2 [31].	20
Figure 2.6. Différents types de confinement et densités d'états associées [33].	22
Figure 2.7. Illustration des deux types de déformation [11].	25
Figure 2.8. Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat [11].	26
Figure 2.9. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct [38].	29
Figure 2.10. Schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et Une couche contrainte relaxée (b) [35].	30
Figure 3.1. Variation du paramètre de maille (a_{InAs} , a_{GaAs}) de la structure $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ en fonction de la concentration de l'Indium.	33
Figure 3.2. Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'indium.	34
Figure 3.3. Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium.	35
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'indium.	36
Figure 3.5. La différence de variation d'énergie (ΔE_{vlh} , ΔE_{vhh} , 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'indium. ...	37
Figure 3.6. (a,b,c,d) Variation des énergies de quantifications des porteurs dans le puits quantique pour différentes concentration d'indium.	38

Figure 3.7. La variation des énergies de quantifications des trous lourds en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.	39
Figure 3.8. (a, b, c, d) 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	40
Figure 3.9. (a, b, c, d) Variation des longueurs d'ondes d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'indium.	41
Figure 3.10. Diagramme de bandes de systèmes à points quantiques InGaAs/GaAs [44].	42
Figure 3.11. Structure de bande du niveau conduction et valence des QD pour une concentration d'indium $x=0.5$	43
Figure 3.12. Structure de bande pour différents niveaux d'énergies d'une seule boîte quantique pour $x=0.5$	43
Figure 3.13. Energie de quantification pour les électrons concentration d'indium $x=0.5$	44
Figure 3.14. Energie de quantification pour les trous lourds à concentration d'indium $x=0.5$	45
Figure 3.15. Le principe de l'illustration de la structure de bande pour l'auto-organisation des boîtes quantiques [11].	45
Figure 3.16. Energie de transitions pour différents niveaux concentration d'indium $x=0.5$	46
Figure 3.17. Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions pour chaque niveau à concentration d'indium $x=0.5$	47

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Tableau périodique partiel (les chiffres en bas représentent le nombre atomique) [14]. ..	7
Tableau 1.2. Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300K [15][16].	8
Tableau 1.3. Les alliages ternaires et quaternaires [17].	9
Tableau 2.1. Les valeurs de β pour différents types de puits quantique [41].	31
Tableau 3.1. Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration In (x)	33

Introduction générale

Introduction générale

Les semi-conducteurs jouent un rôle essentiel dans l'industrie et de nombreux dispositifs électroniques à base de semi-conducteurs sont présents dans nos vies quotidiennes : bureaux, tablettes, smartphones, écrans plats et capteurs.

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 décennies [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 InAs, 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], et les points quantiques ou « quantum dots ». 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 et boite quantique à base d'un matériau ternaire InGaAs/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 InAs.

Dans le second chapitre, nous étudions les types de puits quantiques et les points 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 et Silvaco) pour les puits et les points quantiques.

Chapitre 1 : 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].

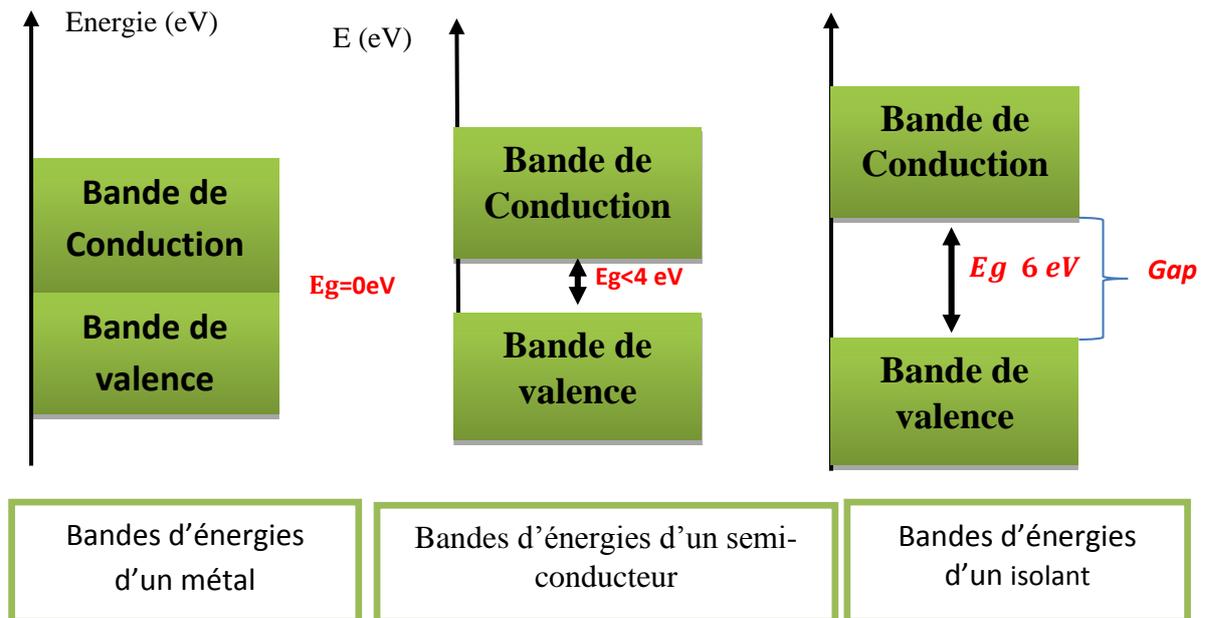


Figure 1.1. Diagrammes énergétiques pour les trois types des matériaux [3].

- 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 heavy holes) 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].

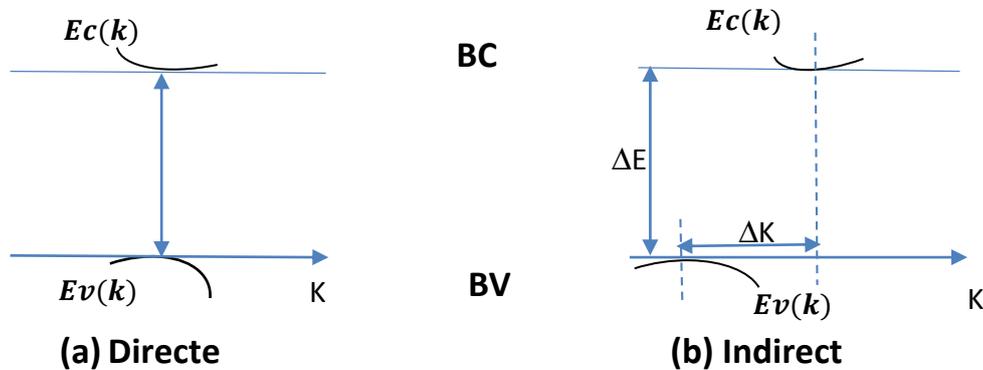


Figure 1.2. Energie de gap [13].

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 III 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 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 chiffres en bas représentent le nombre atomique) [14].

1.3.1 Les matériaux binaires

L'étude de propriétés des composés binaires, 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. Les composés contenant du bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à base de Galium (*GaAs*, *GaSb*) ou d'indium (*InP*, *InAs*, *InSb*) dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau (1.2) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V [10].

Composé III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ_n (cm ² /VS)	μ_p (cm ² /VS)	a (Å°)
<i>GaAs</i>	1.42	0.067	8500	400	5.6533
<i>InAs</i>	0.36	0.023	33000	500	6.0584
<i>GaP</i>	2.26	0.82	1105	–	5.4512
<i>InSb</i>	0.17	0.0145	78000	800	6.4794
<i>InP</i>	1.35	0.077	4600	100	5.8686
<i>GaN</i>	3.36	0.19	1800	200	3.189

Tableau 1.2. Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300K [15-16].

1.3.2 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 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 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 1.3. 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.

1.3.3 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].

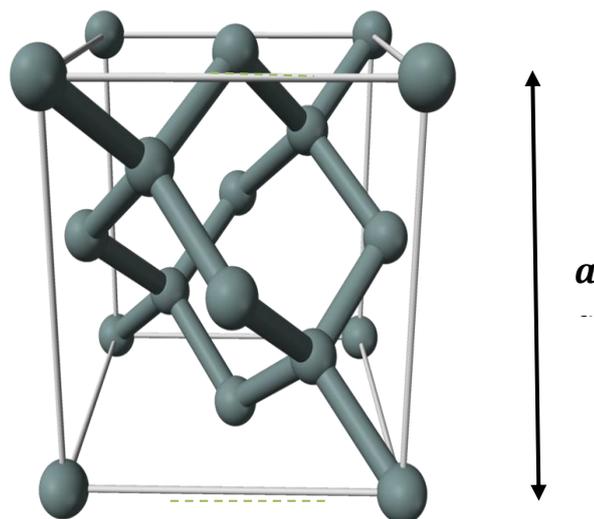


Figure 01.3. Maille cristallographique de Structure Zinc Blende [19].

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.

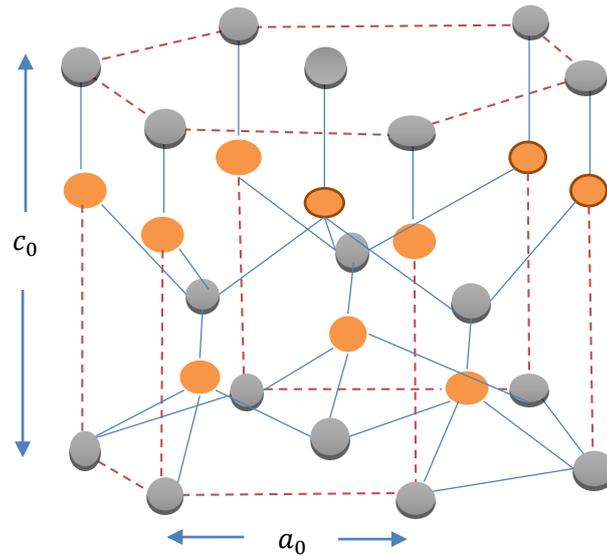


Figure 1.4. Structure de wurtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 constitué de 2 sous-réseaux hexagonaux [20].

1.3.4 Réseau réciproque et zone de Brillouin

Le réseau réciproque est défini à partir du réseau cristallin direct, il est le système de coordonnées [énergie - vecteur d'onde] dans lequel on représente la variation de l'énergie des états électroniques en fonction du vecteur d'onde k caractérisant la propagation de l'onde considérée. En effet, le réseau réciproque associé à la structure cristalline de type zinc-blende est cubique centré. Sa maille élémentaire, qui correspond à la première zone de Brillouin à la forme d'un octaèdre tronqué par les six faces d'un cub [17]. Elle est représentée sur la figure ci- dessous :

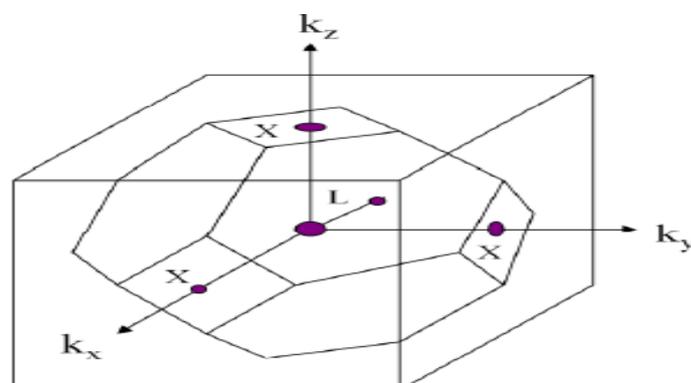


Figure 1.5. Première zone de Brillouin de la structure zinc blende [17].

Les fonctions d'ondes électroniques et les énergies correspondantes sont fonction du vecteur d'onde de l'électron. Etre représentée dans l'espace réciproque et dans les différentes directions du vecteur d'onde K . Le réseau réciproque associé à la structure de type zinc blende est cubique centré. Sa maille élémentaire qui correspond à la première zone de Brillouin à la forme d'un octaèdre tronqué par les six faces d'un cube est représenté sur la figure 1-2 Avec :

- Point Γ : un centre de symétrie à l'origine (centre de zone) [11].

1.3.5 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.

Chapitre 2 : Laser dans les puits et boîtes quantiques

2.1 Introduction

Le marché des semi-conducteurs lasers, a vécu des progressions spectaculaires. Partant des semi-conducteurs lasers traditionnels à puits quantiques vers des lasers à boîtes quantiques qui offrent des avantages et des améliorations plus importantes et qui assure un fonctionnement très efficace à haute température, ces lasers ont été réalisés en 1994 en utilisant des systèmes BQs auto-assemblées. Ces boîtes améliorent drastiquement les propriétés des semi-conducteurs lasers.

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

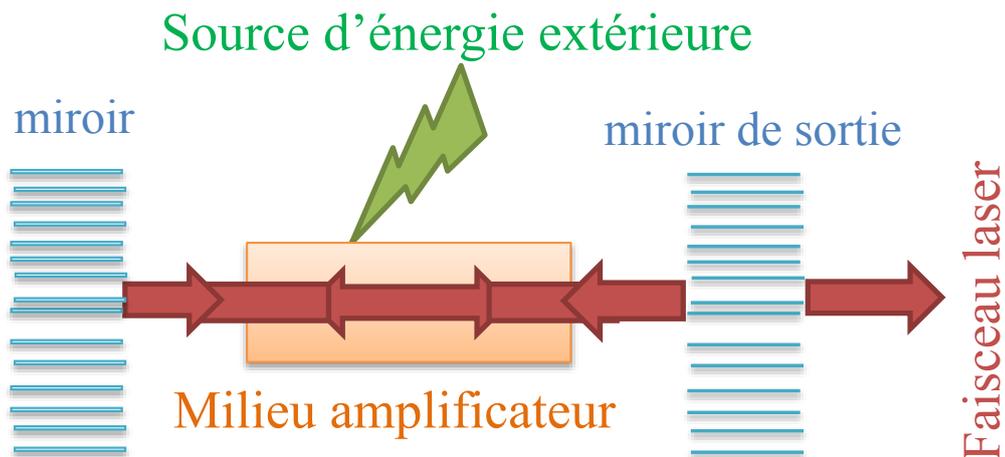


Figure 2.1. Schéma d'un oscillateur laser [22].

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 :

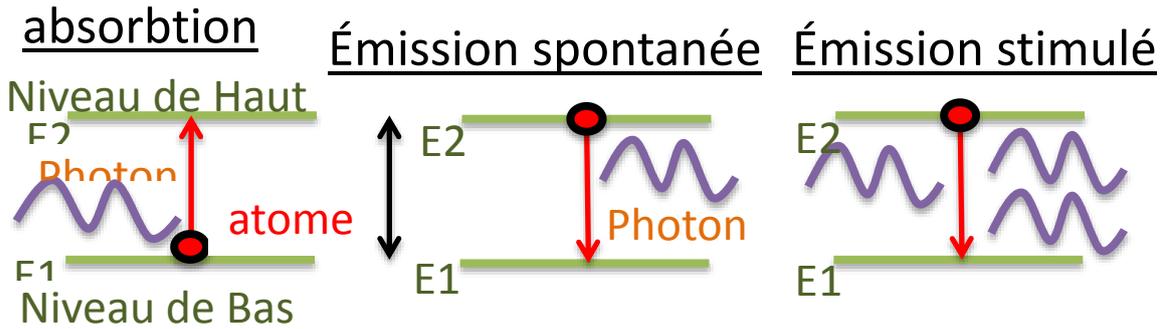


Figure 2.2. Mécanisme d'interaction entre un atome et un photon. (On suppose que le photon a une énergie $h \cdot \nu$ égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux de l'atome [22].

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].

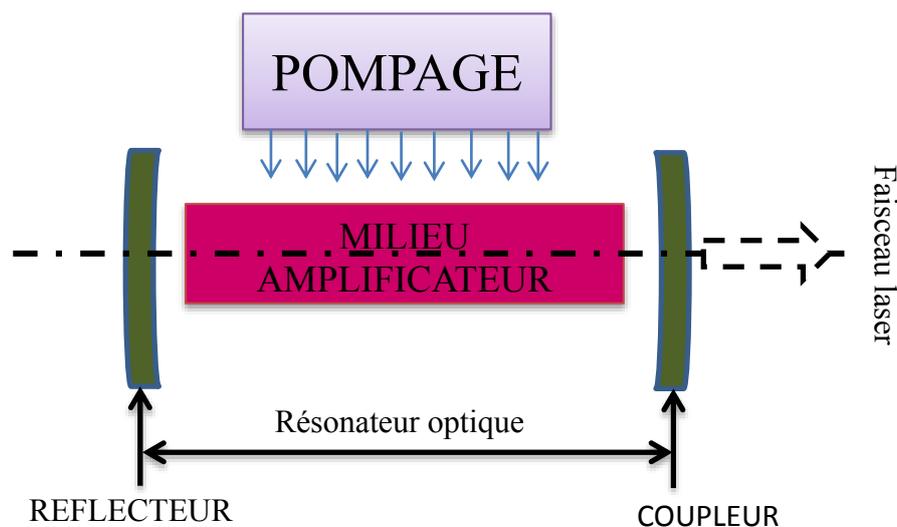


Figure 2.3. Représentant les différents composants d'un laser [23].

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 ($E = h c / \lambda$) 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 Les applications du laser

Le laser est maintenant présent dans beaucoup de domaines (télécommunications optiques, stockage d'informations (CD, DVD), instrumentation, mesures, biomédical, traitement des

matériaux ...). Il devient de plus en plus fiable, compact et puissant. Le champ d'applications va donc en s'élargissant. Il est assez difficile d'en donner une liste exhaustive tant les applications du laser sont multiples [26].

- **Applications Médicales**

Ophthalmologie.

Tabacologie : laser doux, traitement contre les dépendances.

Dermatologie : épilation laser, détatouage laser.

Dentisterie : laser dentaire Erbium, laser dentaire YAP.

- **Applications policières**

Utilisation pour la détection d'empreintes latentes dans le domaine de la criminalistique.

Cinémomètre laser portable et autonome qui permet de détecter la vitesse des véhicules dans le domaine de la sécurité routière.

- **Transfert d'information**

Lecture et enregistrement de support optique numérique (CD, DVD, Laser Disc...)

Electro photographie (ou « xérographie »), procédé des imprimantes laser

Télécommunications via réseaux de fibres optiques.

Transmission inter-satellitaire.

2.5 Boite quantique

Une boîte quantique ou point quantique, aussi connu sous son appellation anglophone de quantum dot, est une nanostructure de semi-conducteurs. Par sa taille et ses caractéristiques, elle se comporte comme un puits de potentiel qui confine les électrons (et les trous) dans les trois dimensions de l'espace et leur niveau d'énergie sont discrets, dans une région d'une taille de l'ordre de la longueur d'onde des électrons (longueur d'onde de De Broglie), soit quelques dizaines de nanomètres dans un semi-conducteur. Ce confinement donne aux boîtes quantiques des propriétés proches de celles d'un atome, raison pour laquelle les boîtes quantiques sont parfois qualifiées d'« atomes artificiels ». Typiquement, les boîtes quantiques ont une taille latérale dans le plan de croissance (~15-20 nm de diamètre) grande devant leur épaisseur (2-4 nm) selon l'axe de croissance (une forme qui ressemble à une lentille et dépend de la méthode de croissance). Ceci implique que le confinement hors du plan est beaucoup

plus fort, et les états discrets de plus basse énergie sont généralement associés au confinement selon l'axe de croissance [27].

2.6 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].

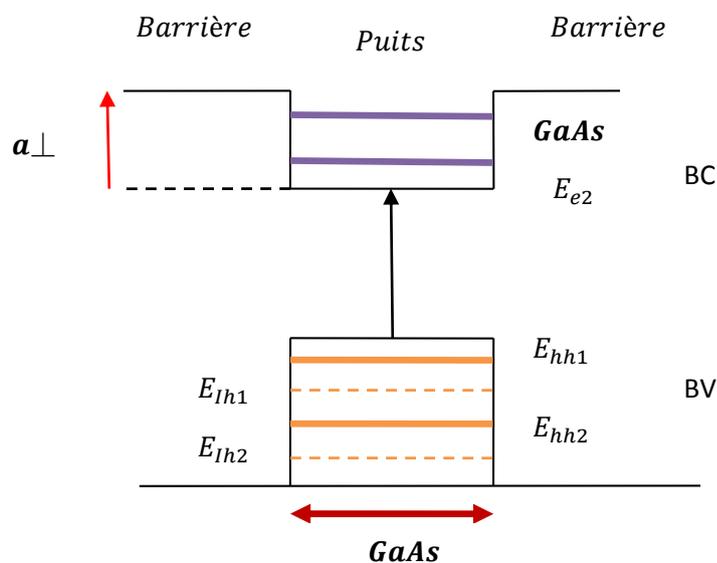


Figure 2.4. Illustration d'un puits quantique [30].

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

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

E_{lhn} : 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.

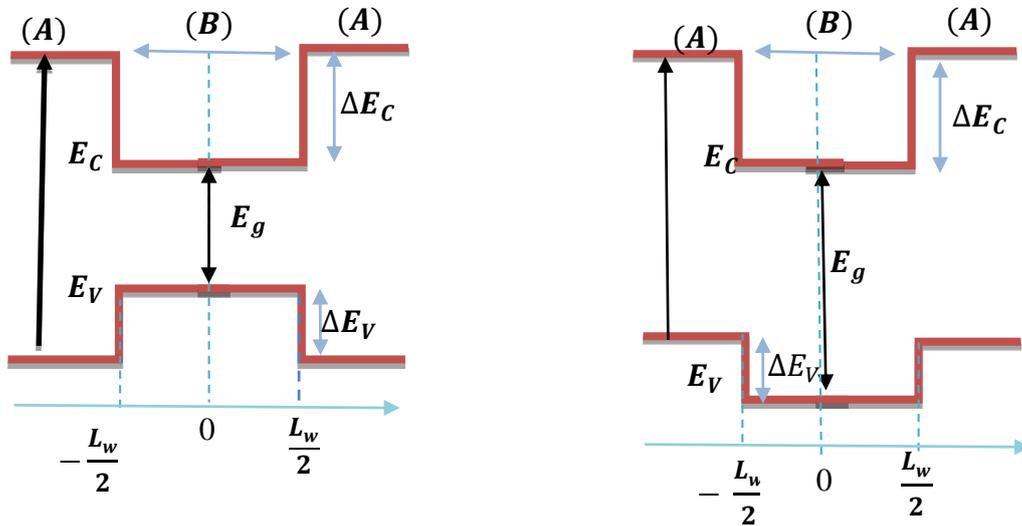


Figure 2.5. Profil de potentielle dans un puits quantique de type 1 et un puits quantique de type 2 [31].

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].

2.7 Effets du confinement

La longueur d'onde λ_β 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.

➤ Boîte quantique (0D)

si l'on confine l'électron suivant toutes les directions, on obtient :

$$E = E_{x,l} + E_{y,m} + E_{z,n} \quad (2.6)$$

C'est-à-dire que l'énergie de l'électron est totalement quantifiée et les niveaux d'énergie sont définis par la taille du piège. La densité d'états n'est alors non nulle que lorsque l'énergie vaut $E_{x,l} + E_{y,m} + E_{z,n}$

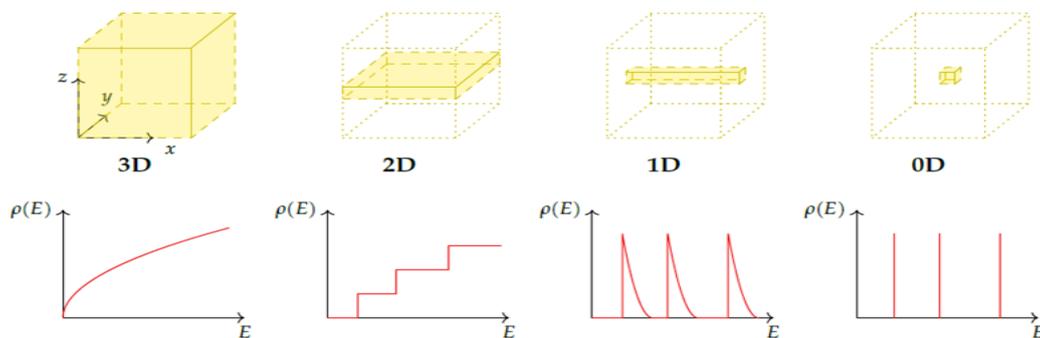


Figure 2.6: Différents types de confinement et densités d'états associées [33].

2.8 Masse effective

2.8.1 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 :

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

Où, 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 :

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

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].

2.8.2 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 $K=0$.

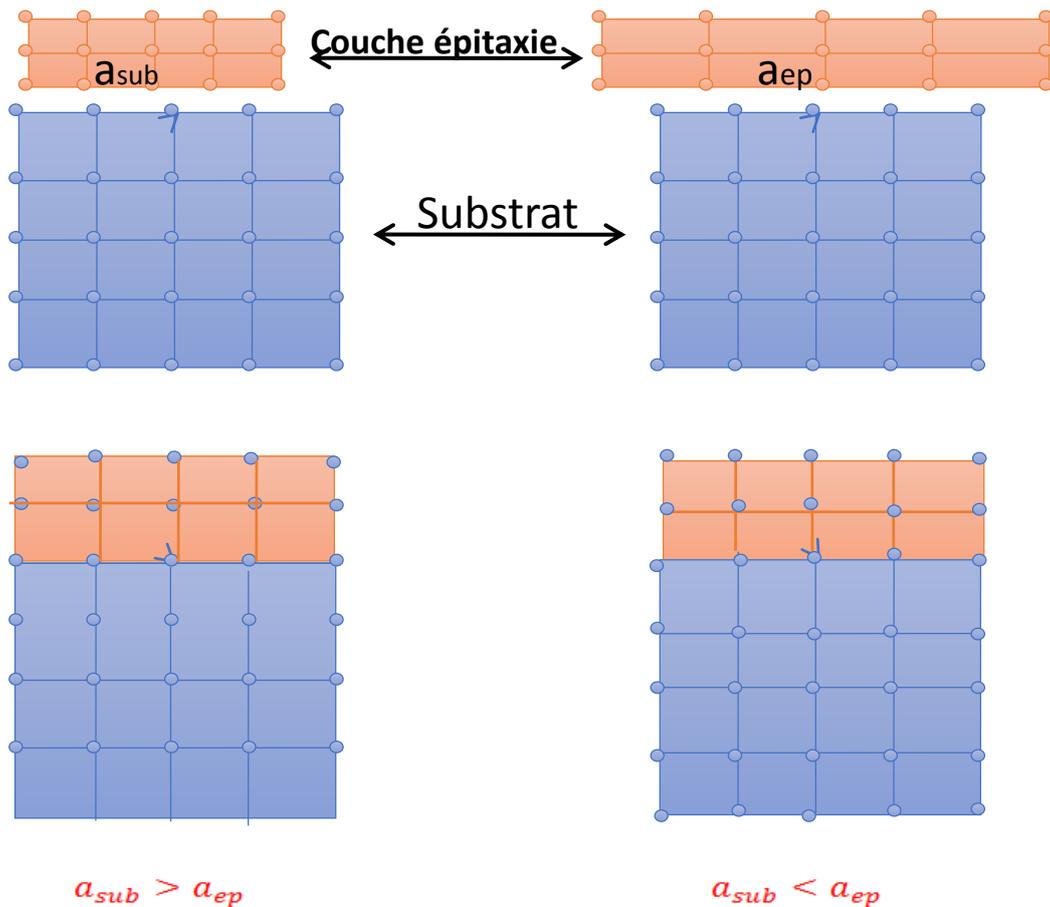
Les énergies des trous sont comptées positivement vers le bas. La bande de plus grande courbure, bande inférieure, correspond à des trous de masse effective inférieure (bande des trous légers) et la bande de plus faible courbure, bande supérieure, correspond à celle des trous lourds.

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

γ_1 et γ_2 paramètre de Luttinger [34].

2.9 La contrainte

L'épitaxie du matériau InGaAs 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 épitaxies 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].



A) couche en extension

b) couche en compression

Figure 2.7. 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 :

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

- Uni-axiales dans la direction de croissance :

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

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.

2.9.1 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.

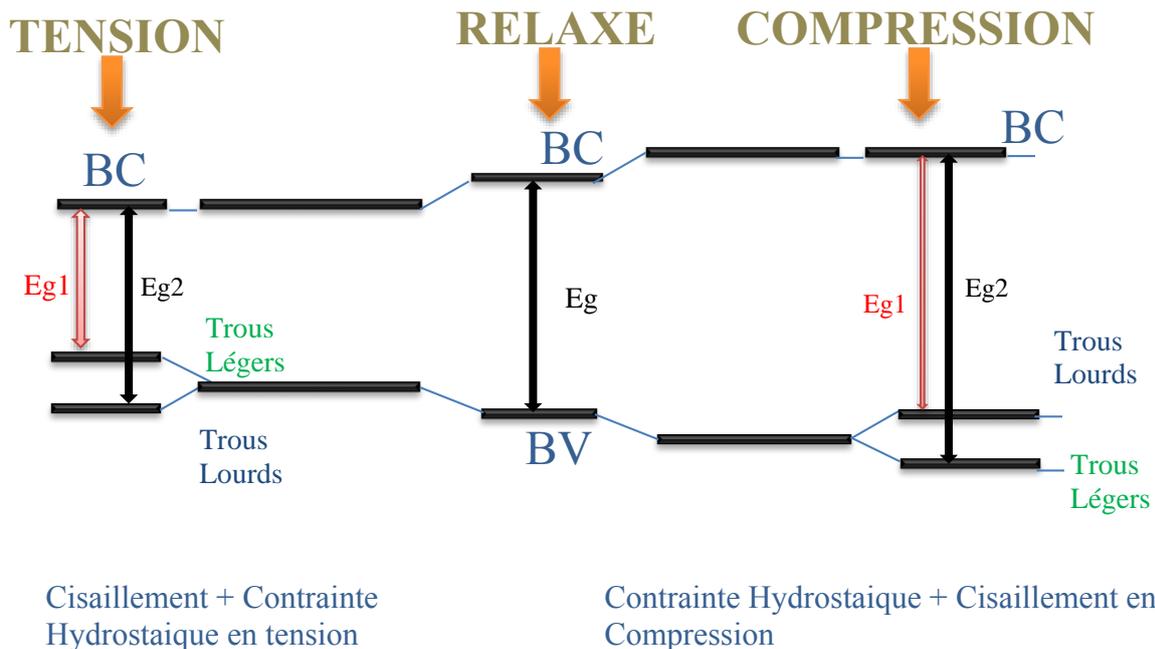


Figure 2.8. Évolution de l'énergie de la bande interdite en fonction de l'état de contrainte d'une couche déposée sur un substrat [11].

En première approximation, même si les boîtes quantiques ne sont pas symétriques dans le plan perpendiculaire à l'axe de croissance, rappelons que la décomposition de la contrainte hydrostatique et biaxiale conduit aux composantes de déformations suivantes :

$$\varepsilon_{\perp}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{xx}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{yy}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{zz} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{//}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{xx}(\mathbf{r}) + \varepsilon_{yy}(\mathbf{r}) - 2\varepsilon_{zz}(\mathbf{r}) \quad (2.15)$$

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

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 gap sont 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 :

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

Et pour une couche en tension :

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

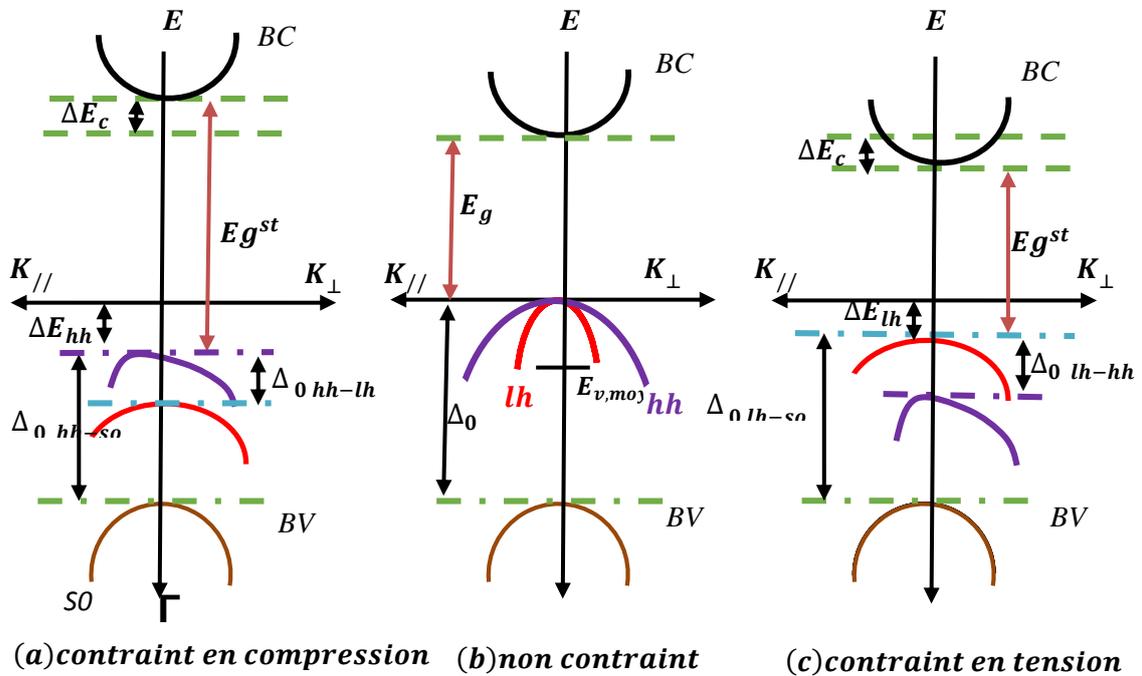


Figure 2.9. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct [38].

2.10 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].

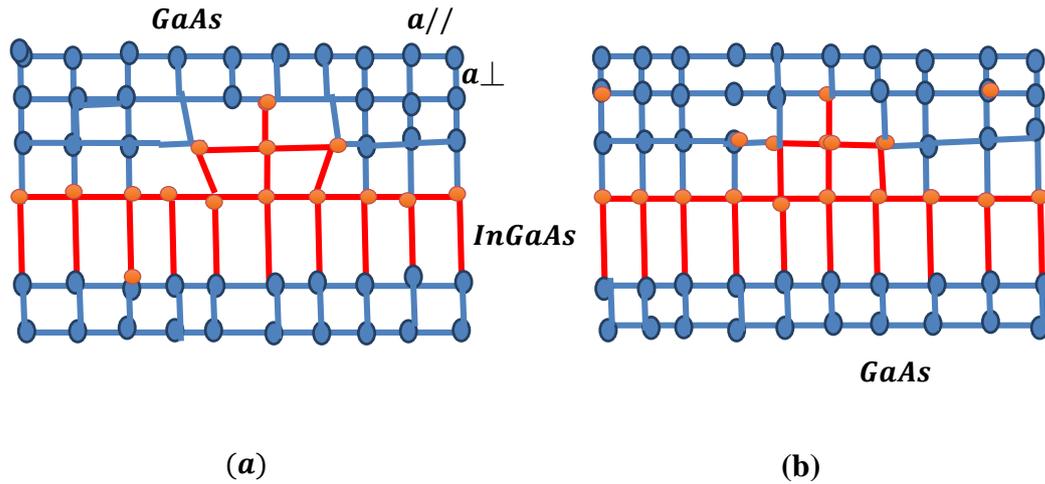


Figure 2.10. Schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et Une couche contrainte relaxée (b) [35].

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) épitaxie 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 InAs, 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 02.1. Les valeurs de β pour différents types de puits quantique [41].

2.11 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. Dans le chapitre suivant on étudiera les résultats de la simulation de matériaux InGaAs et la mise en évidence du résultat obtenue avec d'autres résultats ainsi une petite comparaison entre les boites et les puits quantiques.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer des simulations sur la structure ternaire a puits et boites quantique $In_xGa_{1-x}As/GaAs$. Nous nous sommes aidés du logiciel de simulation Matlab et Silvaco pour présenter et interpréter les résultats obtenus pour déterminer la concentration optimale l'indium, 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 créée 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'indium (In) sur le paramètre de maille de la structure $InGaAs$ nous avons varié x dans l'intervalle $[0, 1]$. La figure (3.1) représente la variation du paramètre de maille de la structure $InGaAs$ en fonction des concentrations de In.

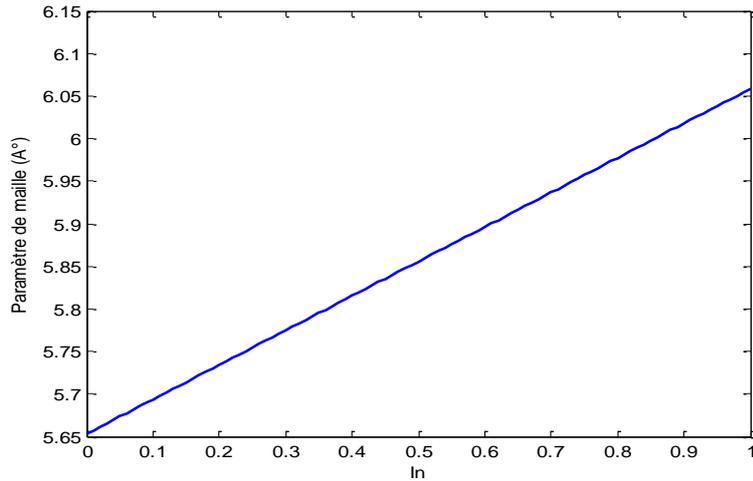


Figure 3.1. Variation du paramètre de maille ($a_{\text{InAs}}, a_{\text{GaAs}}$) de la structure $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ en fonction de la concentration de l'Indium.

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'indium (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].

$$a_{\text{InGaAs}}(x) = a_{\text{InAs}} \cdot x + (1 - x) \cdot a_{\text{GaAs}} \quad (3.1)$$

avec :

$$a_{\text{InAs}} = 6.0583$$

$$a_{\text{GaAs}} = 5.6532$$

On présente quelques résultats dans ce tableau :

Concentration In (x)	0	0.5	0.6	1
Paramètre de maille (Å)	5.65	5.85	5.9	6.06

Tableau 3.1. Quelques valeurs des paramètres de maille en fonction de variation de concentration In (x)

À partir de là, nous observons que l'augmentation de la concentration d'indium induit une augmentation de paramètre de maille de l'alliage avec $\Delta a=0.41\text{\AA}$.

3.2.2 Désaccord de maille

La figure (3.2) montre la variation du paramètre de contraintes ε en fonction de concentration l'indium (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'indium (In). Par exemple, pour $x = 0.30$ la déformation est égale à $\approx 2.1\%$. Si les concentrations augmentent jusqu'au $x = 0.60$, la déformation reste encore compressive et égale à $\approx 3.5\%$, On déduit alors que l'augmentation de la concentration de l'indium induit une augmentation du désaccord de maille avec $\Delta\varepsilon=1.4\%$.

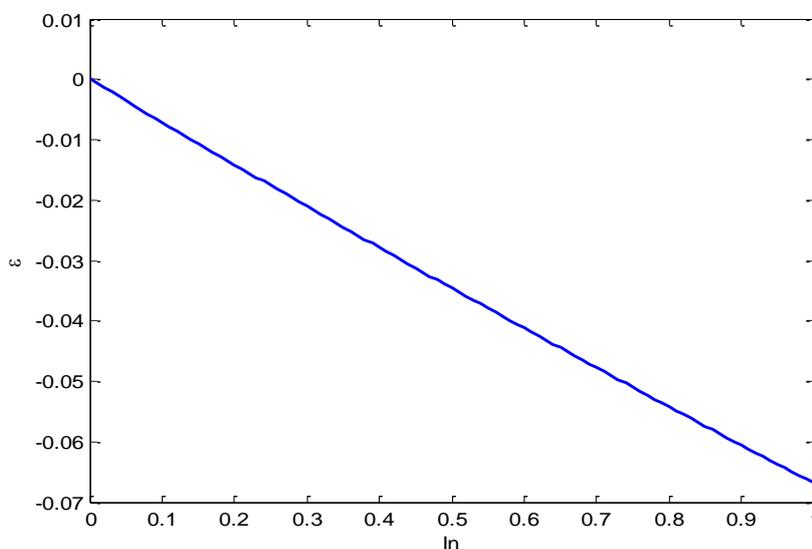


Figure 3.2. Variation du désaccord paramétrique ε en fonction de la concentration d'indium.

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 ($\varepsilon \approx 2\%$).

3.2.3 L'épaisseur critique

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

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

On constate si on augmente la concentration de l'In l'épaisseur entamera une diminution atteignant 98\AA pour des concentrations de In à 0.38, et ce, pour une contrainte de 2%.

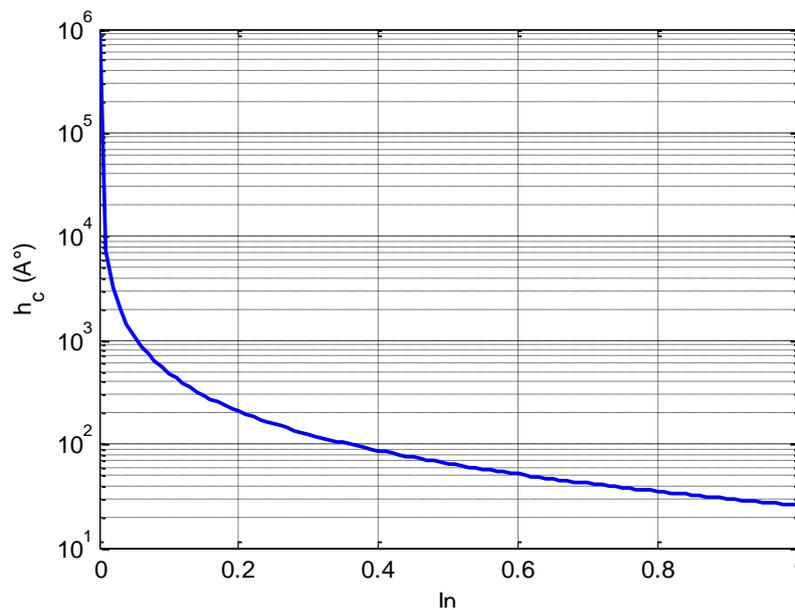


Figure 3.3. Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium.

Pour une concentration d'indium $x=0.3$ l'épaisseur critique vaut $h_c=127.97$ (Å) et en augmentant la concentration de l'indium jusqu'à atteindre $x=0.5$ on a $h_c=65.56$ (Å). On constate alors que l'augmentation de la concentration de l'indium cause une diminution de l'épaisseur critique avec $\Delta h_c=62.41$ (Å).

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 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ contrainte sur un substrat de GaAs. Avec l'incorporation de concentration d'Indium dans l'alliage, l'énergie de la bande interdite (E_g) décroît. Suite à la contrainte compressive de notre structure l'énergie de bande interdite gap trous lourds est toujours inférieure a

l'énergie de la bande interdite gap trous légers ($E_{g_{hh}}$ et $E_{g_{lh}}$) quel que soit les concentrations de l'Indium (In). La figure montre l'influence de concentration d'In. Par exemple, pour $x = 0,3$ la valeur de bande interdite est de 1.01eV , en augmentant x à 0.5 , la bande interdite diminue jusqu'à 0.8 eV , on constate une diminution de l'énergie de la bande interdite avec $\Delta E_g = 0.21\text{ eV}$. Ce qui rend l'effet de la contrainte affecter de manière indésirable sur l'énergie de la bande interdite qui provoque une diminution de l'énergie et rend les bandes de valence avec une forte clarté ($\Delta E_{g_{hh}}$ et $\Delta E_{g_{lh}}$).

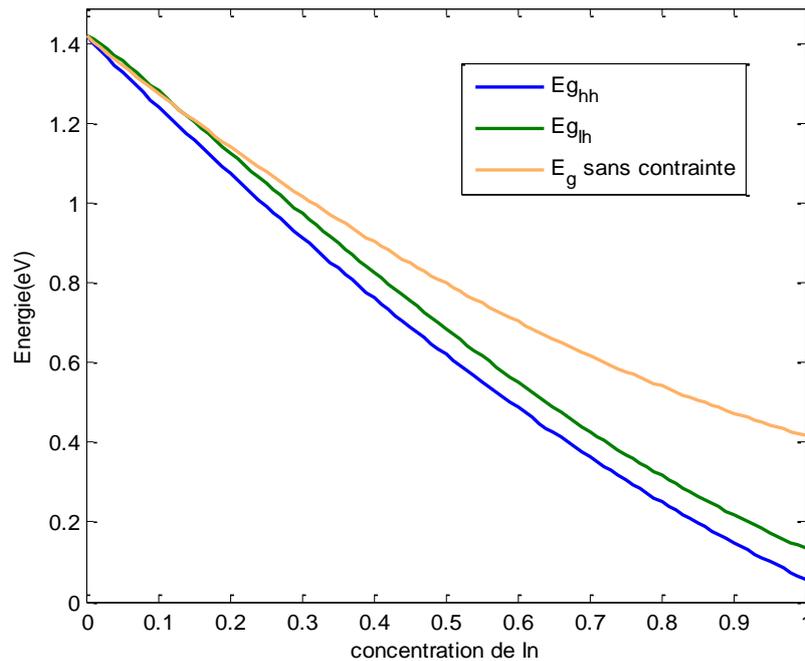


Figure 3.4. Variation de l'énergie de la bande interdite de la structure contrainte et non contrainte en fonction de la concentration de l'indium.

Et la contrainte rend les bandes de valence fortement anisotropes, le Gap des trous lourds ($E_{g_{hh}}$) et au-dessus à 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'indium. On note que L'augmentation de la concentration en indium 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 ($\Delta E_{v_{lh}} < \Delta E_{v_{hh}}$).

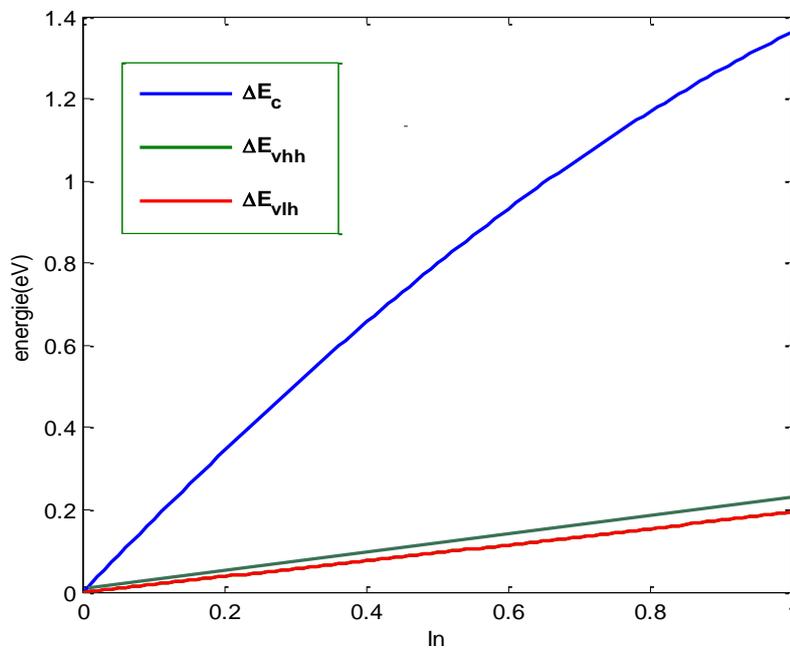


Figure 3.5. La différence de variation d'énergie ($\Delta E_{v_{lh}}$, $\Delta E_{v_{hh}}$, ΔE_c) de la barrière de potentiel dans la bande de conduction et dans la bande de valence en fonction de la concentration de l'indium.

3.3 Énergies de quantifications

3.3.1 Quantification des porteurs dans le puits

Les figures (3.6_(a,b,c,d)) montre 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 InGaAs/GaAs en fonction de l'accroissement largeur L_w . Ces niveaux d'énergie augmentent aussi avec l'incorporation de l'Indium.

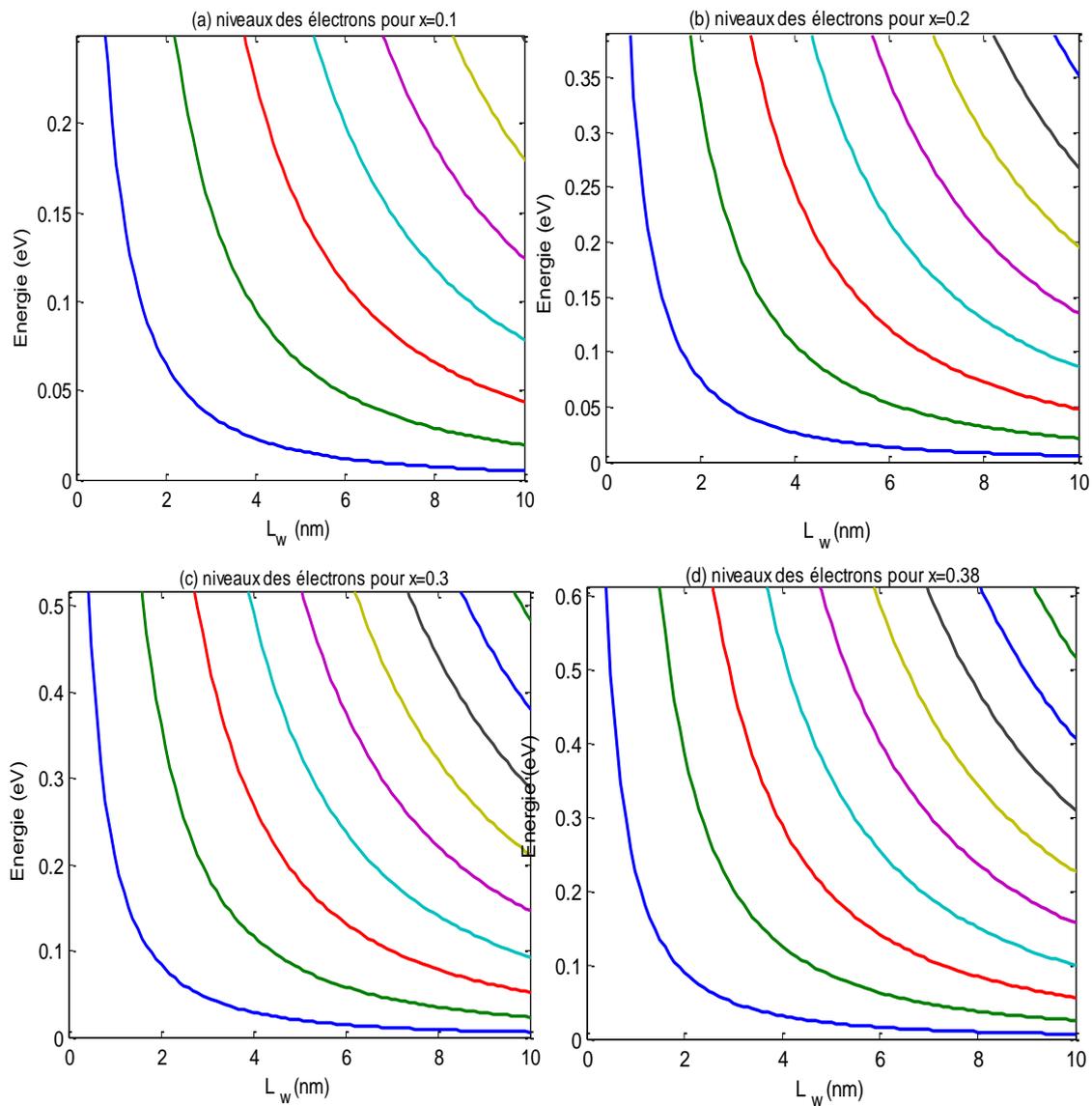


Figure 3.6. (a,b,c,d) Variation des énergies de quantifications des porteurs dans le puits quantique pour différentes concentration d'indium.

3.3.2 Énergies de quantifications des trous lourds

Les figure 3.7 représente la variation des énergies de quantifications des trous lourds dans le puits quantique à base de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, on remarque qu'il y a une diminution du niveau d'énergie avec l'élargissement du puits quantique. Également, l'incorporation de l'Indium dans notre structure induit l'apparition de nouveaux niveaux d'énergie

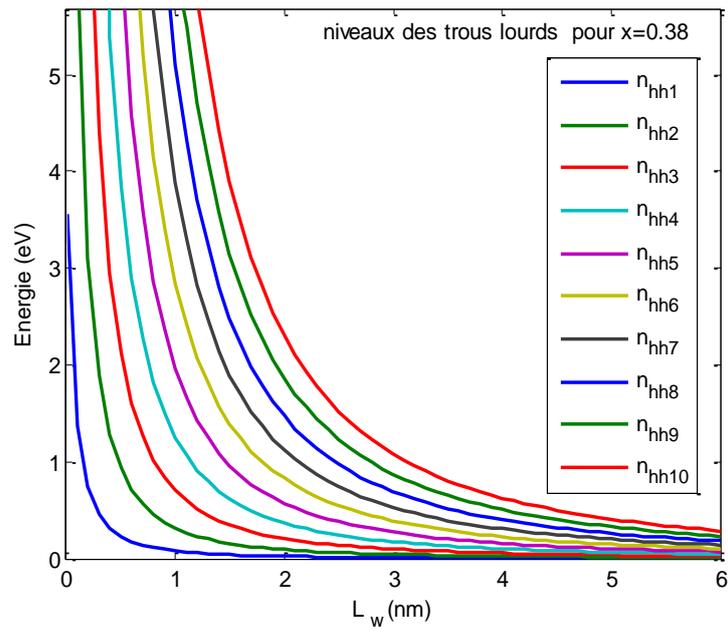


Figure 3.7. La variation des énergies de quantifications des trous lourds en fonction de la largeur du puits L_w pour différentes concentrations d'indium.

3.4 Énergies de transitions

Les figures 3.8(a, b, c, d) 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 InGaAs et rend les bandes de valence anisotropes. Comme le nombre des niveaux d'énergie dans la bande des trous lourds est 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.

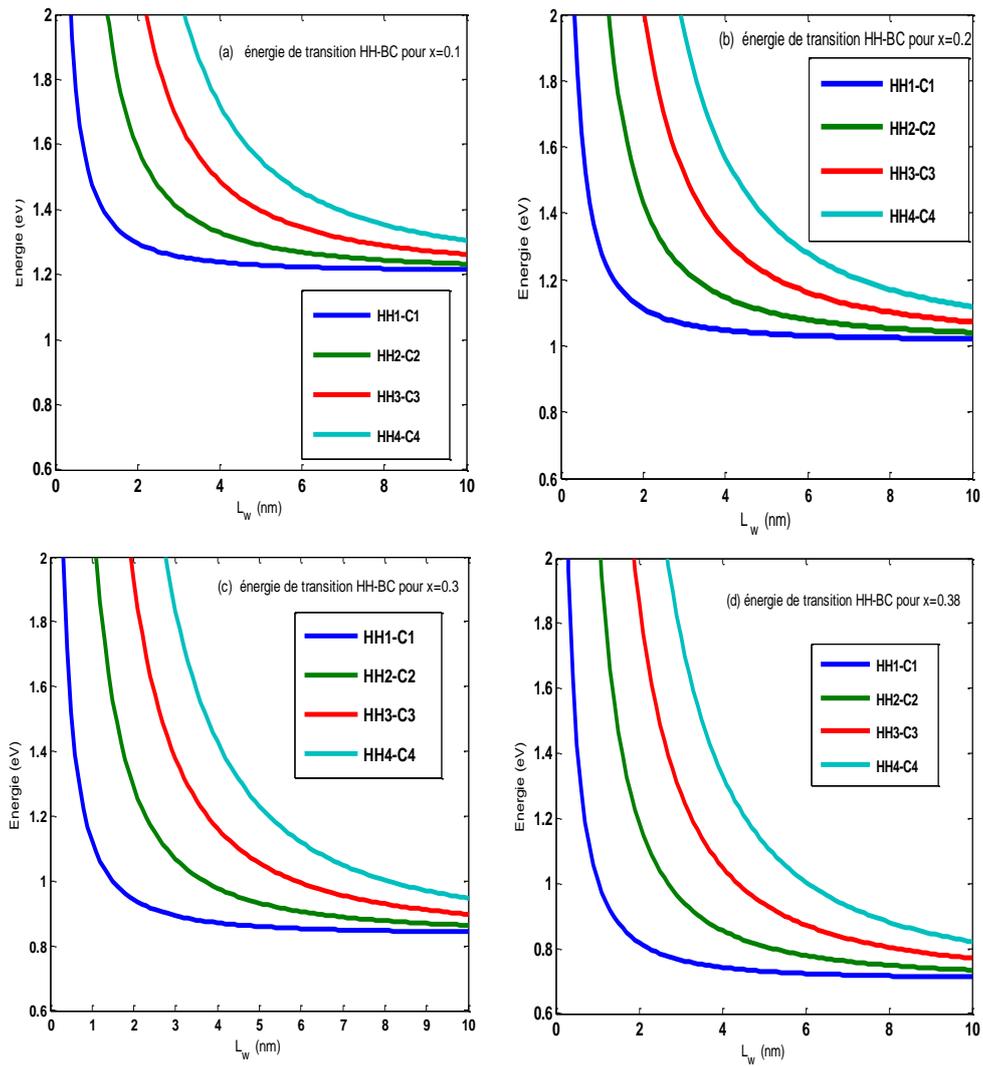


Figure 3.8. (a, b, c, d) Variation des énergies de transition entre la bande de conduction et la bande des trous lourds en fonction de la largeur de puits L_w .

3.5 La longueur d'ondes d'émissions

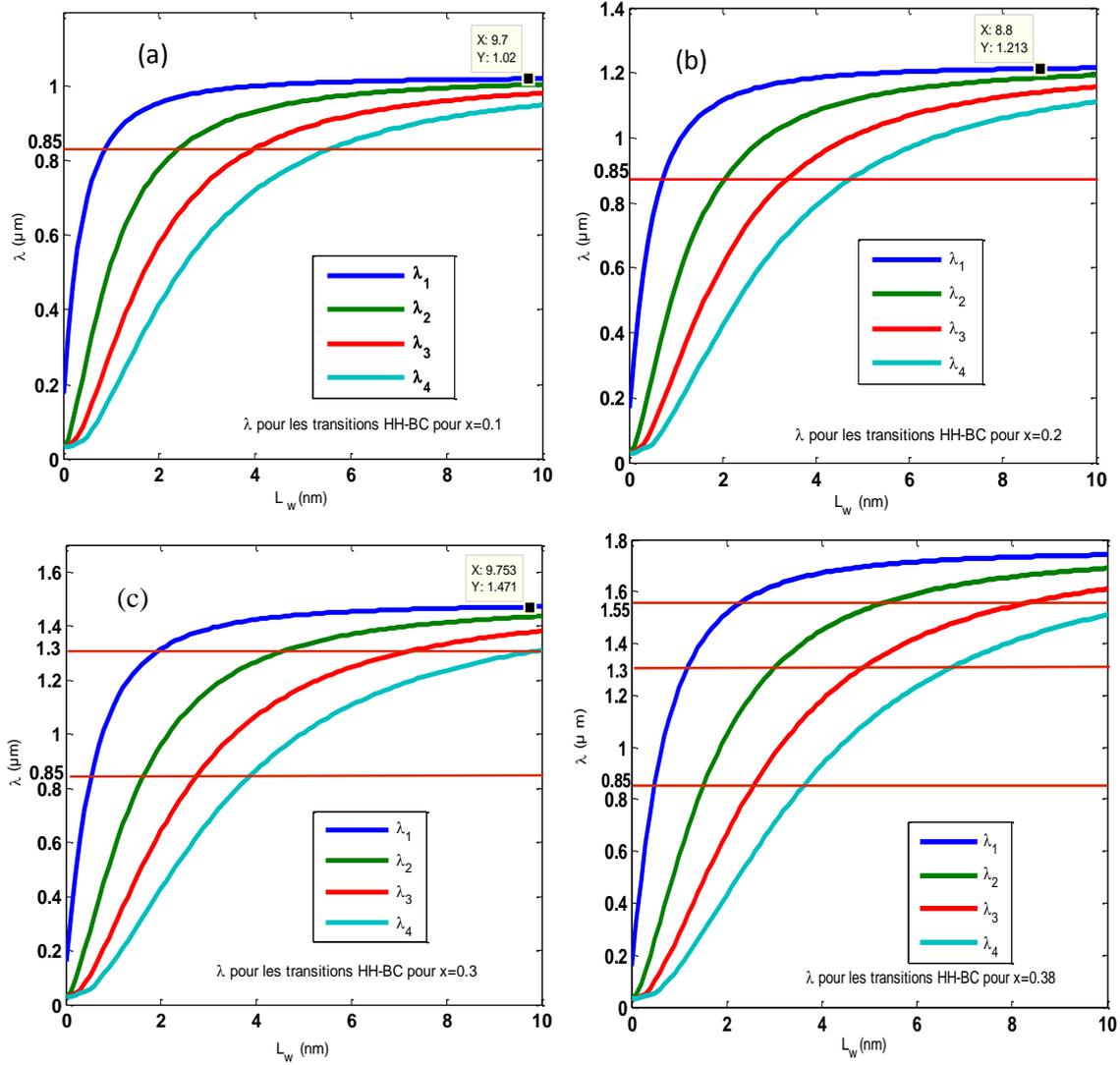


Figure 3.9. (a, b, c, d) Variation des longueurs d'émissions en fonction de la largeur du puits quantique L_w pour différentes concentrations d'indium.

Les figures 3.9 (a,b,c,d) montrent la variation des longueurs d'onde d'émissions relatives aux transitions bande de conduction et bande trous lourds. On remarque que ces longueurs d'onde augmentent d'abord très rapidement entre 0 et 5 nm puis restent pratiquement inchangées entre 5 et 11 nm avec toutes les concentrations d'indium. Nous concluons que la longueur d'onde augmente avec l'élargissement du puits quantique.

3.6 Boite quantique

Les boîtes quantiques semi-conductrices sont des inclusions nanométriques tridimensionnelles d'un matériau de faible gap dans un autre matériau de gap plus élevé. Leurs caractéristiques proviennent principalement du fort confinement tridimensionnel des porteurs de charges dans les boîtes quantiques, qui conduit notamment à l'observation d'une densité d'états électroniques discrète. Les boîtes quantiques sont ainsi souvent considérées comme des « *atomes artificiels* », En anglais appelé « quantum dot » [43].

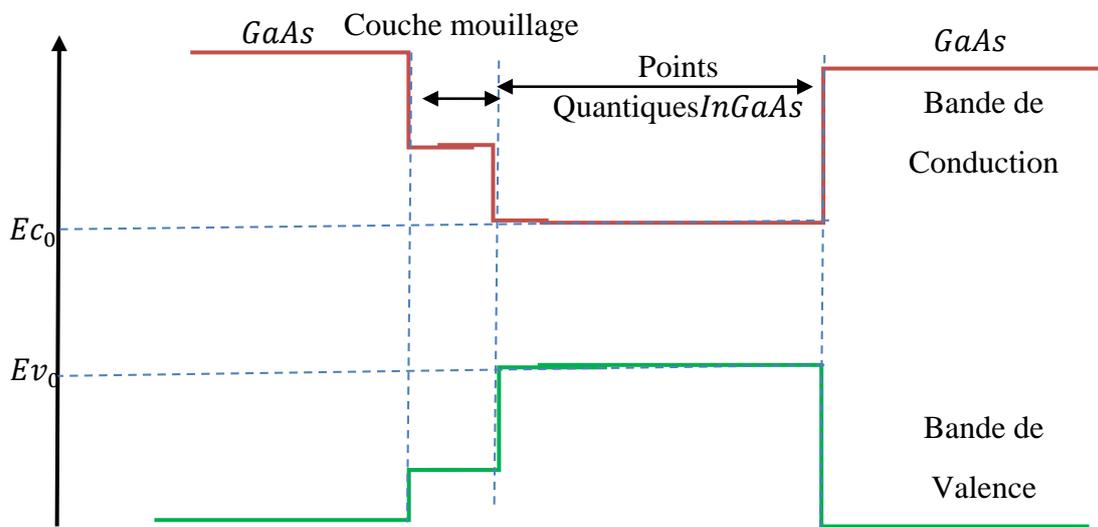


Figure 3.10. Diagramme de bandes de systèmes à points quantiques *InGaAs/GaAs* [44].

La figure 3-10 notez que le mouvement des porteurs, que ce soit les électrons à la Bande de Conduction ou les trous dans la Bande de Valence sont limités aux îles InGaAs, à savoir les points quantiques. Les obstacles potentiels font partie des couches de GaAs. Entre deux barrières, il restaure également le potentiel qui a été créé bien par couche de mouillage, qui est limitée aux propriétaires seulement à l'axe de croissance [44].

Nous allons procéder à donner des résultats obtenus au cours de notre simulation pour le matériau *InGaAs* Avec l'utilisation du logiciel de simulation « *Silvaco* », Nous avons changé la concentration d'indium chaque fois dans notre structure de boîte quantique ternaire avec la variation de largeur de la boîte aussi. On a trouvé la proportion déconcentration

d'indium=0.5, Cette valeur est très efficace pour notre travail qui correspond au résultat Souhaitable,

3.6.1 Structure de bande

Diagramme énergétique est constitué de deux bandes (valence et conduction) séparés par une bande interdite ou gap. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...etc).

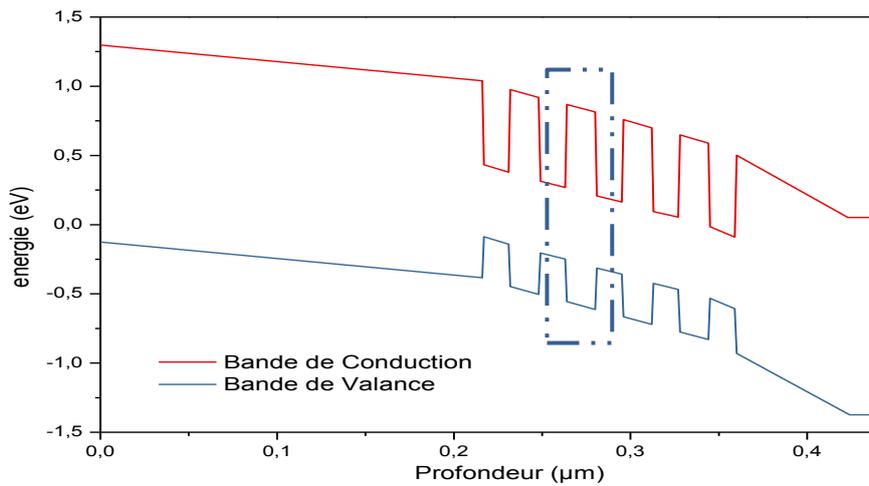


Figure 3.11. Structure de bande du niveau conduction et valence des QD pour une concentration d'indium $x=0.5$.

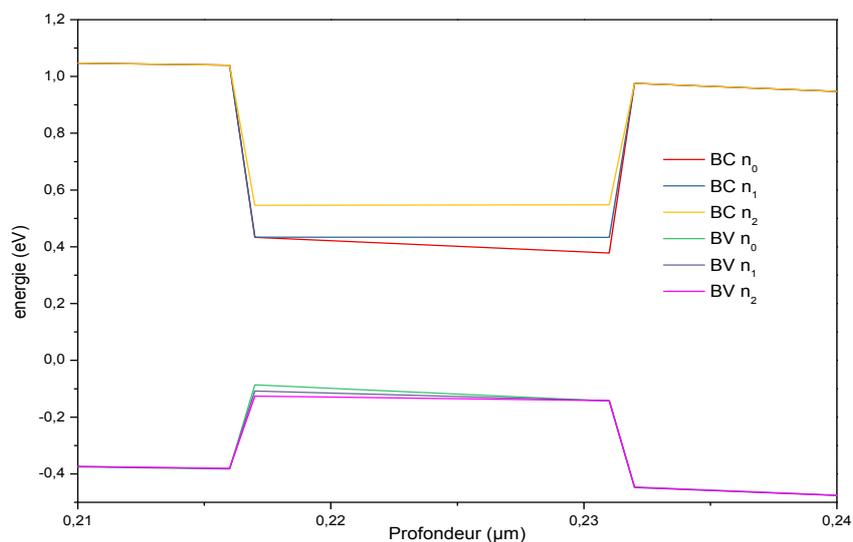


Figure 3.12. Structure de bande pour différents niveaux d'énergies d'une seule boîte quantique pour $x=0.5\%$.

3.6.2 Energie de quantification pour les électrons

Les énergies des sous-bandes sont régulées par ($E_2 > E_1 > E_0$) Cette condition est importante car elle préserve la nature distincte des QD dans le matériau semi-conducteur hôte.

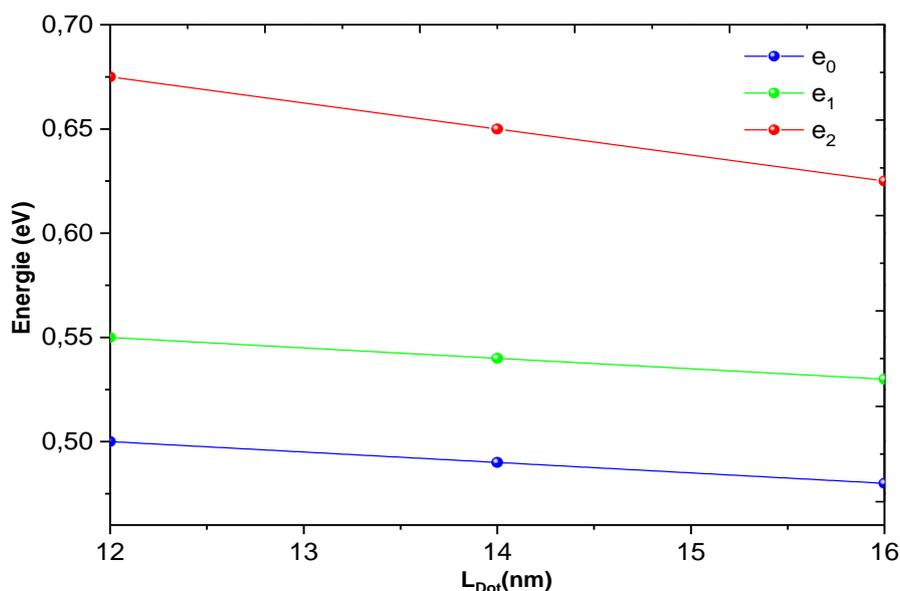


Figure 3.13. Energie de quantification pour les électrons concentration d'indium $x=0.5$.

La figure 3.13 représente l'évolution de l'énergie de confinement des porteurs (électron) en fonction de la largeur de la boîte quantique. Nous remarquons que lorsque la largeur de boîte quantique croît, on a une diminution de l'énergie de confinement des niveaux d'énergie, aussi on constate, l'augmentation de l'espacement entre les niveaux d'énergie.

3.6.3 Energie de quantification pour les trous lourds

La figure (3.14) représente l'évolution de confinement de l'énergie des trous lourds en fonction de la largeur de la boîte quantique. Nous notons que l'évolution de la largeur de la boîte quantique et les niveaux l'énergie de confinement est proportionnellement et croissante, Cependant, nous pouvons voir l'augmentation des distances entre les niveaux d'énergie.

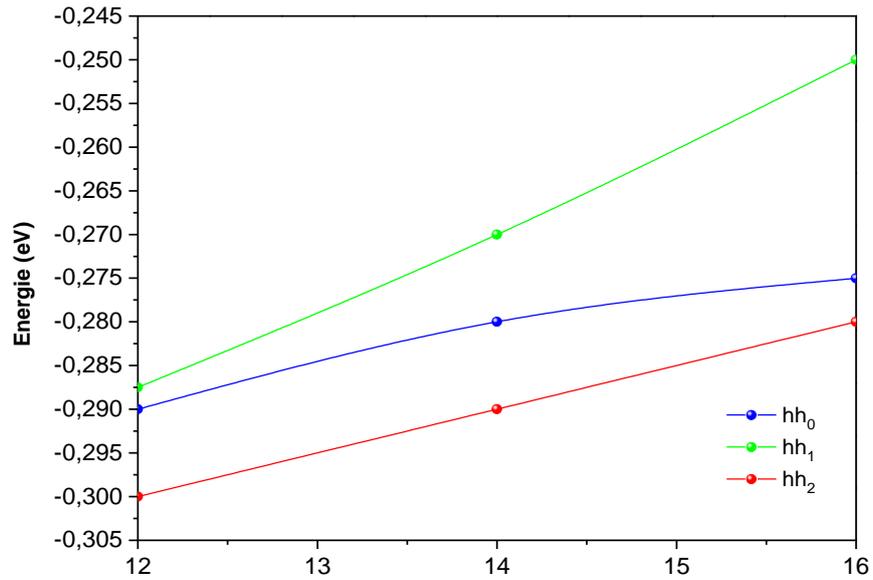


Figure 3.14. Energie de quantification pour les trous lourds à concentration d'indium $x=0.5$.

3.7 Energie de transitions

$$E_{tr} = E_g + E_{ei} + E_{hi} \quad (3.3)$$

E_g : Énergie de gap

E_{ei} : énergies de quantifications des électrons

E_{hhi} : énergies de quantifications des trous [45].

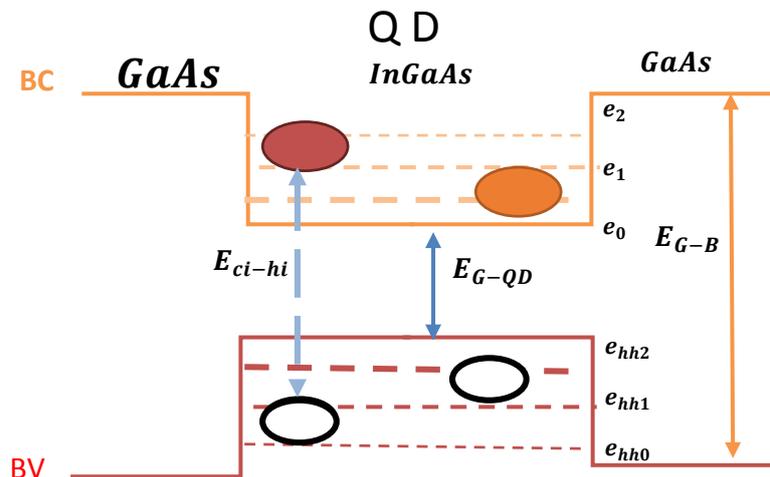


Figure 3.15. Le principe de l'illustration de la structure de bande pour l'auto-organisation des boites quantiques [11].

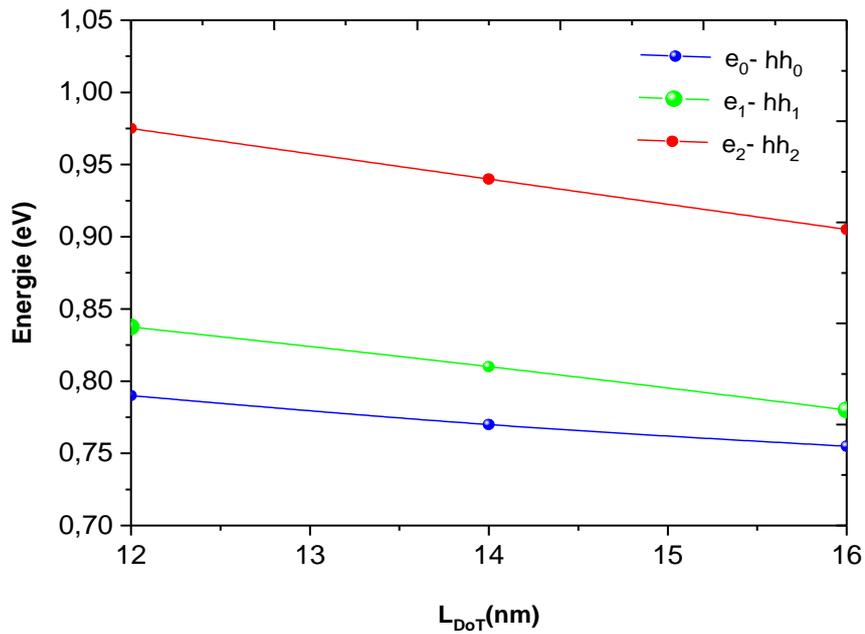


Figure 3.16. Energie de transitions pour différents niveaux concentration d'indium $x=0.5$.

Les figure 3.16 illustres la variation des énergies de transitions E_{tr} entre la bande de conduction et celle des trous lourds dans les boites quantiques à base $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ en fonction de la largeur de la boite pour la concentration d'indium $x= 0.5\%$. On remarque que l'augmentation de la largeur du boite L_{dot} cause la diminution de l'énergie de transition.

3.7.1 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].

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E_g + E_{c_{ni}} + E_{v_{hhi}}} \quad (3.4)$$

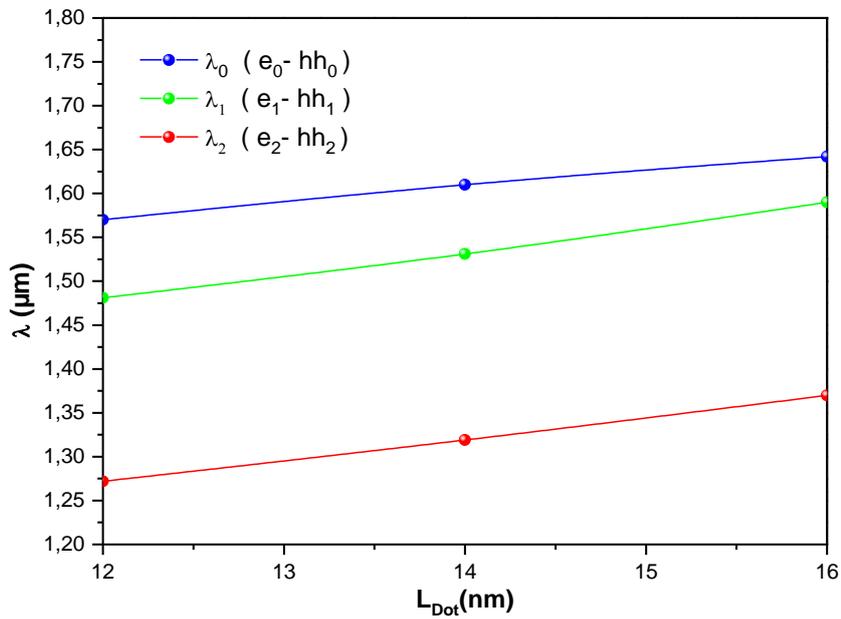


Figure 3.17. Longueur d'onde d'émission pour les trois transitions pour chaque niveau à concentration d'indium $x=0.5$.

Cette figure représente l'évolution de la longueur d'onde en fonction de la largeur de la boîte. Donc on remarque ce résultat indique l'effet de la largeur de la boîte sur les longueurs d'onde, on constate que la longueur d'onde a varié entre 1.5 μm jusque 1.65 μm au niveau ($e_0 - hh_0$), généralement utilisé ce niveau dans les travaux sur les lasers dans boîte quantique.

Cette structure permet de réaliser le laser à boîte quantique pour la fibre optique en silice SiO₂. Par contre pour les différents autres niveaux la longueur diminue vers 1.3 μm .

3.8 Conclusion

L'expansion des puits réduit l'énergie de transition et $\lambda_e = 1.24/E_{tr}$ donc plus l'énergie de transition est petite, plus la longueur d'onde de l'émission est grande. Nous atteignons 1.55 μm avec $I_n = 38\%$ et 30% . Et pour les boîtes, on peut dire avec la transition de niveau (e_1-hh_1) on peut atteindre la longueur d'onde d'émission 1.55 μm et le 1.3 μm avec la transition (e_2-hh_2) sous une concentration $I_n = 50\%$.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est basé sur l'étude physique de Nano-composants (puits et boites quantiques) sur la structure InGaAs/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 (InGaAs) sur un le substrat de GaAs étudions l'effet de contrainte en compression ,qui faite sur le logiciel MATLAB et Silvaco .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 l'indium 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 InGaAs / GaAs à base d'une boite et puits quantique en fonction de la concentration d'indium résulte une longueur d'onde d'émission optimale pour $x=30\%$ et $x= 38\%$ pour le cas puits et $x=50\%$ pour le boite

Bibliographie

- [1] Andrey Pankratov. 'Propriétés des boîtes 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 deSherbrooke, Québec, Canada, 26 Novembre 2014.
- [3] KHELIFI ZAHRA & MOUAICI SARAH 'Etude et simulation des boîtes quantiques à base de InAs/GaAs', Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2013-2014.
- [4] Y. Kayanuma,' Population Inversion in Optical Adiabatic Rapid Passage with Phase Relaxation 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," Discrete excitonic transitions in quantum-sized CdS particles "Chemical Physics, Lett. Volume 172, (1990).
- [7] A. Eychmuller, L. Katsikas, H. Weller, 'Langmuir "Photochemistry of Semiconductor Colloids. 35. Size Separation of Colloidal CdS by Gel Electrophoresis" 'Berlin, Federal Republic of Germany (1989).
- [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 Constantine2014.
- [10] BENATMANE Khaled,'Etude de lasers à base de semi-conducteurs III-V ', thésE de Magister, Université Elhadj Lakhdar Batna ;2011.

- [11] A .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, « théorie, propriétés électroniques des nano-objets » 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' Toulouse, INSA Nanophysique, 2010.
- [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] Aouati Redha, '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-0XXX 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] F. Faure « Notes de cours sur la Mécanique quantique Université Joseph Fourier, Grenoble » thés de Master, (2015).
- [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 YasuharuSuematsu.,' Gain and the Threshold of Three-Dimensional Quantum-Box Lasers 'IEEE Journal of Quantum Electronics. VOL. QE-22. 1986.