

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 التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Télécommunications
Spécialité Réseaux Et Télécommunications

Présenté par

HAOULI Alaeddine Rafik

&

KEBOUCHI Melissa Amaria

ETUDE ET SIMULATION D'UNE STRUCTURE A PUITS QUANTIQUE A BASE DE « InGaAsSb/GaAs » & « InGaAsSb/AlSb » POUR LE LASER

Proposé par : Mr. AISSAT ABDELKADER & Mr. BESTAM RACHID

Année Universitaire 2018-2019

Remerciements

On tient en premier lieu à remercier le bon Dieu pour la bénédiction de la science et de la raison, pour le courage, la patience et la force durant tous notre parcours d'étude.

En second lieu, on voudrait remercier Mr. Aissat Abdelkader, professeur à l'université de Saad Dahlab Blida. En tant que promoteur de mémoire de fin d'étude, pour l'aide qu'il nous a fournie et son orientation durant nos recherches.

En troisième lieu, on voudrait adresser nos sincères remerciements à Mr. Bestam Rachid, chef du centre de télédiffusion d'Algérie. En tant que Co-promoteur et enseignant de qualité, pour sa patience, son soutien, son encouragement sa disponibilité, On est très reconnaissant pour le précieux temps qu'il nous a consacré malgré ces grandes responsabilités pour accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, on remercie notre très chère famille, pour leur amour, confiance et leur soutien à la fois moral et économique, ainsi qu'à des personnes très chers à nos yeux pour leurs patiences et à leur s'insère amour.

ملخص:

يعتمد هذا البحث على استخدام مواد III-V لتحقيق ليزر بئر الكم. إنها بشكل خاص دراسة إلكترونية ضوئية. أولاً، سوف نحدد الخواص الفيزيائية والبصرية للمواد (الإنديوم، الغاليوم، الزرنيخ الأنتيمون) لصنع سبيكة رباعية من بنية البئر الكمومية. ثانياً، سنتم دراسة تأثير دمج تركيز منخفض من الزرنيخ في سبيكة InGaAsSb الرباعية. أخيراً، سوف ندرك تركيبنا للانبعاثات للوصول إلى الطول الموجي للانبعاثات المطلوب للاستغلال في الألياف الضوئية 1.55 ميكرون.

كلمات المفاتيح : الليزر ; آبار كمومية ; ضوئية إلكترونية ; GaAs ; AlSb ; InGaAsSb

Résumé :

Cette recherche se base sur l'utilisation de matériaux III-V pour la réalisation d'un laser à base de puits quantique. Il s'agit plus particulièrement d'une étude optoélectronique.

En premier lieu on va définir les propriétés physique et optique des matériaux (Indium, Gallium, Arsenic et Antimoine) pour en faire un alliage quaternaire d'une structure a puits quantique. En deuxième lieu on va étudier l'effet de l'incorporation d'une faible concentration d'Arsenic dans l'alliage quaternaire InGaAsSb. En dernier on va réaliser notre structure d'émission pour atteindre la longueur d'onde d'émission souhaité exploitable dans les fibres optiques 1.55 μm .

Mots clés : Laser ; puits quantiques ; optoélectronique ; InGaAsSb ; GaAs ; AlSb

Abstract :

This research is based on the use of III-V materials for the realization of a quantum well laser; It is more particularly an optoelectronic study.

First, we will define the physical and optical properties of materials (Indium, Gallium, Arsenic and Antimony) to make a quaternary alloy InGaAsSb a quantum well structure. Second, the effect of incorporating a low concentration of Arsenic into the InGaAsSb quaternary alloy will be studied. Finally, we will realize our emission structure to reach the desired emission wavelength exploitable in optical fibres 1.55 μm .

Keywords : Laser ; quantum well ; optoelectronic ; InGaAsSb ; GaAs ; AlSb

Listes des acronymes et abréviations

Ga Gallium

Sb Antimoine

As Arsenic

In Indium

Al Aluminum

Laser Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

SC semi-conducteur

ZB zinc blende

WZ wurtzite

CFC sous-réseaux cubique face centre

BC Bande de conduction

BV Bande de valence

LH Trous légers

LL Trous lourd

MBE Molecular beam Epitaxy

P.Q Puits quantique

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 GENERALITE SUR LES SEMI-CONDUCTEURS III-V	4
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 LES ELEMENTS FONDAMENTAUX DU LASER	4
1.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN LASER	5
1.4 LES DIFFERENTS TYPES DE LASER.....	6
1.4.1 Laser à gaz	6
1.4.2 Laser à colorant	6
1.4.3 Laser à solide	7
1.5 L'INTERET DES SEMI-CONDUCTEURS III-V	8
1.6 LES SEMI-CONDUCTEURS III-V.....	9
1.6.1 Les principaux types d'alliages III-V	9
a Les alliages binaires	9
b Les alliages ternaires	10
c Les alliages quaternaires	10
1.6.2 Propriétés physiques des semi- conducteurs III-V	11
a La structure Zinc-blende et Würtzite	11
b Structure de bande	12
1.7 LES RECOMBINAISONS RADIATIVES ET NON RADIATIVE	13
1.8 CONCLUSION	14
CHAPITRE 2 PUIS QUANTIQUE À BASE DE MATERIAUX III-V	16
2.1 INTRODUCTION	16
2.2 ÉPITAXIE PAR JET MOLECULAIRE MBE.....	16
2.3 PUIQS QUANTIQUE	17
2.3.1 Les types de puits quantique.....	19
a Puits quantique type I	19
b Puits quantique type II	20
c Puits quantique de type III.....	20

2.4	NOTION SUR CONTRAINTE	20
2.4.1	La contrainte.....	20
2.4.2	Épaisseur critique	22
2.4.3	L'effet de la contrainte sur les bandes d'énergies	23
2.4.4	Niveau de confinement dans un puits quantique	26
2.4.5	Energie de transition	28
2.5	GAIN OPTIQUE	29
2.6	CONCLUSION	31
CHAPITRE 3	SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	32
3.1	INTRODUCTION	32
3.2	PARAMETRE DE MAILLE	32
3.3	DESACCORD PARAMETRIQUE.....	33
3.4	ÉPAISSEUR CRITIQUE	34
3.5	ÉCLATEMENT DE LA BANDE DE VALENCE	35
3.6	ENERGIES DANS BANDES INTERDITES.....	36
3.7	BARRIERES DE POTENTIEL	37
3.8	NIVEAUX D'ELECTRONS DANS LES DEUX PUIITS.....	38
3.8.1	Puits quantique InGaAsSb/AlSb.....	38
3.8.2	Puits quantique InGaAsSb/GaAs	40
3.9	NIVEAUX DES TROUS DANS LES DEUX PUIITS	42
3.9.1	Puits quantique InGaAsSb/AlSb.....	42
3.9.2	Puits quantique InGaAsSb/GaAs	44
3.10	ÉNERGIE DE TRANSITION	46
3.10.1	Variation de x pour y fixe.....	46
3.10.2	Variation de y pour x fixe.....	48
3.11	LONGUEUR D'ONDE D'EMISSION.....	50
3.11.1	Variation de x pour y fixe.....	50
3.11.2	Variation de y pour x fixe.....	51
3.12	GAIN OPTIQUE	53
3.12.1	Gain avec la variation de x.....	53
3.12.2	Gain avec la variation de y.....	54

3.12.3 Gain en fonction de l'injection	54
3.13 CONCLUSION	56
CONCLUSION GENERALE.....	59
BIBLIOGRAPHIE	61

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Domaine d'application du LASER	2
Figure 1.2. Laser à cavité résonante	2
Figure 1.3. Mailles cristallographiques de Zinc Blende (GaAs)	11
Figure 1.4. (A) Structure de Würtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 (B) Représentation 3D de la structure Würtzite	12
Figure 1.5. Structure de bande d'énergie du : gap indirect et gap direct [29]	13

Chapitre 1

Figure 2.1. Représentation de la méthode d'épithaxie par jets moléculaires MBE	17
Figure 2.2. Diagramme de puits quantiques en 3D de InGaAsSb/GaAs (AlSb)	18
Figure 2.3. Présentation d'un puits quantique	19
Figure 2.4. P.Q type I	19
Figure 2.5. P.Q type II	20
Figure 2.6. P.Q type III	20
Figure 2.7. (a) Accord de maille ; (b) Compression ; (c) Tension	21
Figure 2.8. Schéma montrant une couche sans dislocation (1) ; Deux schémas montrant la dislocation de la couche (2)	22
Figure 2.9. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap directe (a) non contraint ; (b) en compression et (c) en tension	24
Figure 2.10. Augmentation des niveaux de confinement en fonction du largeur de puits quantique	27
Figure 2.11. Energie de transition dans le puits quantique [19]	29

Chapitre 3

Figure 3.1. Variation du paramètre de maille de l'alliage InGaAsSb en fonction de concentration de l'indium et l'antimoine	33
Figure 3.2. Variation de la contrainte en fonction des concentrations In et Sb dans l'alliage InGaAsSb sur (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb	34

Figure 3.3. Variation de l'épaisseur critique de la couche InGaAsSb en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb	35
Figure 3.4. Éclatement de la bande de valence en fonction de la concentration de l'antimoine	36
Figure 3.5. Variation du gap de la couche InGaAsSb en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb	36
Figure 3.6. Variation barrières de potentiel en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb	38
Figure 3.7.a Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y= 0.06$	39
Figure 3.7.b Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x= 0.2$	40
Figure 3.8.a Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y= 0.06$	41
Figure 3.8.b. Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x= 0.20$	41
Figure 3.9.a Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y= 0.06$	43
Figure 3.9.b Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x= 0.20$	44
Figure 3.10.a Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y= 0.06$	45
Figure 3.10.b Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x= 0.20$	46
Figure 3.11. Variation de l'énergie de transition en fonction de la largeur de puits pour $y= 0.06$ avec (a) $x=0.1$, (b) $x=0.2$ et (c) $x=0.3$	47
Figure 3.12. Variation de l'énergie de transition en fonction de la largeur de puits pour $x= 0.20$ avec (a) $y=0.08$, (b) $y=0.10$ et (c) $y=0.12$	49
Figure 3.13.a Variation de la longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur de puits quantique pour $y= 0.06$ avec (a) $x=0.10$, (b) $x=0.20$ et (c) $x=0.30$	51

Figure 3.13.b Variation de la longueur d'onde d'émission en fonction de la largeur de puits quantique pour $x= 0.20$ avec (a) $x=0.08$, (b) $x=0.10$ et (c) $x=0.12$	52
Figure 3.14. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations d'indium avec $y = 0.08$	53
Figure 3.15. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations d'antimoine avec $x = 0.20$	54
Figure 3.16. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs Injection N avec $(x, y) = (0.2, 0.08)$ et $L_z=10 \mu\text{m}$	55
Figure 3.17. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs largeurs de puits avec $N= 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $(x, y) = (0.2, 0.08)$ et $L_z=10 \mu\text{m}$	56

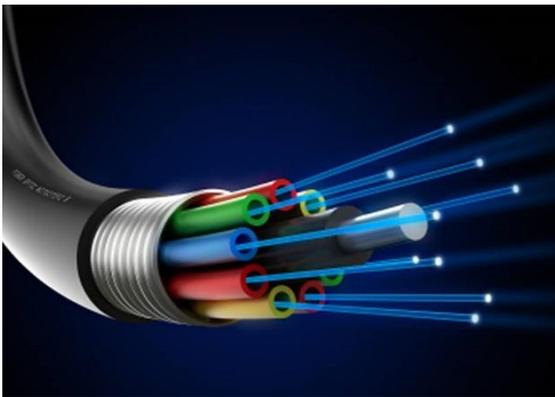
Liste des tableaux

Tableau 1.1. Extrait des matériaux III-V du tableau périodique	9
Tableau 2.1. Les Paramètres de maille et coefficients élastiques des binaires	23

Introduction générale

L'évolution des technologies de l'information et de la télécommunication, visent toujours d'augmenter la capacité des supports de transmission dans le but d'avoir des hauts débits. Cela nécessite un développement des systèmes de télécommunication par basculement vers tout optique, ou on sera bientôt capable de transmettre des flux de données qui peuvent atteindre des débits très élevés (de l'ordre de Tbps). Actuellement, les télécommunications optiques ont acquis une importance considérable dans les réseaux de communication avec l'adoption des lasers de nouvelle génération autant qu'une source de transmission optique [1].

Les lasers occupent une large place dans le domaine optiques, on peut les trouvés dans différentes applications industrielles comme la médecine, la communication par fibre optique, l'aéronautique dans les radars et dans les engins militaires etc... .



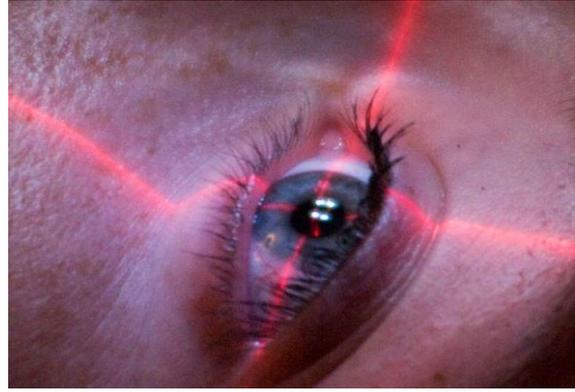
Fibre Optique



Télescope « ELT »



Engin militaire



Chirurgie ophtalmique

Figure 1.1. Domaine d'application du LASER [2-5]

Le laser amplifie la lumière par émission stimulée de radiations et pour réaliser cela, il nous faut une source de pompage, un milieu amplificateur active et une cavité résonante.

Cependant, il y a une diversité de Lasers et leurs classifications se base essentiellement sur le milieu amplificateur, ce dernier peut être de nature gazeuse, liquide ou solide. Ces différents types de milieu conditionnent la longueur d'onde d'émission (infra rouge, visible ou ultraviolet) tous dépendent du domaine d'application. L'énergie est apportée au milieu actif par la source de pompage du laser.

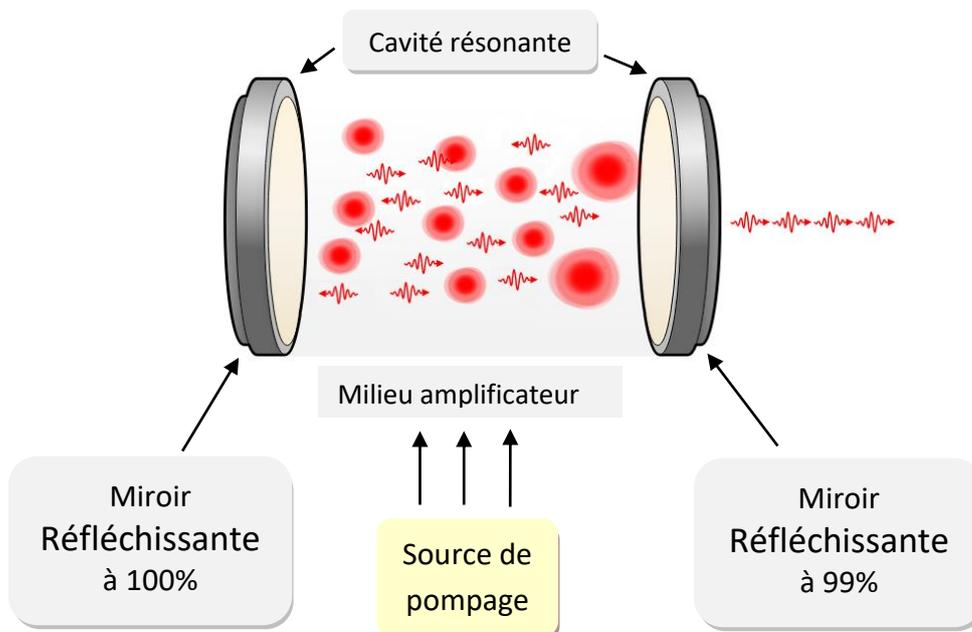


Figure 1.2. Laser à cavité résonante [6].

Parmi les différents types de laser, les lasers à base de semi-conducteur occupent une grande place dans la recherche grâce à leurs propriétés physiques et électriques qui donnent la possibilité de couvrir une large gamme de longueur d'onde. Aussi avec le développement des procédés de croissance il est possible actuellement de réaliser des hétéro jonctions à effet quantique qui fournissent des longueurs d'ondes exploitables dans les télécommunications [7].

L'objet de cette thèse est axé sur la modélisation, simulation et comparaison de deux structures à puits quantique InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb. Dans le but d'optimiser les concentrations de l'indium et l'antimoine dans la couche active, afin d'avoir des longueurs d'onde exploitable dans la communication par fibre optique.

Cette thèse est organisée en trois chapitres :

En premier chapitre, nous présenterons les éléments fondamentaux du laser et son principe de fonctionnement, les différents types de laser et l'intérêts du laser à semi-conducteur avec une comparaison entre les matériaux III-V et le semi-conducteur conventionnel, en suite nous définissons la méthode de calcul de paramètres des différents alliages III-V ainsi que leurs propriétés physiques, électrique et optique.

En second chapitre, la définition de la méthode utilisée pour la réalisation d'une structure a puits quantique, description et schématisation les différents types de puits quantique, les méthodes de calcul de l'épaisseur critique, et l'énergie du gap, gain optique.

En troisième chapitre, la présentation et l'interprétation des résultats obtenus par simulation des deux structures à puits quantique InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb pour l'intérêt de contrôler le désaccord du paramètre de maille entre les différentes couches et par voie de conséquence, la contrainte qui en résulte, tout en ajustant ces propriétés on aura la bonne longueur d'onde.

Chapitre 1 Généralité sur les semi-conducteurs III-V

1.1 Introduction

Le développement ininterrompu de l'industrie, des techniques de communication et des moyennes de transport nous ont offert une meilleure qualité de vie. Ce confort est assuré par des équipements qui basent sur des composants électroniques et électromagnétiques et pour garantir la continuité de cette croissance technologique, la recherche vise d'améliorer et de créer de nouveaux composants de plus grande performance. Parmi ces composants, le laser qui rentre dans plusieurs applications comme la détection, la médecine et communication optique rencontre un très grand essor dans ces dernières années [8].

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les éléments fondamentaux, le principe de fonctionnement et les différents types de lasers qui sont classés par rapport à la nature du son milieu amplificateur. Dans la deuxième partie, nous décrivons les propriétés optiques et électriques des matériaux semi-conducteurs III-V qui rentrent dans la fabrication des lasers ainsi que l'origine des émissions produites au sein de ces matériaux dans le but de comprendre la cause de la convergence de la recherche vers les matériaux III-V.

1.2 Les éléments fondamentaux du laser

On peut décomposer un laser en deux parties :

- **Un milieu amplificateur** : il est de différents types (gaz, solide, liquide et semi-conducteur). 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 amplificateur est inséré dans un résonateur optique (ou

cavité) dont la fonction est de produire un rayonnement lumineux aux propriétés très particulières.

- **Le système de pompage** : un système d'excitation du milieu amplificateur, il permet de créer les conditions d'une amplification lumineuse en apportant l'énergie nécessaire au milieu. Il peut être de différente nature : pompage optique (le soleil, lampes flash, diodes laser ou autres lasers ...), électrique (décharges dans des tubes de gaz, courant électrique dans des semi-conducteurs ...) ou même chimique [9].

1.3 Principe de fonctionnement d'un laser

Le laser, est un composant qui émet et amplifie la lumière a des longueurs d'onde particulières après stimulation des atomes ou des molécules, produit ainsi un faisceau de rayonnement très étroit. L'émission couvre généralement une plage extrêmement limitée de longueurs d'onde dans le visible, l'infrarouge ou l'ultraviolet [10].

Le faisceau d'onde est confiné à l'intérieur de la cavité via des miroirs réfléchissants qui assure un photon circulation dans le but d'augmenter leur parcours dans le milieu amplificateur pour obtenir des niveaux d'amplification importants. La cavité joue un rôle de filtre seule l'onde parfaitement perpendiculaire à son l'axe pourra se propager et certaines fréquences seront privilégiées (fréquences de résonance de la cavité). Ainsi que la cavité donne au rayonnement laser ses propriétés si particulières (directivité, finesse spectrale) [11].

Au bout de plusieurs dizaines de milliers d'allers et retours, la quantité de photons générée dans l'axe de la cavité par émission stimulée devient égale à celle qui est perdue au niveau du miroir de sortie et le laser rentre dans un état stationnaire. Après miroir de sortie le laser émet en continu un faisceau de rayonnement majoritairement issu de l'émission stimulée filtré par la cavité.

1.4 Les différents types de laser

On générale les lasers sont classés selon la nature du milieu actif (gaz, solide, liquide et semi-conducteur) et leurs impulsions (lasers continus / lasers picosecondes / lasers femto secondes).

1.4.1 Laser à gaz

Dans un laser à gaz, le milieu actif où les phonons sont générés est représenté par un gaz confiné dans un tube en verre ou en quartz. La source de pompage est souvent électrique, les espèces gazeuses sont portées à l'état excité de façon directe par collision avec des électrons ou indirecte par collision avec d'autres gaz qui sont eux-mêmes excités électriquement [11].

Les lasers à gaz, donnent la possibilité de couvrir la quasi-totalité du spectre optique, depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge lointain mais avec des raies très fines et des faibles rendements. Seuls les lasers à base de CO₂ qui puissent fournir des rendements entre 15 et 20% avec de nombreuses raies autour de 9.6 et 10.6 μm , ce qui a rendu leurs utilisations dans l'industrie possible comme la gravure, la découpe et le traitement des matériaux. Souvent les lasers à gaz sont encombrants car ils nécessitant un système de refroidissement par eau pour garder le tube a la température fonctionnelle puisque la quasi-totalité de l'énergie apportée par le pompage se transforme en chaleur. La tendance actuelle est de remplacer ce type de laser par des lasers à solides [12].

1.4.2 Laser à colorant

Les lasers à colorant utilisent des molécules organiques émettent dans le visible d'où leur nom de colorant. Ces molécules sont diluées dans un solvant comme l'éthylène glycol ou le méthanol. Le pompage de ce type de laser est optique soit par des lampes ou par d'autres lasers à base de solide ou gaz, ce qui offre la possibilité d'avoir des émissions continu et discontinu (selon le mode de pompage). Les lasers à colorant sont les seuls lasers qui couvrent entièrement le spectre visible.

Malgré ces propriétés intéressantes, les lasers à colorant sont rarement utilisés car leurs mises en œuvre est lourde à cause du pompage optique qui génère de la chaleur à la surface et à la profondeur du colorant, ce qui risque de détruire les molécules

organiques, pour cela le colorant est mis en mouvement dans la zone de pompage. De plus, le mélange colorant solvant se dégrade dans le temps et doit d'être changé régulièrement afin de maintenir le rendement et la lumière émis par ce laser [13].

1.4.3 Laser à solide

Dans les lasers à solides, on distingue les lasers à base de semi-conducteur (ou diode laser) pompés électriquement et les lasers à base des solides a matrice cristalline ou vitreuse pompés optiquement.

Les lasers à base de semi-conducteur :

Les lasers à semi-conducteur utilisent les recombinaisons entre les paires électron-trou existant dans le semi-conducteur pour émettre de la lumière sous forme d'émission stimulée. Le pompage se fait électriquement à l'aide d'un courant qui enrichit le milieu générateur en porteurs supplémentaires pour augmenter le taux de recombinaison. Souvent, ce type de laser ne dispose pas de miroirs de cavité car le fait de cliver le semi-conducteur de fort indice optique, permet d'obtenir un coefficient de réflexion suffisant pour déclencher l'effet laser [14].

Ces lasers, sont peu coûteux, très compacts avec des zones actives de l'ordre de micrométrique, voire moins et un ensemble du dispositif à une taille millimétrique, aussi selon les matériaux choisis (GaN, GaAlInP, AlGaAs, ...), les longueurs d'onde peuvent couvrir du proche UV à l'infrarouge proche avec une puissance qui peut atteindre plusieurs kilowatts [15].

Du fait de ces avantages, ils sont devenus les lasers les plus connus, elles sont intégrées dans de nombreux domaines tels que les pointeurs laser, les lecteurs optique, l'industrie, la communication optique et la détection ... etc. [10,15].

Lasers à matrice cristalline :

Ce type de lasers, utilisent des matrices non conductrices du courant et ne peuvent donc pas être pompés électriquement. Ils sont pompés optiquement par des diodes lasers ou par des lampes à arc (flash). Les matrices sont dopées avec des ions (comme Nd³⁺, Yb³⁺, Er³⁺, Ti³⁺...) duquel on utilise les transitions pour réaliser l'effet laser. Les lasers à matrice cristalline, émettent en général dans le rouge et l'infrarouge proche et suivant l'ion et la matrice utilisés, les bandes d'émission peuvent être étroites ou

larges. On peut noter la longueur d'onde du Nd³⁺ : YAG (Y₃Al₅O₁₂) qui est un grenat d'aluminium et d'yttrium émettre principalement à 1064 nm et saphir dopé au titane (Ti³⁺ : Al₂O₃), qui émettre entre 700 nm et 1100 nm [16].

Les lasers à matrice cristalline se différencient entre eux par la géométrie du milieu amplificateur : on trouve des milieux massifs (en général des cristaux) de dimensions millimétriques et des fibres optiques dont la longueur peut atteindre quelques mètres. Les lasers pompés par diode, et en particulier les lasers à fibre, sont extrêmement robustes et possèdent des durées de vie supérieures à 10 000 heures. Ils sont très appréciés pour les applications industrielles comme le marquage des métaux par recuit, les gravures sur métal et les marquages riches en contrastes des plastiques [16].

1.5 L'intérêt des Semi-conducteurs III-V

Les semi-conducteurs III-V sont rapidement apparus comme les matériaux de choix pour des applications spécialisées. Notamment, GaAs et InP se sont distingués par leur grande mobilité électronique qui permet d'obtenir des dispositifs à haute rapidité de commutation en électronique, et aussi leur bande interdite directe qui favorisent les transitions optiques. Ces propriétés, leurs permettent d'être des matériaux prometteurs surtout dans le domaine des télécommunications tels que les lasers.

Actuellement, en électronique et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables par rapport au semi-conducteur conventionnel (silicium) car les propriétés du silicium sont insuffisantes, comme la mobilité des porteurs qui est relativement faible et la transition électronique indirectes qui nécessite un déplacement du vecteur d'onde ce qui augmente le seuil d'absorption [17].

Les matériaux III-V, possède une plus grande vitesse de saturation des électrons, ce qui offre une forte mobilité et lui permettre de fonctionner à des fréquences supérieures, aussi les composés à base des III-V, génèrent des faibles bruits en hautes fréquences comparativement avec ceux qui sont réalisés à partir du silicium. La plupart des III-V, possèdent un gap direct, ce qui lui donne des propriétés optoélectronique plus performantes comparativement aux celles du silicium qui est caractérisé par son gap indirect.

1.6 Les semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont formés principalement par les éléments des colonnes III et V du tableau de classification périodique (tableau 1.1), cette composition chimique offre des propriétés physique et électronique très intéressantes pour le domaine de l'optoélectronique. Ils possèdent un gap direct qui autorise un taux d'émission de photons par recombinaison radiative très élevé dès l'inversion de la population des porteurs, une forte résistance aux radiations et une très grande mobilité [18,19].

IIIb	IVb	Vb
5 10.81 ^B	6 12.01 ^C	7 14.01 ^N
13 26.98 ^{Al}	14 28.09 ^{Si}	15 30.97 ^P
31 69.74 ^{Ga}	32 72.59 ^{Ge}	33 74.92 ^{As}
49 114.82 ^{In}	50 118.69 ^{Sn}	51 121.75 ^{Sb}

Tableau 1.1. Extrait des matériaux III-V du tableau périodique [20].

1.6.1 Les principaux types d'alliages III-V

A partir de la combinaison entre les éléments chimique des colonnes III-V du tableau périodique, on peut avoir des alliages semi-conducteurs de type binaire, ternaire et quaternaire et plus le nombre des composés chimiques augmente plus l'alliage devient plus complexes.

a Les alliages binaires

Les semi-conducteurs binaires de la classe (III-V) sont composés d'un élément de la colonne III et d'un autre élément de la colonne V de la classification périodique, donc deux atomes dont la somme d'électrons de valence égale à huit par exemple : les composés à base aluminium (AlP, AlAs, AlSb), ou les composés à base gallium (GaAs, GaSb), d'indium (InN, InP, InAs, InSb). Actuellement, les semi-conducteurs binaires

comme GaAs sont utilisés dans une classe importante des composons du domaine de l'optoélectronique.

b Les alliages ternaires

Un alliage ternaire est composé de deux binaire AC et BC avec une fraction x pour l'atome A et $(1-x)$ pour l'atome B. le calcul de leurs paramètres physique $T(x)$ suit la loi de Végard [21] :

$$T_{A(x)B(1-x)C}(x) = xB_{AC} + (1 - x)B_{BC} + b_{ABC} \quad (1.1)$$

Avec :

B_{AC} : Paramètre physique du binaire AC.

B_{BC} : Paramètre physique du binaire BC.

b_{ABC} : représente la déviation par rapport à une interpolation linéaire entre les deux binaire B_{AC} et B_{BC} .

c Les alliages quaternaires

Un alliage quaternaire est formé à partir de trois ou quatre binaire et il peut avoir deux formes $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ ou $A_xB_yC_{1-x-y}D$ les fractions x et y représentent respectivement la concentration des atomes A et C ou A et B dans l'alliage total. Une fois le paramètre physique des ternaires constituants déterminés, on calcule le paramètre du quaternaire $Q(x, y)$ comme suit [22] :

Pour la forme $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$:

$$Q(x, y) = \frac{x(1-x)[yT_{ABC}(x) + (1-y)T_{ABD}(y)] + y(1-y)[xT_{ACD}(y) + (1-x)T_{BCD}(y)]}{x(1-x) + y(1-y)} \quad (1.2)$$

Pour la forme $A_xB_yC_{1-x-y}D$:

$$Q(x, y) = \frac{xyT_{ABD}(u) + y(1-x-y)T_{BCD}(v) + x(1-x-y)T_{ACD}(w)}{xy + y(1-x-y) + x(1-x-y)} \quad (1.3)$$

Avec :

$$u = (1 - x - y)/2$$

$$v = (2 - x - 2y)/2$$

$$w = (2 - 2x - y)/2$$

La constante $a(x,y)$ de l'alliage quaternaire est estimée à partir d'une interpolation entre les constantes de ses constituants binaires suivant la loi de Végard :

$$a_{ABCD}(x,y) = xy a_{AC} + (1-x)y a_{BC} + x(1-y) a_{AD} + (1-x)(1-y) a_{BD} \quad (1.4)$$

1.6.2 Propriétés physiques des semi- conducteurs III-V

a La structure Zinc-blende et Würtzite

La plupart des matériaux III-V ont une structure de type 'zinc-blende' présentée sur la figure 1-3, Cette structure, est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (CFC), l'un d'élément III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de $a\sqrt{3}/4$, où a représenté le paramètre de maille du matériau [23]

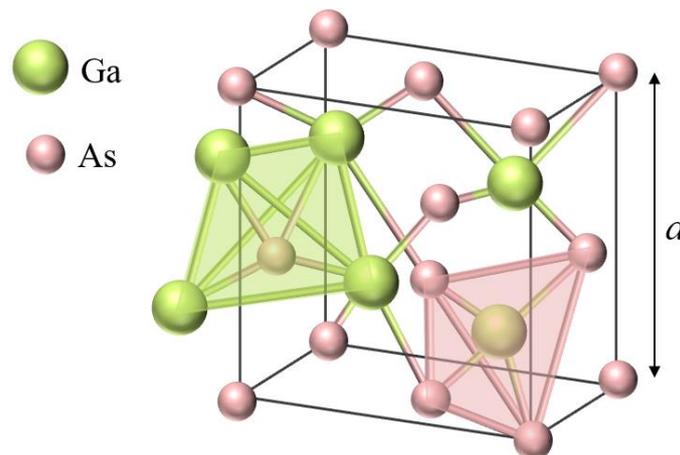


Figure 1.3. Mailles cristallographiques de Zinc Blende (GaAs) [24].

Le paramètre de maille « a » aussi appelé le paramètre cristallin, est égal à la distance entre deux atomes dans un cristal, la détermination des paramètres de maille est la première étape pour déterminer la structure d'un cristal.

La structure Wurtzite présentée sur la figure 1-4 est constituée de deux réseaux hexagonaux, les atomes forment ces deux sous-réseaux hexagonaux compacts l'un pour les atomes de type métallique ; le deuxième, pour les atomes de type non métallique qui sera décalée sur l'axe polaire (c). Les paramètres utilisés pour décrire la structure sont le côté (a) de l'hexagone dans le plan (0001), et c correspondant à la hauteur de la maille selon l'axe [0001] [25].

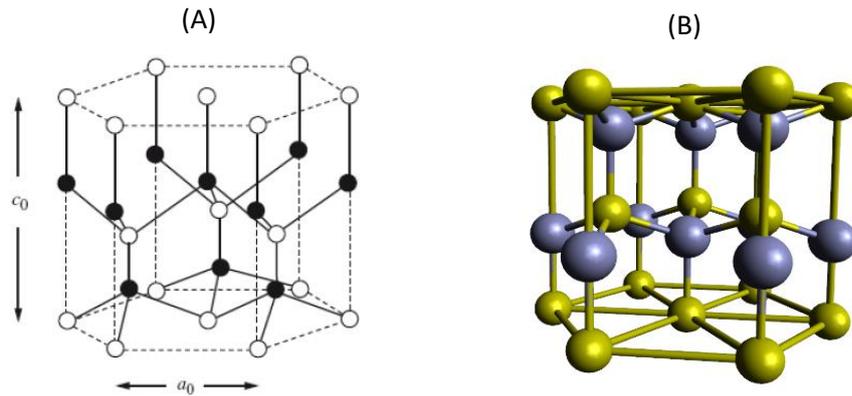


Figure 1.4. (A) Structure de Würtzite avec les paramètres de maille c_0 et a_0 [26].
 (B) Représentation 3D de la structure Würtzite [27].

***b* Structure de bande**

L'écart entre la bande de conduction et la bande de valence, le Gap, représente une caractéristique importante des semi-conducteurs.

Quand le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de la bande de valence dans l'espace des k , il s'agit d'un Gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement et sont donc radiatives (figure 1.5-A). Ceci illustre le fonctionnement de la plupart des semi-conducteurs binaires III-V, tel que GaAs, InGaAs...etc. très utilisés en optoélectronique. Dans le cas contraire c'est un Gap indirect. Comme le silicium, (le maximum de la bande de valence est décalé par rapport au minimum de la bande de conduction dans l'espace k), les transitions inter bandes dans ce cas sont inclinées, donc non radiatives car elles impliquent un changement de vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du minimum de la bande de valence libèrent une partie de leur énergie sous forme de phonons pour changer leurs vecteurs d'onde et par la suite, ils libèrent le reste de leurs énergies sous forme de photon afin de passer vers la bande de valence (figure 1.5-B) [28].

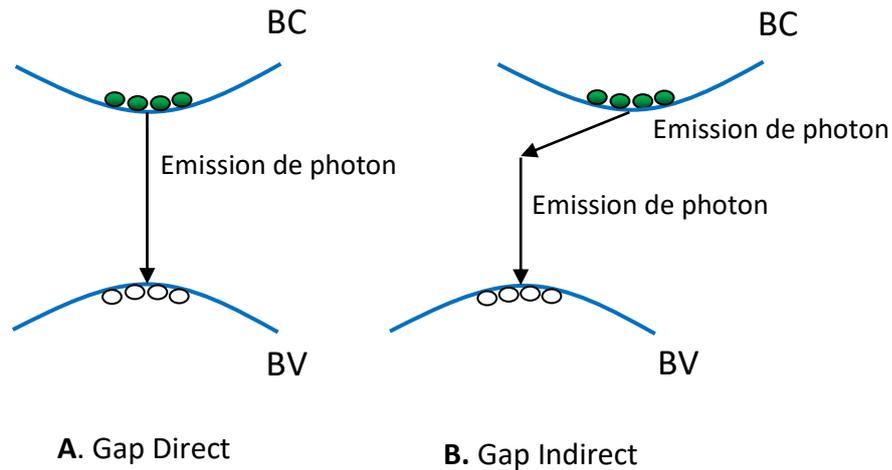


Figure 1.5. Structure de bande d'énergie du : gap indirect et gap direct [29].

1.7 Les recombinaisons radiatives et non radiative

La recombinaison d'un électron avec un trou est un processus par lequel les deux particules s'auto-annihilent. Après une thermalisation rapide vers le bas de la bande de conduction, l'électron retourne par un saut direct ou par plusieurs sauts vers la bande de valence où il occupe un état vide associé au trou. La différence en énergie entre l'état initial et final de l'électron peut être restituée sous différentes formes. Soit sous forme de photon, dans ce cas la recombinaison est dite radiative, soit transmise au réseau sous forme de phonons, on parle dans ce cas de recombinaison non radiative [30].

a. Transition radiative : Emission et absorption de lumière par un semi-conducteur.

b. Transition non radiative : Transfert d'énergie par chaleur

Absorption : Lorsqu'un photon incident cède son énergie à un électron de la BV et le fait "monter" dans la BC, créant une paire électron-trou, c'est un processus de génération radiative [31].



Emission spontanée : Emission spontanée où un électron "redescend" spontanément sur un état libre de la BV : c'est un processus de recombinaison radiative [32].



Emission stimulée : Lorsqu'un photon incident induit la recombinaison radiative d'une paire électron-trou. Le photon émis a même phase et même direction que le photon incident, pouvant être amplifié et exploité dans tous les types de LASER [33].



1.8 Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de laser à cavité ainsi que les différents types de lasers, qui sont classifiés en fonction de la nature du matériau constituant le milieu amplificateur. Parmi ces types, les lasers à solide présentent les meilleures propriétés optiques et les plus longues durées de vie.

La deuxième partie, été consacrée à la définition des propriétés optique et électrique des semi-conducteurs III-V, en effet la forte mobilité, le faible bruit généré en haute fréquence et la nature de gap direct rendent ce type de matériau plus attractive par rapport au semi-conducteur conventionnel.

A la fin de ce chapitre, nous avons décrit la méthode de calcul des paramètres physique des alliages III-V dans le cas d'un ternaire et quaternaire, leurs propriétés structurales comme le paramètre de maille et la nature de gap direct et indirect ainsi que les principales transitions et leurs phénomènes d'émission au sien du semi-conducteur.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire la notion d'une couche contrainte et les différentes formules mathématique qui ramènent à la détermination des longueurs d'onde d'émission ainsi que le gain optique d'un laser a puits quantique a base de semi-conducteurs III-Ven fonction de la variation des paramètres structural de ce dernier.

Chapitre 2 Puits quantique à base de matériaux III-V

2.1 Introduction

Grâce au développement des techniques de croissance, il est devenu possible d'élaborer des structures de types quantique comme les puits quantique, les boites quartiques et les nano fils avec des propriétés optiques et électroniques très intéressantes pour le domaine de l'optoélectronique. De nombreuses études durant ces dernières décennies focalisent leurs efforts pour atteindre de composants de grandes performances avec des coûts accessibles aux différents applications. La recherche dans ce domaine, vise d'atteindre ces buts par l'utilisation de nouveaux matériaux semi-conducteurs comme les III-V épitaxies sur des substrats avec une faible quantité et une meilleure structure cristallographique possible [34].

Dans la première partie de ce chapitre on va définir les lasers à puits quantique ainsi que leurs différents types et les notions d'une couche contrainte qui représentent la clé de ce domaine de recherche. Ensuite, on va décrire les propriétés des matériaux constituants les structures étudiés dans ce travail de thèse, le quaternaire InGaAsSb composé par InAs, GaAs, InSb et GaSb qui représente la couche active ainsi que le AlSb qui est utilisé comme barrière avec le GaAs. A la fin on va présenter le modèle mathématique qui permet le calcul du gain optique due aux transitions électroniques réalisées dans les deux puits.

2.2 Épitaxie par jet moléculaire MBE

Les hétérostructures sont des structures multicouches particulières, où les différentes couches sont fabriquées par les techniques d'épitaxie sur un substrat (figure 2.1).

La technique d'épitaxie par jet moléculaire a été initialement développée pour la croissance cristalline d'au moins de deux semi-conducteurs de nature différente. La condition nécessaire pour réaliser une bonne hétérostructure il faut que les deux semi-

conducteurs ayant la même structure cristalline et des paramètres de mailles voisins [35].

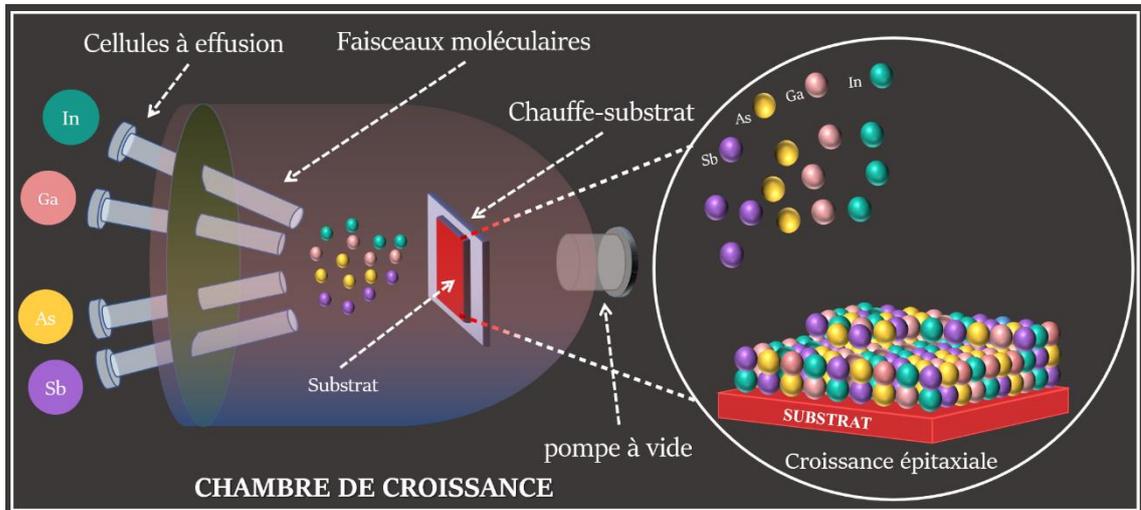


Figure 2.1. Représentation du MBE [36].

Le jet moléculaire est le flux d'atomes qui est produit par le chauffage de substances dans des cellules à effusions, la température des cellules à évaporation contrôle les vitesses d'intégration des différents éléments. Elle consiste à évaporer sous ultravide les éléments IIIIV constitutifs de chaque couche semi-conductrice pour nettoyage thermique et la désorption des contaminations restantes ainsi que l'oxyde [37,38].

La chambre de croissance c'est la principale, car c'est là que se déroule l'épitaxie, On trouve dans cette chambre plusieurs cellules à effusion contenant différents matériaux solides purs (In, Ga, As, Sb) possède 3 groupes des ports cellules sont classé selon leurs types :

Les cellules des éléments III (Ga,IN,Al) : elles permettes une bonne précision des épaisseurs des compositions des dopages et la possibilité de réduire la vitesses de croissance par la stabilité des flux .

Les cellules d'éléments V (As,Sb) : qui sont sous formes des tétramères elle sont équipées par un étage de cracker permet de casser les tétramères V4 en dimères V2 et une vanne permet de régler le flux atomique sur le substrat par l'ouverture de cette vanne .

Les cellules dopantes : un port cellule libre d'un élément V(P) [37].

La croissance épitaxiale se fait par les réactions entre le jet atomique (moléculaire) de la source et la surface du substrat, ce dernier est placé sur un support rotatif chauffant à une certaine température dans un environnement à ultravide, le vide est maintenu grâce à une pompe à vide de l'ordre de 10^{-11} Torr. L'utilisation d'un vide très poussé permet d'éviter tout choc ou contamination entre les espèces réactives.

Les épaisseurs, la composition et le niveau de dopage des couches peuvent être précisément contrôlés via un contrôle exact du flux du jet atomique.

Les atomes sont arrangés sur les bords des substrats qui se combinent en progressant dans le sens de la croissance, la vitesse de croissance faible de l'ordre de 0,1 à 1 $\mu\text{m}/\text{h}$. Le substrat est monté dans un bloc et subit une rotation continue pour promouvoir une croissance cristalline uniforme sur sa surface [37-39].

2.3 Puits quantique

Un puits quantique est formé par l'empilement de couches minces (d'épaisseur typiquement inférieure à 30 nm) de deux semi-conducteurs de bandes interdites différentes, ces deux semi-conducteurs forment le puits d'une couche d'épaisseur L_z de faible largeur de bande interdite et la barrière de forte largeur de bande interdite (Figure 2.2) [40].

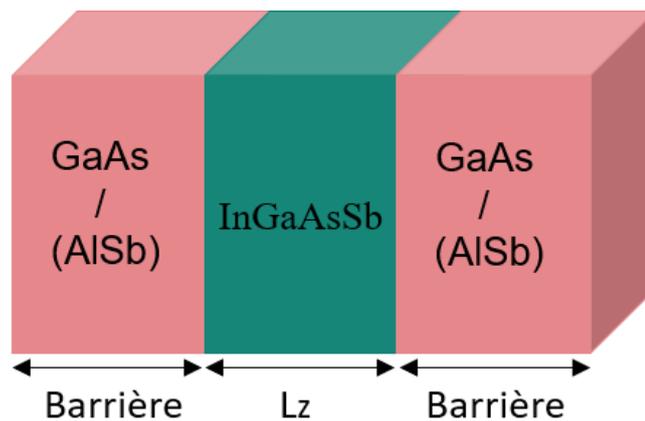


Figure 2.2. Diagramme de puits quantiques en 3D de InGaAsSb/GaAs (AlSb)

Dans le puits quantique il y a trois paramètres principaux qui peuvent modifier l'énergie de confinement sont : la largeur de puits L_z , l'énergie de la bande de conduction ΔE_c et l'énergie de la bande de valence ΔE_v , la différence de gap ΔE_g est

distribuée entre les bandes de conduction et de valence suivant la différence des affinités électroniques des semiconducteurs 1 et semiconducteur 2.

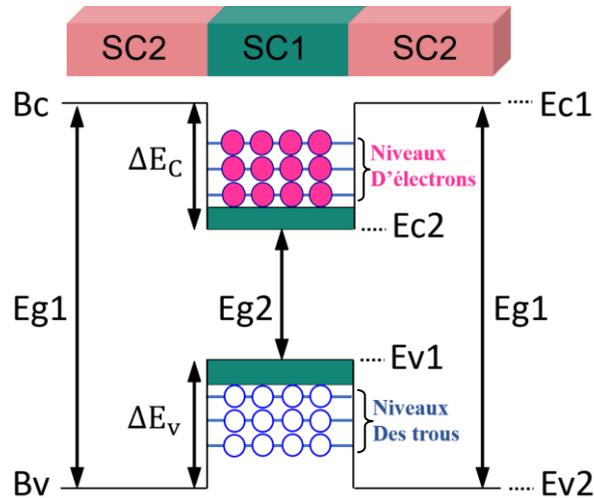


Figure 2.3. Présentation d'un puits quantique [41].

Eg1 est le gap ou l'énergie de la bande interdite du matériau SC2 qui forme la barrière. Eg2 est le gap du matériau SC1 qui forme le puits quantique.

2.3.1 Les types de puits quantique

Selon la nature de la discontinuité de bandes interdites à l'interface puits-barrière, on distingue trois types de puits quantiques.

a Puits quantique 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.

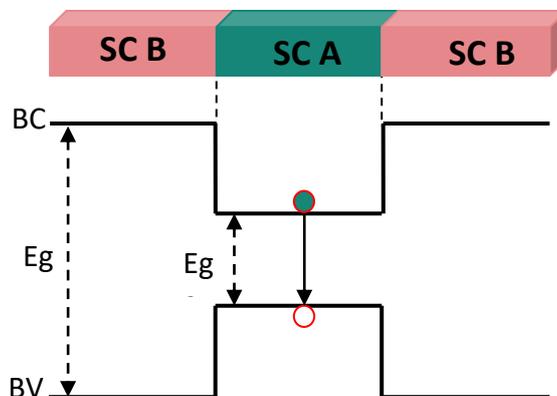


Figure 2.4. P.Q type I [41].

b Puits quantique type II

Les porteurs sont confinés dans deux matériaux adjacents. Dans ce cas l'énergie du photon est en fonction des énergies de confinement des porteurs mais aussi des gaps des deux matériaux formant l'hétérostructure.

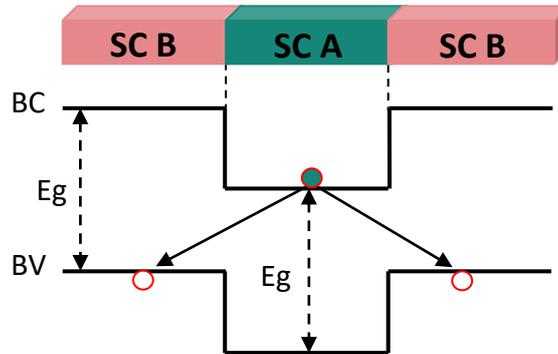


Figure 2.5. P.Q type II [41].

c Puits quantique de type III

Cas particulier de type II dans lequel le bas de la bande de conduction se trouve en dessous du haut de la bande de valence. La longueur d'onde d'émission ne dépende que des énergies de confinement des électrons et des trous, donc des épaisseurs des couches.

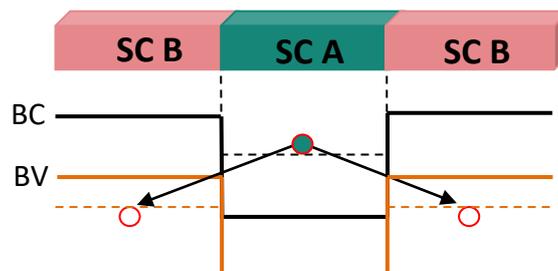


Figure 2.6. P. Q type III [41].

2.4 Notion sur contrainte

2.4.1 La contrainte

La contrainte est un désaccord paramétrique généré lorsque l'on fait croître deux semi-conducteurs l'un sur l'autre, et que les deux matériaux constituant le substrat et la couche active ont la même structure cristalline ainsi que des paramètres de maille différents [42].

En effet, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre au voisinage de l'interface, dans le cas où les couches épitaxiales sont suffisamment fines, la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique dans la direction parallèle et perpendiculaire à la surface de croissance.

La constitution de la couche épitaxiale et celle du substrat se fait par la liaison de plusieurs mailles, considérons un substrat cubique de paramètre de maille a_s et le matériau épitaxié de structure cubique avec un paramètre de maille a_e . Dans le cas où il n'y a pas de contrainte on a un accord de maille ($a_e // = a_s$), (figure 7.a).

Engendrant ainsi une déformation élastique, On distingue deux cas :

Si ($a_e // > a_s$) : dans ce cas la maille se comprime pour adapter son paramètre de maille dans le plan parallèle, et s'allongeant selon l'axe de croissance pour préserver son volume. C'est la contrainte de compression, (figure 7.b).

Si ($a_e // < a_s$) : dans ce cas la maille se dilate pour adapter son paramètre de maille dans le plan parallèle, et s'allongeant selon l'axe de croissance pour préserver son volume. C'est la contrainte de tension, (figure 7.c).

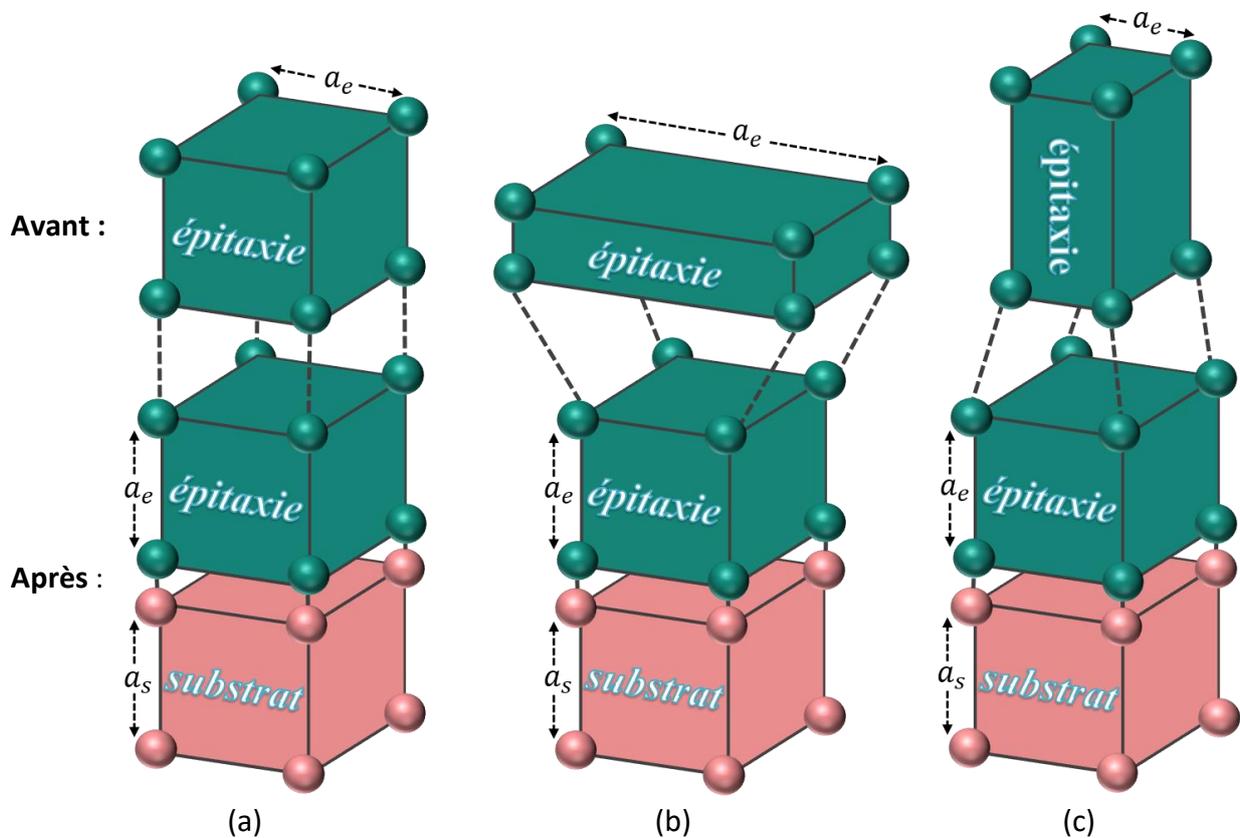


Figure 2.7. (a) Accord de maille ; (b) Compression ; (c) Tension

2.4.2 Épaisseur critique

L'épaisseur critique L_c correspondant à la limite de la déformation élastique qu'elle peut supporter. Cela veut dire qu'il correspond à la situation où l'énergie élastique est suffisante pour créer un réseau de dislocation qui affecte la qualité cristalline du matériau. La croissance parfaite d'une hétéro-épitaxie [figure 2.8.(1)] n'est possible que si l'épaisseur de la couche épitaxie ne dépasse pas l'épaisseur critique [43].

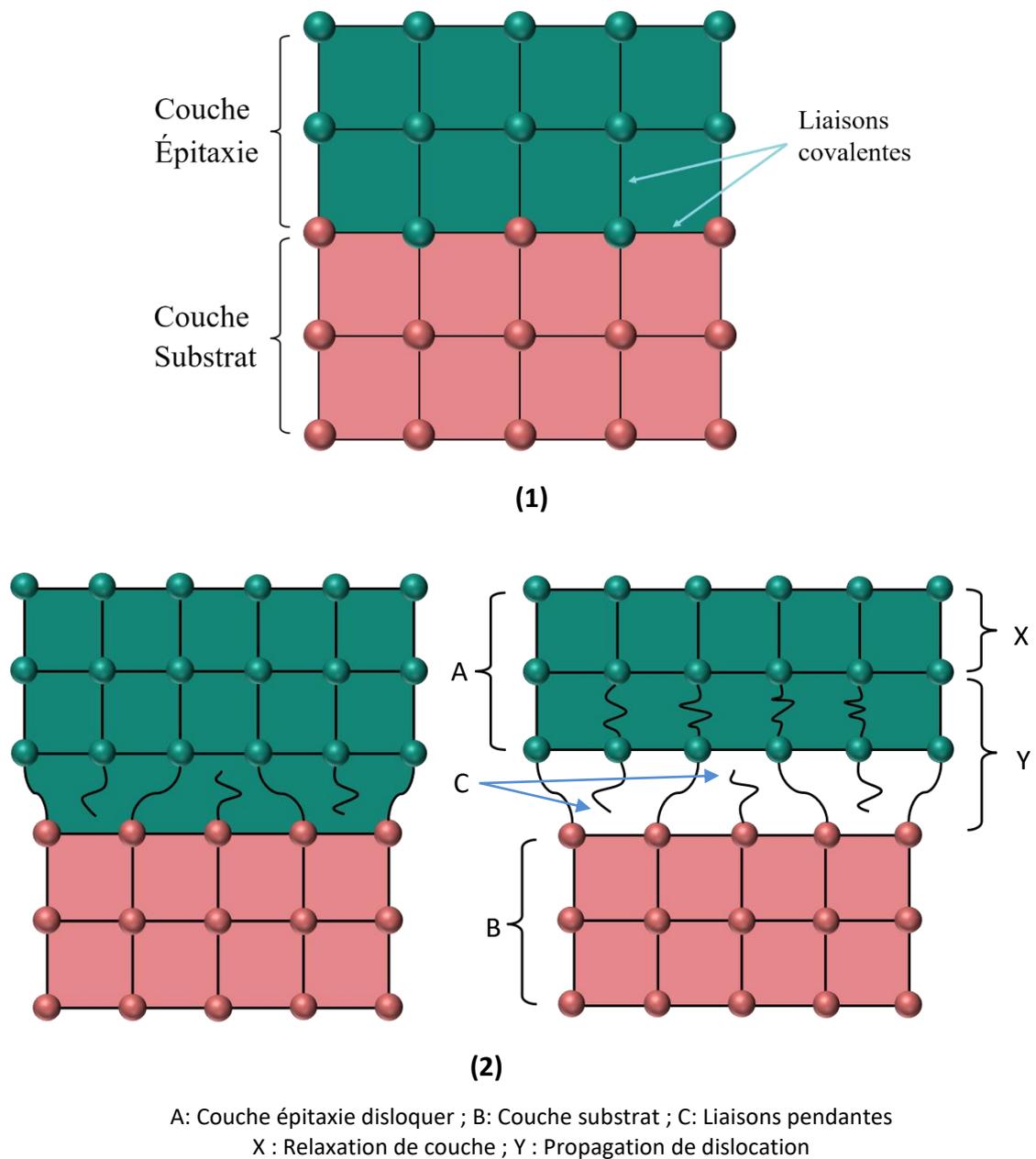


Figure.2.8. Schéma montrant une couche sans dislocation (1)
 Deux schémas montrant la dislocation de la couche (2)

Au-delà de cette épaisseur la contrainte devient trop importante, la déformation de la couche épitaxiale ne suffit plus à équilibrer l'énergie mécanique engendrée par la croissance [44] [figure 2.8.(2)]. Alors le désaccord est rattrapé par la génération de la dislocation à l'interface de croissance, ces dislocations se propagent du substrat vers l'interface de croissance et la couche commence à se relaxer, cela crée des liaisons pendantes.

K. Koksal et B. Gonul propose un modèle qui permet le calcul de l'épaisseur critique L_c en fonction des concentrations de l'alliage :

$$L_c = \frac{a_s}{k \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \varepsilon} \times \frac{1 - (0,25 \cdot y)}{(1 + y)} \times \ln \left(\frac{L_c \cdot \sqrt{2}}{a_s} + 1 \right) \quad (2.1)$$

Avec : $\varepsilon = \frac{a_s - a_0}{a_s}$; $y = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}$

a_s : le paramètre de maille de la couche relaxée

a_0 : le paramètre de maille du substrat

ε : le désaccord paramétrique.

y : le coefficient du poisson.

C_{ij} : les coefficients élastiques.

K est un coefficient qui prend les valeurs selon le type de la structure (K= 1 pour un super réseau, K=2 pour un puits quantique, K=3 dans le cas d'une couche mince).

Tableau 2.1, résume les paramètres de maille et les coefficients élastiques des binaires utilisés dans notre étude [45,46].

Matériaux	GaAs	InAs	GaSb	InSb	AlSb
a (Å)	5.65325	6.0583	6.0959	6.4794	6.1355
C_{11} (GPa)	1221	832.9	884.2	684.7	876.9
C_{12} (GPa)	566	452.6	402.6	373.5	434.1

Tableau 2.1. Les Paramètres de maille et coefficients élastiques des binaires.

2.4.3 L'effet de la contrainte sur les bandes d'énergies

En absence de contrainte, les bandes de trous lourds et trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, la bande des spin-splittée étant située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes (figure 2.9.a). Le centre de gravité de la bande de valence d'énergie moyenne E_{vmoy} se trouve par conséquent à $\Delta_0/3$ en dessous du haut de la bande de valence en $k=0$ [47].

$$E_{v \text{ moy}} = \frac{E_{hh} + E_{lh} + \Delta_0}{3} \quad (2.2)$$

E_{hh} : L'énergie de la bande des trous lourds

E_{lh} : L'énergie de la bande des trous légers

Δ_0 : L'énergie de décalage des bandes des trous spin-splitte.

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux parties :

- La composante hydrostatique liée à la déformation selon l'axe de croissance Oz, provoque un décalage du centre de gravité de la bande de valence ainsi que le centre de gravité de la bande de conduction.
- La composante de cisaillement liée à la déformation selon les axes Ox et Oy, provoque la dégénérescence des états énergétiques des trous lourds et trous légers.

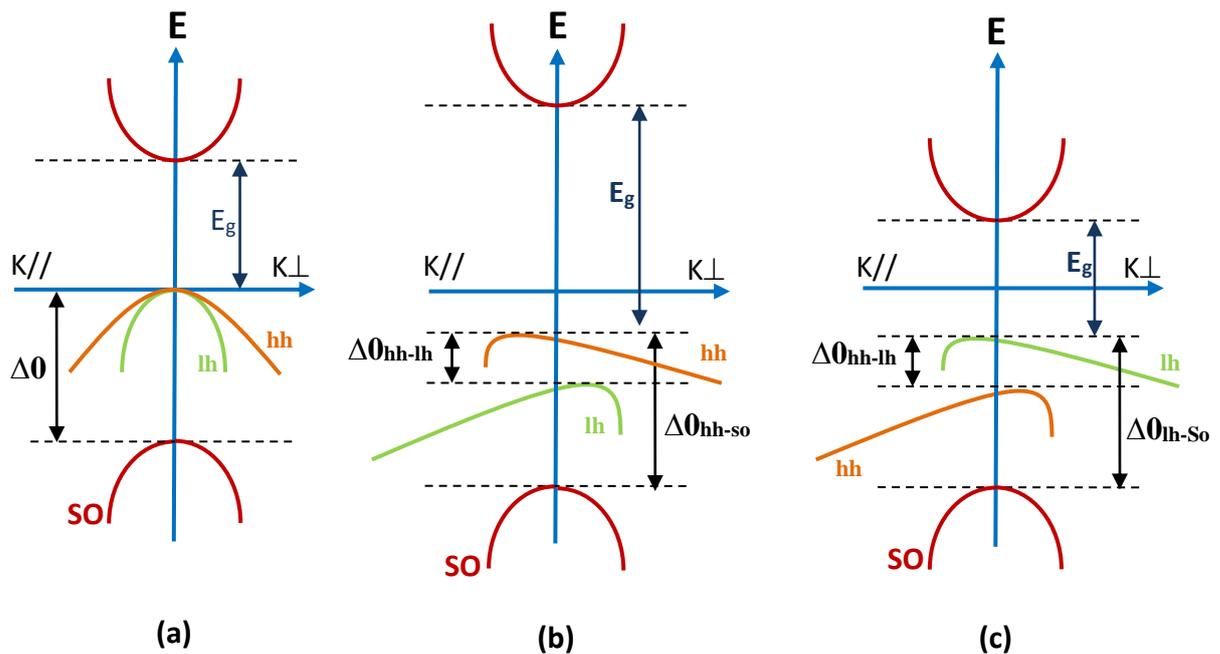


Figure 2.9. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap directe (a) non contraint ; (b) en compression et (c) en tension [48].

Pour une couche soumise à une contrainte biaxiale de compression (figure 2.9.b), la composante hydrostatique augmente l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction ; la contrainte de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes ; la bande de plus haute énergie devient lourde selon K_{\perp} et légère selon K_{\parallel}

(bande de trous lourds). La bande d'énergie inférieure devient légère selon K_{\perp} et lourde selon K_{\parallel} (bande de trous légers).

Dans le cas d'une couche soumise à une contrainte biaxiale de tension (figure 2.9.c) le gap moyen diminue et les bandes de valence sont inversées par rapport à celles d'une couche soumise à une contrainte en compression. La bande de plus haute énergie (bande LH) reste légère selon K_{\perp} et lourde selon K_{\parallel} .

Les décalages énergétiques des centres de gravité des bandes de valence et de conduction et $K=0$ induits par la contrainte hydrostatique varient proportionnellement à la contrainte [49] :

$$\Delta E_{v,moy}^{hyd} = a_v(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.3)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.4)$$

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

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

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{\delta E^{cisa}}{2} \quad (2.5)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{\Delta_0}{2} + \frac{\delta E^{cisa}}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.6)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{\Delta_0}{2} + \frac{\delta E^{cisa}}{4} - \frac{1}{2} \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.7)$$

Avec :

$$\Delta E^{cisa,100} = 2b(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (2.8)$$

Où

b est le potentiel de déformation tétragonale.

En prenant comme référence énergétique $E_{v,moy}$, et compte tenu des équations (2.5) et (2.12), on peut définir l'énergie du haut de la bande de valence E_v ainsi que l'énergie du bas de la bande conduction E_c comme suit :

$$E_v = E_{v\text{moy}} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,\text{moy}}^{\text{cisa}} + \max(\Delta E_{hh}^{\text{cisa}}, \Delta E_{lh}^{\text{cisa}}) \quad (2.9)$$

$$E_v = E_{v\text{moy}} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + \Delta E_c^{\text{hyd}} \quad (2.10)$$

Dans ces expressions $E_{v\text{moy}}$, l'éclatement spin-orbite Δ_0 et l'énergie de gap E_g sont relatifs au matériau non contraint. À partir de ces équations (2.9) et (2.10), on peut déterminer l'équation du gap contraint E_g^c :

$$E_g^c = E_c - E_v = E_g + \Delta E_c^{\text{hyd}} - \Delta E_{v,\text{moy}}^{\text{cisa}} - \max(\Delta E_{hh}^{\text{cisa}}, \Delta E_{lh}^{\text{cisa}}) \quad (2.11)$$

Dans le cas d'une couche épitaxie 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 on aura :

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

Et dans le cas où la couche épitaxie est soumise à une contrainte en tension, la bande des trous lourds devient au-dessous de la bande des trous légers (figure 2.8.c) et on aura :

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

Donc l'équation (2.11) devient pour une contrainte en compression :

$$E_{g\text{hh}} = E_g + \Delta E_c^{\text{hyd}} - \Delta E_{v,\text{moy}}^{\text{cisa}} - \Delta E_{hh}^{\text{cisa}} \quad (2.12)$$

Et pour une contrainte en tension :

$$E_{g\text{lh}} = E_g + \Delta E_c^{\text{hyd}} - \Delta E_{v,\text{moy}}^{\text{cisa}} - \Delta E_{lh}^{\text{cisa}} \quad (2.13)$$

2.4.4 Niveau de confinement dans un puits quantique

En physique, le confinement est défini comme étant qu'une particule piégée dans un puits de potentiel et va présenter des niveaux d'énergie discrets. L'énergie de ces niveaux va alors dépendre de la taille du puits de potentiel.

Dans les semi-conducteurs, les phénomènes de confinement quantique apparaissent lorsque les dimensions dans lesquelles se déplacent les porteurs de charge sont suffisamment petites pour discrétiser leurs niveaux d'énergie.

Lorsque les porteurs de charge sont confinés avec 0D degré de liberté on parle d'une boîte quantique, pour 1D (un degré de liberté) dans le cas de nano fils et pour 2D

(deux degrés de liberté) comme le cas de puits quantique. Le changement du nombre des niveaux de confinement est étroitement lié aux dimensions du dispositif, et il a un impact direct sur les propriétés électroniques et optiques de l'objet, en particulier la courbe de densité d'état est considérablement affectée. Celle-ci est représentée par des marches d'escalier dans les puits quantiques (Figure 2.10) [50].

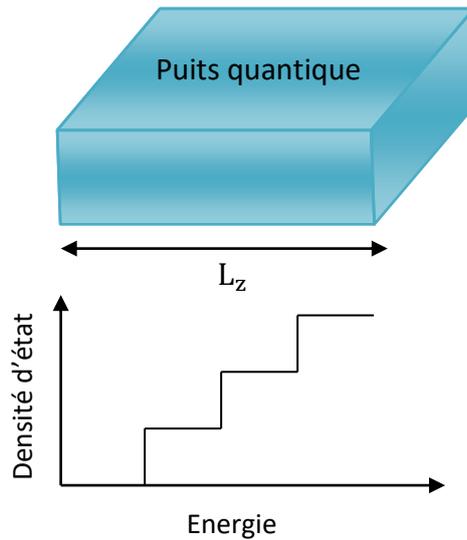


Figure 2.10. Augmentation des niveaux de confinement en fonction du largeur de puits quantique.

A partir d'équation de dispersion (2.14) on peut connaître le nombre et les niveaux des états confinée dans le puits quantique

$$K_w L_w + \arctang\left(\frac{m_g^* K_w}{K_g m_w^*}\right) + \arctang\left(\frac{m_d^* K_w}{K_d m_w^*}\right) + n\pi = 0 \quad (2.14)$$

Où

n : le numéro de puits

L_w : le largeur de puits

m_g^*, m_w^*, m_d^* Étant les masses effectives de l'électron dans la barrière de gauche, le puits et la barrière de droite, respectivement k_g, k_w, k_d étant les vecteurs d'ondes dans la barrière de gauche, le puits et la barrière de droite, respectivement.

La résolution de l'équation précédente détermine l'évolution de ces niveaux de confinement en fonction de la profondeur et largeur de puits quantique, ainsi que le nombre d'état de confinement qui est donné par :

$$n_{\text{états}} = 1 + \frac{2 \cdot L_w}{h} \cdot \sqrt{2 \cdot m_w^* \cdot V_b} \quad (2.15)$$

V_b : Potentiel dans la barrière

2.4.5 Energie de transition

L'énergie de transition est l'énergie nécessaire pour qu'un électron passe de la bande de valence vers la bande de conduction dans un puits quantique où les niveaux énergétiques sont quantifiés (Figure 2.11)

Le calcul des transitions électroniques qui se produisent dans un semi-conducteur est un paramètre clé pour l'étude des propriétés optiques comme le gain ou l'absorption, mais cela nécessite la connaissance de la structure de bandes du matériau, c'est-à-dire les bandes d'énergie et leurs fonctions d'ondes correspondantes.

Pour la détermination de l'énergie de transition dans le puits quantique d'une structure à base de InGaAsSb/GaAs en résolvant l'équation de Schrödinger selon le formalisme de Ben-Daniel-Duke [51,52].

$$-\frac{\hbar^2 \partial^2 \varphi(x)}{2m^* dx^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x) \quad (2.16)$$

Où

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

h : constante de Planck

m^* : La masse de la particule.

φ : La fonction d'onde.

$V(x)$: Fonction décrivant le potentiel pour chaque valeur de x .

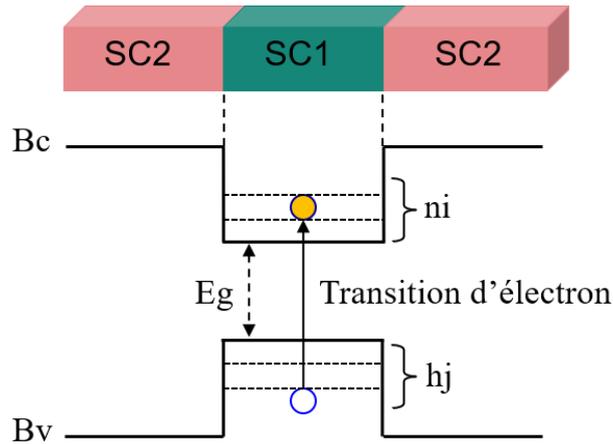


Figure 2.11. Energie de transition dans le puits quantique [53]

2.5 Gain optique

Le gain optique dans un laser à puits quantique contraint en fonction de la structure microscopique a fait l'objet de nombreux travaux aussi bien expérimentaux que théoriques [54].

La plupart des caractéristiques d'un laser comme le courant de seuil, la largeur de raie ou la bande passante résultent des propriétés du gain de la structure à puits quantique, il est donc fondamental de le définir avec précision.

Le gain d'un matériau par unité de longueur est défini par le taux de croissance de la densité des photons pendant leur propagation suivant une direction dans le cristal. Le gain est généré par la recombinaison stimulée d'une paire électron-trou par un photon incident, créant un deuxième photon de même longueur d'onde et de même phase que le premier, doublant ainsi l'amplitude de l'onde monochromatique. La répétition de ce processus mène à une forte amplification de la lumière.

Le gain optique est proportionnel à la probabilité qu'un photon déclenche une transition d'un niveau (j) à un niveau d'énergie inférieure (i), l'énergie du photon ($h\nu$) doit être égale à l'énergie de transition. $E_{ij} = E_j - E_i$. Le calcul de cette probabilité est basé sur la mécanique quantique [55,56], le gain dans le puits quantique est donné par [57] :

$$g_{ij}(h\omega) = \left(\frac{q^2 h}{2m_0^2 \epsilon^0 n_r c} \right) \left(\frac{1}{h\nu} \right) |M(E_{ij})|^2 D_r(E_{ij})(f_j - f_i) \quad (2.17)$$

Où

$$h_\nu = E_{ij}$$

m_0 : est la masse de l'électron.

ϵ^0 : est la permittivité du vide.

q : la charge de l'électron.

h : la constante de Planck

f_j, f_i : Les fonctions de Fermi.

n_r : L'indice de réfraction relatif du matériau.

C : célérité de la lumière.

Dans un puits quantique le gain est obtenu en faisant la somme de tous les gains produits par les transitions entre les sous bandes (n bandes de conduction et m bandes de valence) ; l'équation (2-17) devient alors :

$$g(h\nu) = \sum_n \sum_m \left(\frac{q^2 h}{2 m_0^2 \epsilon^0 n_r c} \right) \left(\frac{1}{h\nu} \right) |M(E_{ij})|^2 D_r(E_{ij}) (f_j - f_i) \quad (2.18)$$

Le paramètre principal dans cette équation est la matrice de transition $|M|^2$ qui donne la force de la transition.

$D_r(E)$: est la densité des transitions permises, elle est appelée densité d'états réduite définie par :

$$\rho_r = \frac{\rho(k)}{2 E_t(k)/dk} \quad (2.19)$$

Où :

$\rho(k)$ est la densité d'états dans l'espace K_t et E_t est l'énergie de transition ($E_e - E_h$)

Pour un puits quantique d'épaisseur L_z la densité d'états réduite de chaque sous bande est donnée par :

$$D_r^{2D} = \frac{m_r}{\pi h^2 L_z} \quad (2.20)$$

Où

m_r : est la masse effective réduite, donnée par :

$$m_r^* = \left[\frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_v^*} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

m_c^* et m_v^* : Masses effectives des porteurs dans les bandes de conduction et de valence respectivement.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans une première partie la définition et les notions des puits quantiques ainsi que leurs différents types, en se concentrant sur les puits quantiques sous contrainte et l'effet de ce dernier sur les bandes d'énergies.

La deuxième partie a été consacrée à la définition du principe de confinement des porteurs dans un puits quantique de type I, par la suite nous avons établis les différents modèles mathématiques qui permettent le calcul des niveaux de confinement, l'énergie de transition ainsi que le gain optique délivré par telles structures.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation et interprétation des résultats obtenus par la simulation des deux structures à puits quantique InGaAsSb/GaAs InGaAsSb/AlSb dans le but de déterminer les concentrations optimales de l'indium et l'antimoine ainsi que le substrat qui résultent des longueurs d'onde d'émission exploitables dans les fibres optique.

Chapitre 3 Simulation et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter, interpréter et comparer les résultats obtenus par simulation des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb afin de déterminer les concentrations de l'indium et l'antimoine dans le quaternaire et le substrat qui résultent des longueurs d'onde d'émission exploitables dans les fibres optique 0.85, 1.33 et 1.55 μm .

Pour cela, nous avons réalisé des simulations a partir des modèles mathématique présentés dans le chapitre précédent, d'où les résultats permettent de déterminer l'effet de la variation des concentration de l'indium et l'antimoine sur les propriétés structurales comme la maille, la contrainte, l'épaisseur critique, le gap, profondeur des puits ... etc., et les propriétés optique comme les longueurs d'onde d'émission, le gain optique et la gamme d'émission des puits étudiés.

3.2 Paramètre de maille

La figure 3.1, illustre la variation du paramètre de maille de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ en fonction des fractions de l'indium et l'antimoine respectivement, (x, y) .

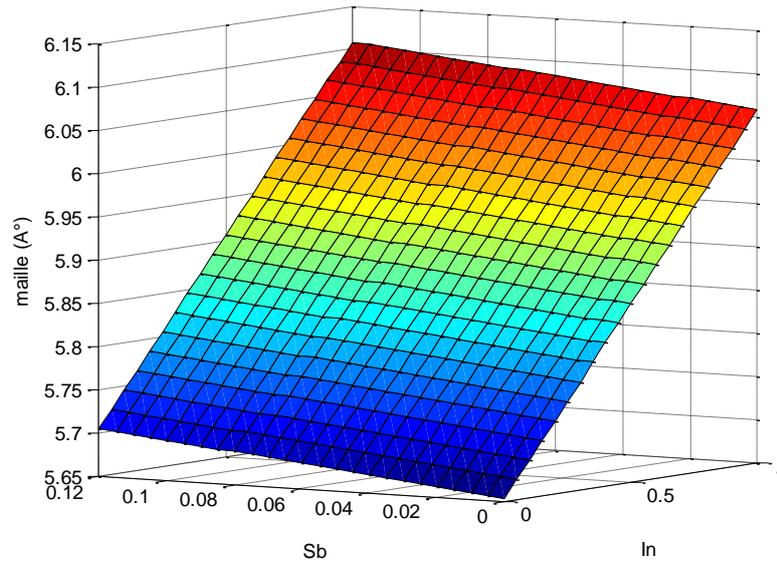


Figure 3.1. Variation du paramètre de maille de l'alliage InGaAsSb en fonction de concentration de l'indium et l'antimoine.

L'indium et de l'antimoine, entraînent une augmentation du paramètre de maille de l'alliage InGaAsSb. Pour des concentrations nulles, le paramètre de maille est celui de GaAs, et avec la variation de In, le paramètre de maille augmente pour atteindre les 6 Å à $(x, y) = (1,0)$. Pour une concentration nulle de l'indium et avec la variation de Sb de 0 à 12%, on remarque une légère augmentation du paramètre de maille égale $\Delta a_{\text{InGaAsSb}} = 0.053 \text{ Å}$.

3.3 Désaccord paramétrique

Les variations des contraintes de l'alliage sur les deux substrats GaAs et AlSb en fonction des concentrations (x, y) , sont illustrées respectivement sur la figure 3.2(a) et (b).

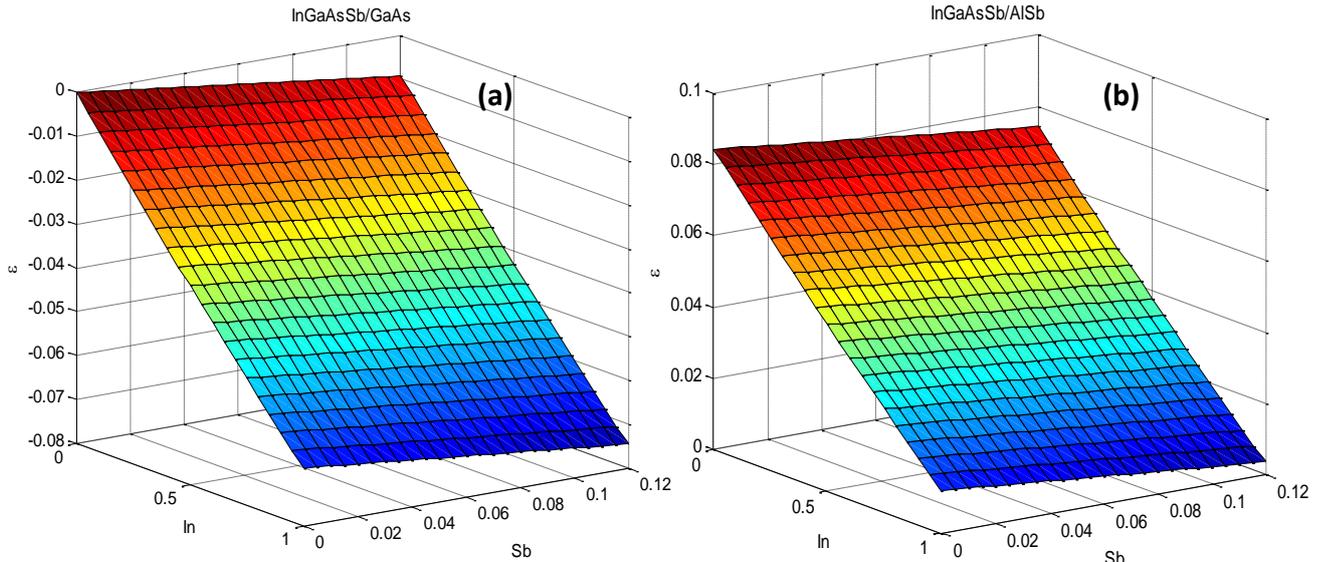


Figure 3.2. Variation de la contrainte en fonction des concentrations In et Sb dans l'alliage InGaAsSb sur (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb.

La contrainte, augmente avec l'incorporation de l'indium dans le cas de substrat GaAs, alors que cette variation d'In réduit le désaccord créé entre l'alliage InGaAsSb et le substrat AlSb. Dans les deux structures, l'antimoine diminue légèrement la contrainte car son effet sur le paramètre de maille du InGaAsSb est presque négligeable ($\Delta a_{\text{InGaAsSb}} = 0.053 \text{ \AA}$).

Pour le premier substrat (figure 3.2.a), la contrainte est toujours en compression quel que soit les concentrations de In et Sb, alors qu'on remarque que la contrainte est en tension dans la deuxième structure pour toutes les valeurs (x, y) .

3.4 Épaisseur critique

L'épaisseur critique, représente la valeur maximale de l'épaisseur de la couche épitaxiale qu'on ne doit pas dépasser lors du dépôt afin d'éviter l'apparition des pièges ou centres de recombinaison à l'interface de contact couche active/substrat ou en profondeur de la couche active, comme dans notre cas le InGaAsSb.

La figure 3.3 (a) et (b), montre la variation de cette épaisseur en fonction des concentrations (x, y) de (In, Sb) respectivement, sur GaAs et AlSb. Entendant le premier substrat et pour $(x, y) = (0,0)$, l'épaisseur critique tend vers l'infini car nous avons le GaAs/GaAs mais avec l'augmentation des concentrations de In et Sb, cette valeur diminue pour atteindre les 63.22 \AA pour le couple $(x, y) = (1,0.12)$. Dans la deuxième structure (substrat AlSb), l'indium réduit la contrainte créée entre InGaAsSb

et le substrat AlSb ce qui engendre une augmentation de l'épaisseur critique pour qu'il atteigne un maximum égal à 825 Å pour des concentrations x, y égales 1 et 0.12. Si on compare les résultats de ces deux simulations, on remarque que l'épaisseur critique de la couche InGaAsSb est nettement importante sur le substrat AlSb.

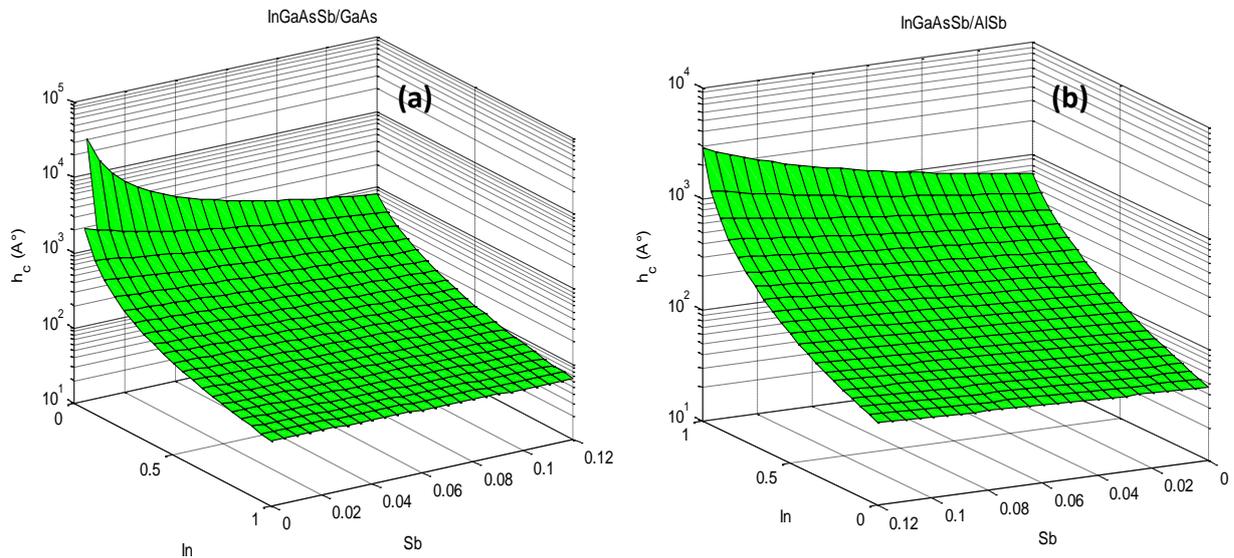


Figure 3.3. Variation de l'épaisseur critique de la couche InGaAsSb en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb.

3.5 Éclatement de la bande de valence

La figure 3.4, montre l'effet de l'incorporation de Sb sur la bande de valence de l'alliage InGaAsSb, en fait l'antimoine induit un éclatement de la bande de valence en deux sous bandes ce qui induira une réduction de la bande interdite du matériau en fonction de la concentration de Sb. Soit pour $\Delta_x=0.11$ on a une augmentation du niveau de la bande de valence de 0.25 eV.

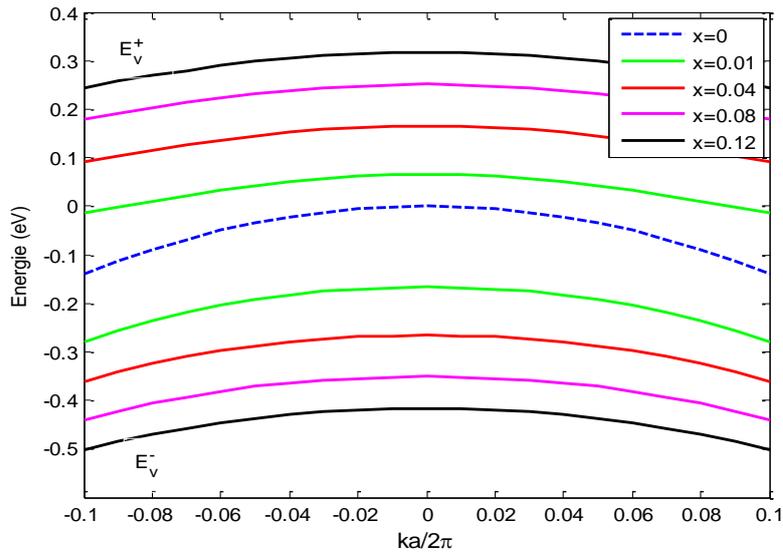


Figure 3.4. Éclatement de la bande de valence en fonction de la concentration de l'antimoine.

3.6 Energies dans bandes interdites

La figure 3.5, illustre la variation des bandes interdites trou lourd et trou léger dans les deux cas de substrat (GaAs et AlSb).

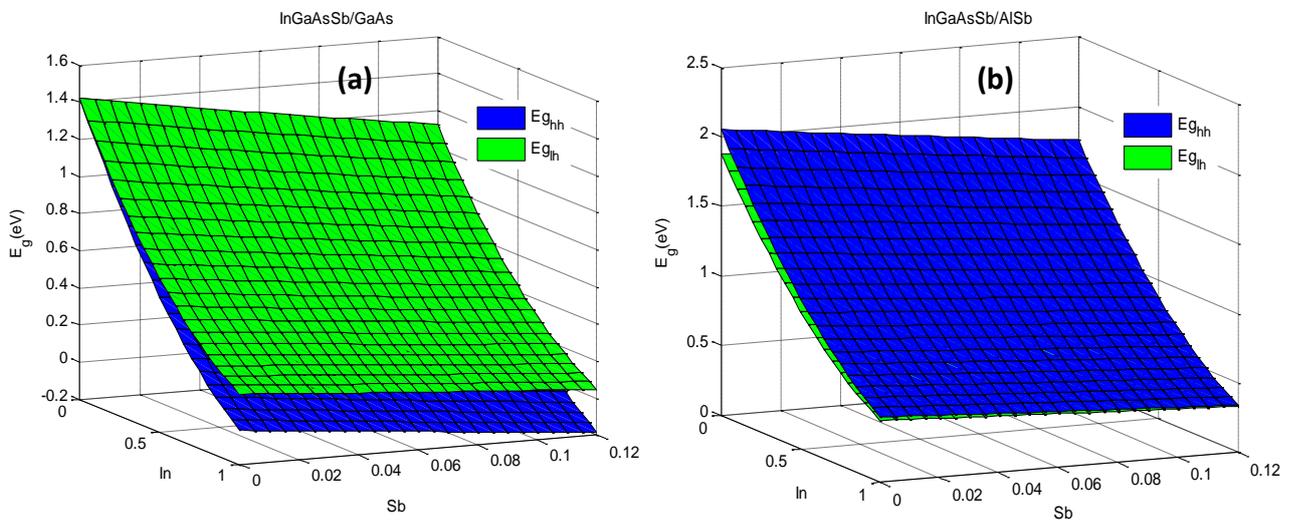


Figure 3.5. Variation du gap de la couche InGaAsSb en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb.

Pour la première structure (figure 3.5-a), les deux gaps trou lourd $E_{g_{hh}}$ et trou léger $E_{g_{lh}}$ diminuent avec l'incorporation de l'indium et l'antimoine mais la réduction du gap en fonction de la concentration d'In est nettement importante qu'avec la variation de l'antimoine. Aussi, le gap trou lourd est toujours inférieur à celui de trou léger à cause

de la contrainte qui est en compression pour toutes les valeurs de In et Sb. A partir de la simulation présentée par la figure 3.5-b, on a une réduction de $E_{g_{hh}}$ et $E_{g_{lh}}$ en fonction de la variation des concentrations de In et Sb, mais contrairement de la première structure, cette fois-ci le gap trou lourd est supérieur à celui de trou léger quel que soit les valeurs des concentrations de l'indium et de l'antimoine d'un alliage InGaAsSb, cela est expliqué par la présence d'une contrainte en tension pour toutes les valeurs x, y.

3.7 Barrières de potentiel

La figure 3.6, illustre la variation des barrières de potentiel créées à l'interface de contact entre la couche active InGaAsSb et les deux substrats GaAs et AlSb en fonction des concentrations de l'indium et l'antimoine.

Dans la première structure, les variations d'In et de Sb augmentent simultanément la barrière de la bande de valence et la bande de conduction. Pour $(x, y) = (0,0)$ les deux barrières égales 0 car on a le GaAs/GaAs et si on varie (x, y) jusqu'à $(1, 0.12)$ la barrière de la bande de conduction augment de $\Delta E_c = 1.6$ eV, et au niveau de la bande de valence la barrière vaut 0.6 eV.

Pour la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, la variation des concentrations de l'indium et de l'antimoine augmente la barrière au niveau de la bande de conduction alors qu'elle diminue la valeur de la barrière de la bande de valence. D'après ces deux simulations, les barrières de potentiel ΔE_c et ΔE_v sont toujours positive quel que soit les concentrations de In et Sb ce qui donne un puits quantique de type I dans les deux structures.

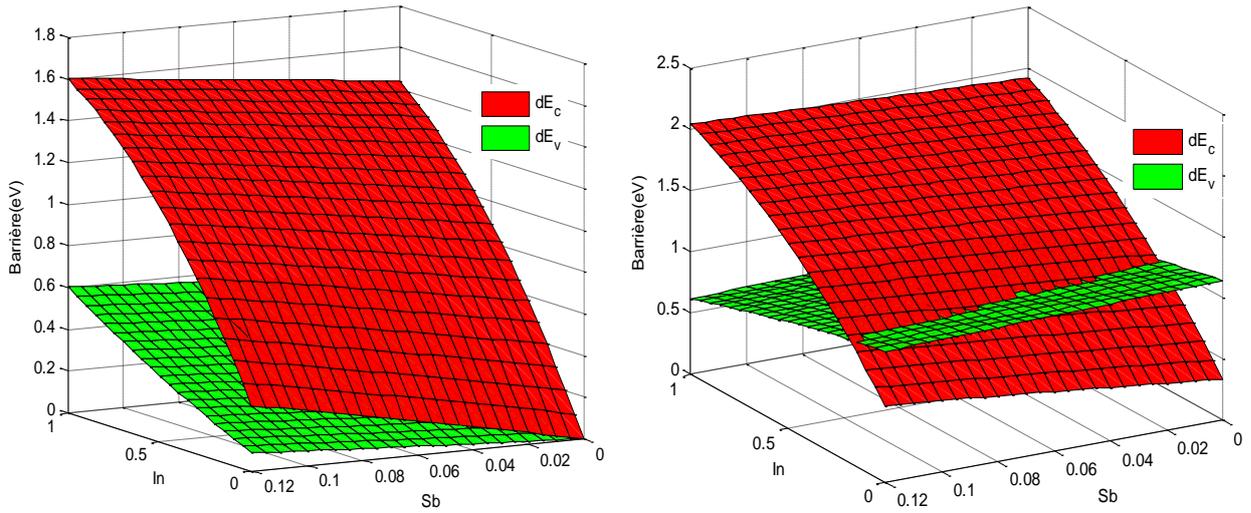
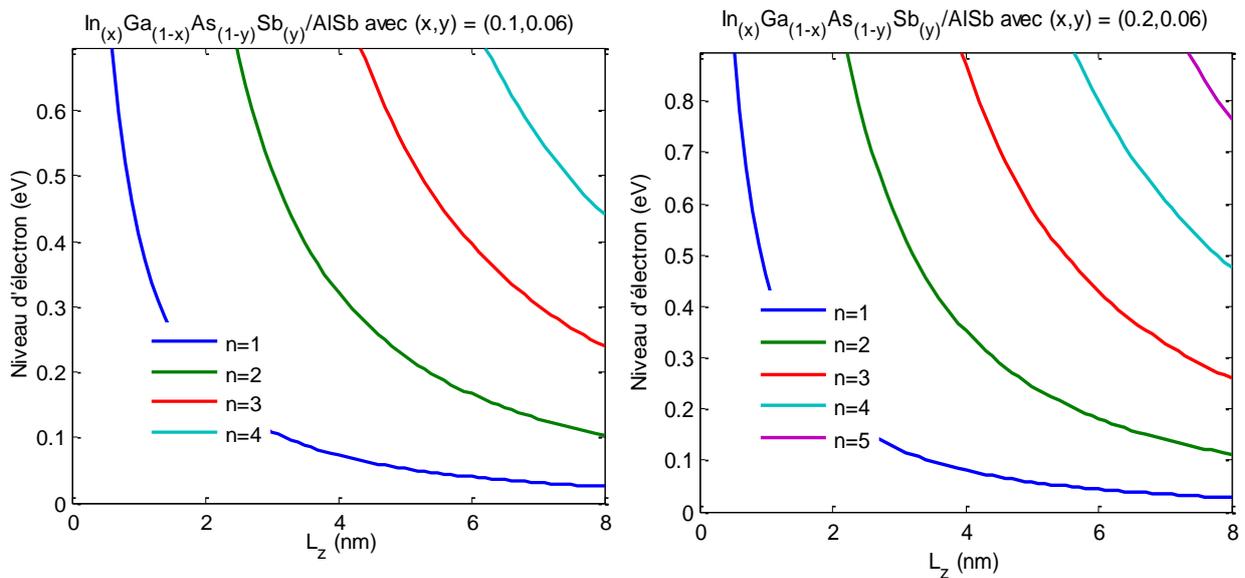


Figure 3.6. Variation barrières de potentiel en fonction des concentrations In et Sb pour un (a) substrat de GaAs et (b) substrat de AlSb.

3.8 Niveaux d'électrons dans les deux puits

3.8.1 Puits quantique InGaAsSb/AlSb

La figure 3.7.a, montre les niveaux de confinement des électrons dans la structure InGaAsSb/AlSb, en fonction de la largeur de puits L_z pour plusieurs valeurs d'Indium (10, 20 et 30%) et avec une concentration $y=0.06$. Sur la figure 3.4.b, on trouve la variation des niveaux de confinement de la même structure mais cette fois on fixe x à 20% et on fait varier y de 8 à 12%.



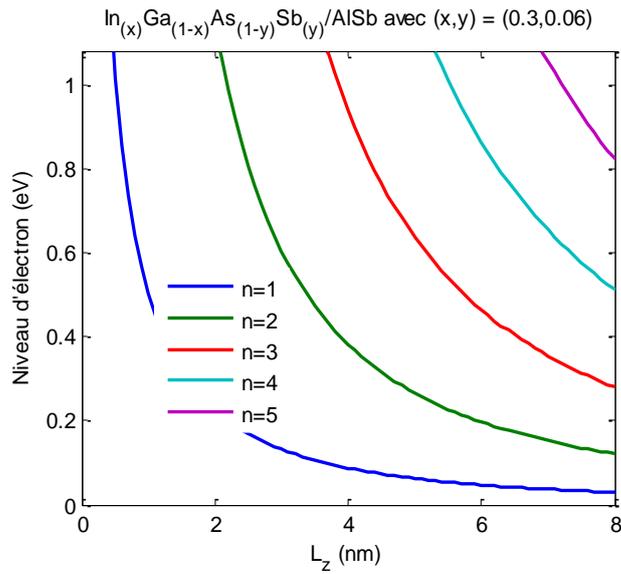
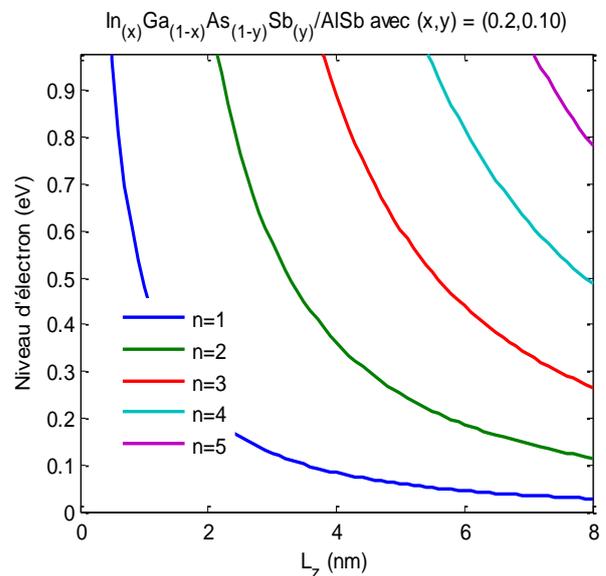
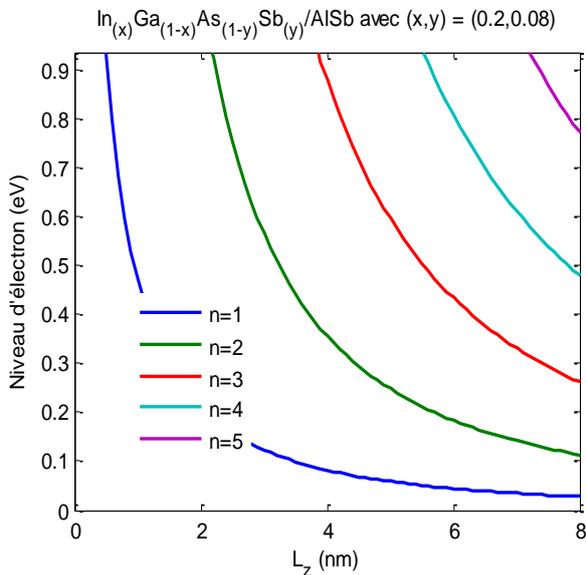


Figure 3.7.a Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec y= 0.06.

Dans cette simulation, on remarque que le niveau d'électron diminue avec l'élargissement de puits quantique et avec l'augmentation de la concentration d'In. Les barrières de potentiel accroissent à cause de la réduction du gap par l'incorporation de l'indium et l'antimoine dans la couche active InGaAsSb, ce qui rend le puits quantique plus profond et favorise l'apparition de nouveaux niveaux de confinement. Pour l'indium, qui réduit considérablement le gap du matériau quaternaire on a quatre (04) niveaux pour x égal 10% et ce nombre passe à cinq (05) avec x= 20 et 30%. Contrairement à l'indium, l'effet de l'antimoine sur le gap est très faible (petite diminution de E_g) ce qui donne cinq (05) niveaux de confinement quel que soit la concentration de Sb (figure 3.7.b).



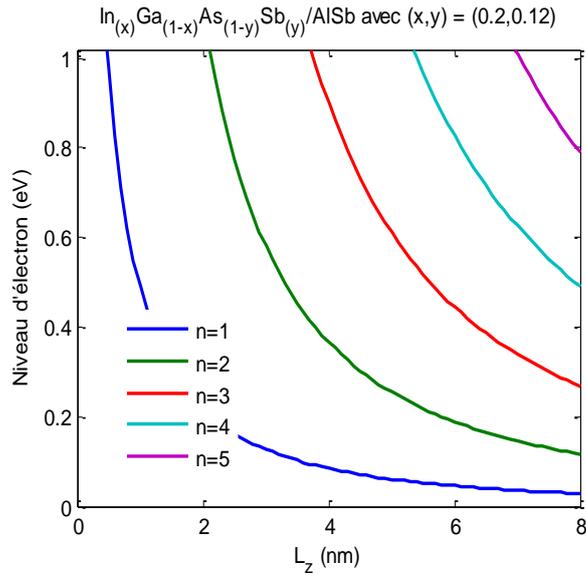
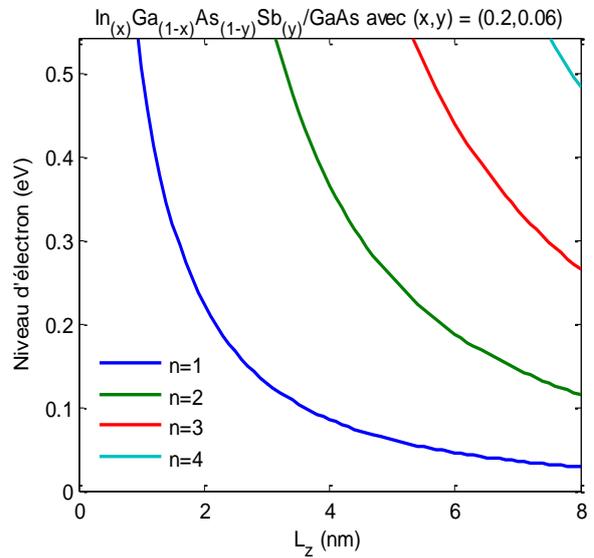
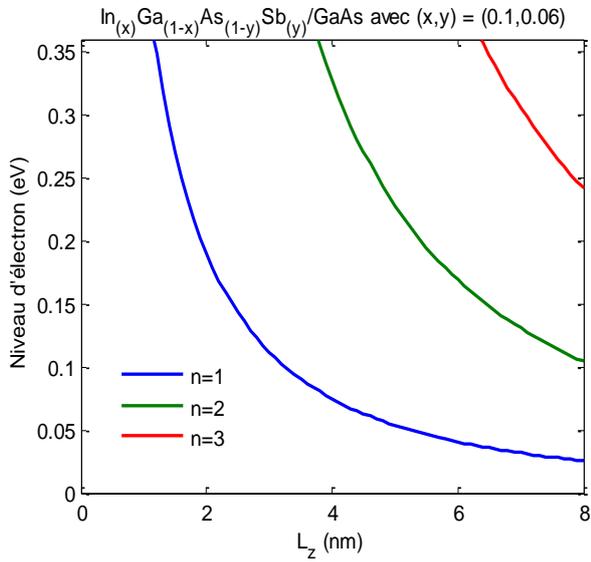


Figure 3.7.b Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x = 0.2$.

3.8.2 Puits quantique InGaAsSb/GaAs

Les figures 3.8.a et 3.8.b, présentent les résultats de simulation des niveaux de confinement des électrons dans le puits InGaAsSb/GaAs.



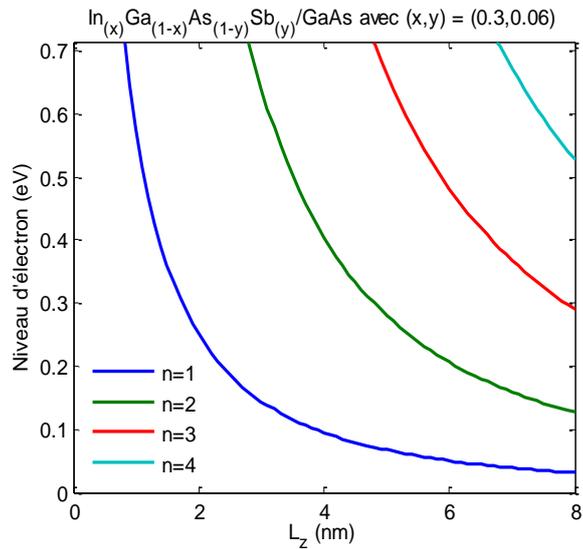


Figure 3.8.a Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec y= 0.06.

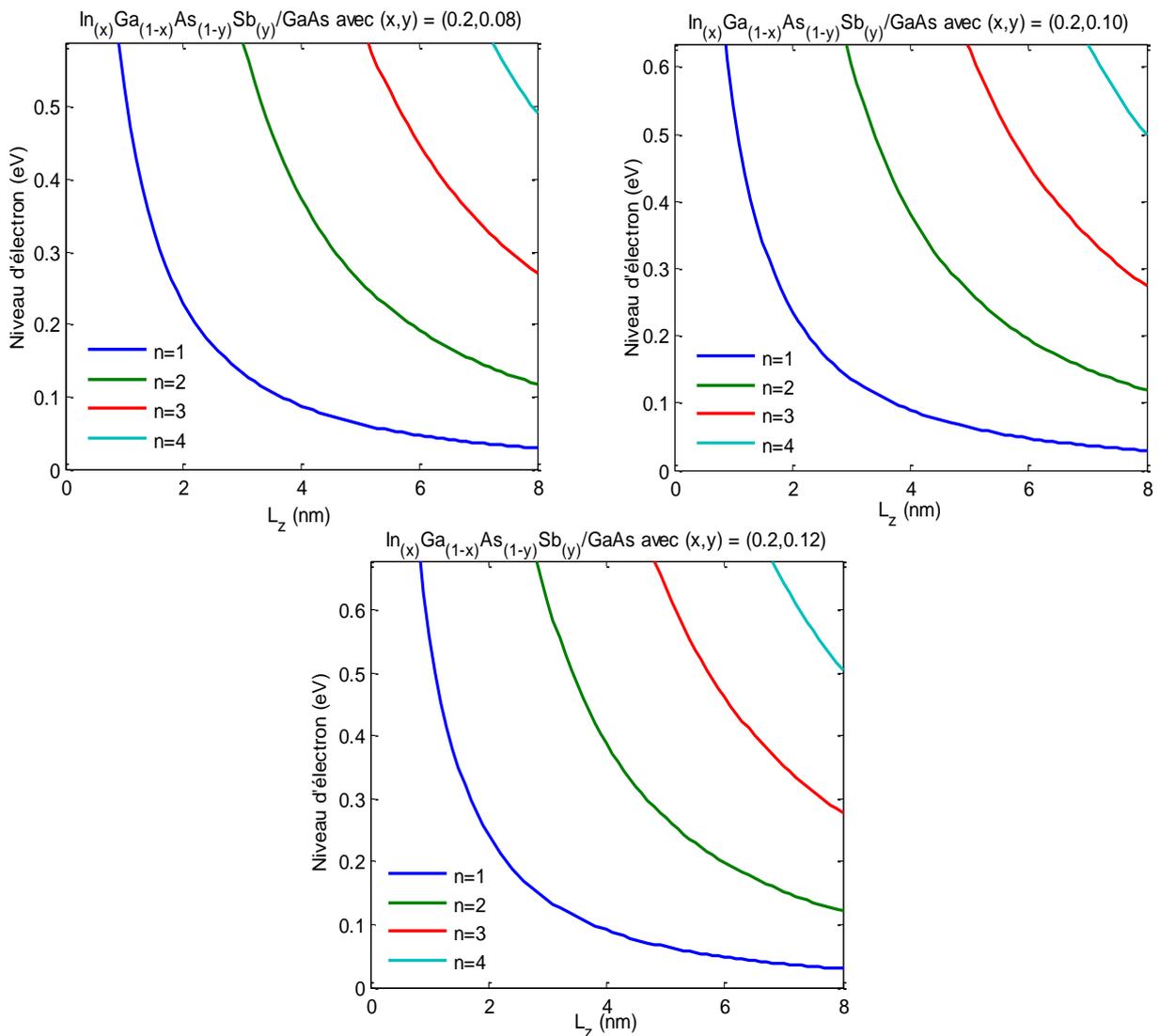


Figure 3.8.b. Variation des niveaux énergétiques des électrons dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec x= 0.20.

Sur la figure 3.8.a, le niveau de confinement décroît avec l'élargissement de puits et l'augmentation de la concentration de l'indium. A une concentration de Sb égale 6% et pour une x égale à 10%, on a trois (03) niveaux de confinement et pour $x= 20$ et 30%, il apparaisse un quatrième niveau. Ce nouveau niveau est le résultat d'une augmentation de la profondeur de puits par l'introduction de l'indium dans la couche active.

Si on fixe x à 20% et on fait varier y (figure 3.8.b), on a toujours quatre (04) états de confinement avec une légère réduction de leurs niveaux énergétiques. Cette faible réduction énergétique et du au faible effet du Sb sur la bande de conduction de InGaAsSb.

3.9 Niveaux des trous dans les deux puits

3.9.1 Puits quantique InGaAsSb/AlSb

La figure 3.9.a, montre les niveaux de confinement des trous dans la structure InGaAsSb/AlSb, en fonction de la largeur de puits L_z pour plusieurs valeurs d'Indium (10, 20 et 30%) et avec une concentration de Sb $y=0.06$. Sur la figure 3.6.b, on trouve la variation des niveaux de confinement de la même structure mais cette fois on fixe x à 20% et on fait varier y de 8 à 12%.

Dans la première simulation, on remarque que le niveau des trous diminue avec l'élargissement de puits quantique alors qu'il augmentation en fonction de la concentration d'In. La barrière au niveau de la bande de valence, diminue avec l'incorporation de l'indium à cause de la forte contrainte, qui décale la bande de valence de la couche active InGaAsSb vers la bande de valence du substrat AlSb, ce qui réduit la profondeur de puits et rend les énergies de confinement plus espacer (plus importantes).

Sur la deuxième simulation (figure 3.9.b), l'incorporation de l'antimoine décale et éclate la bande de valence en deux sous bande, ce qui réduit encore une fois la barrière de potentiel au niveau de la bande de valence. Pour toutes les concentrations de Sb, on a toujours quatre (04) niveaux avec une légère augmentation des énergies de confinement avec la variation de l'antimoine, cette légère variation est due à l'effet minime de Sb sur la barrière de potentiel.

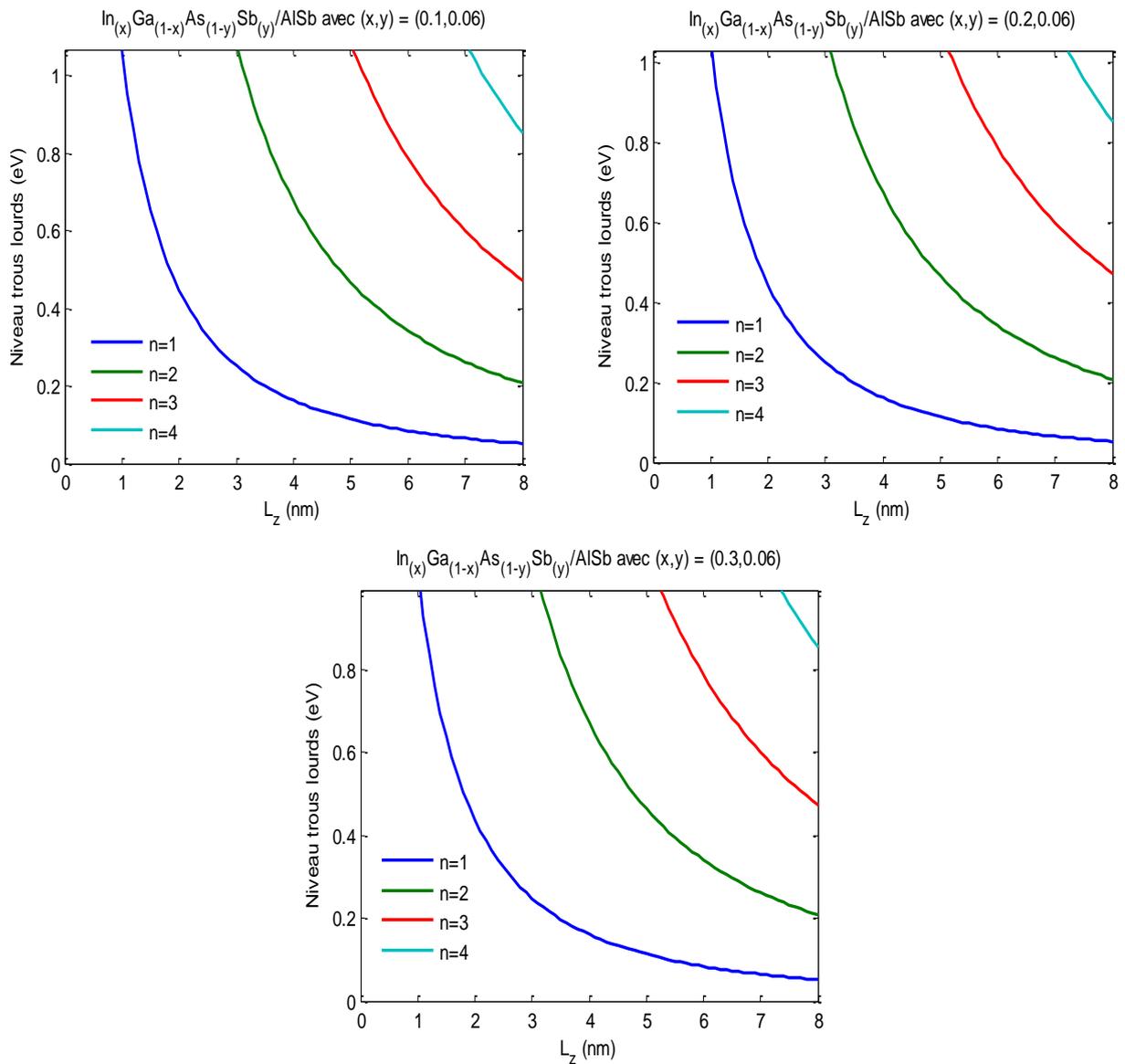
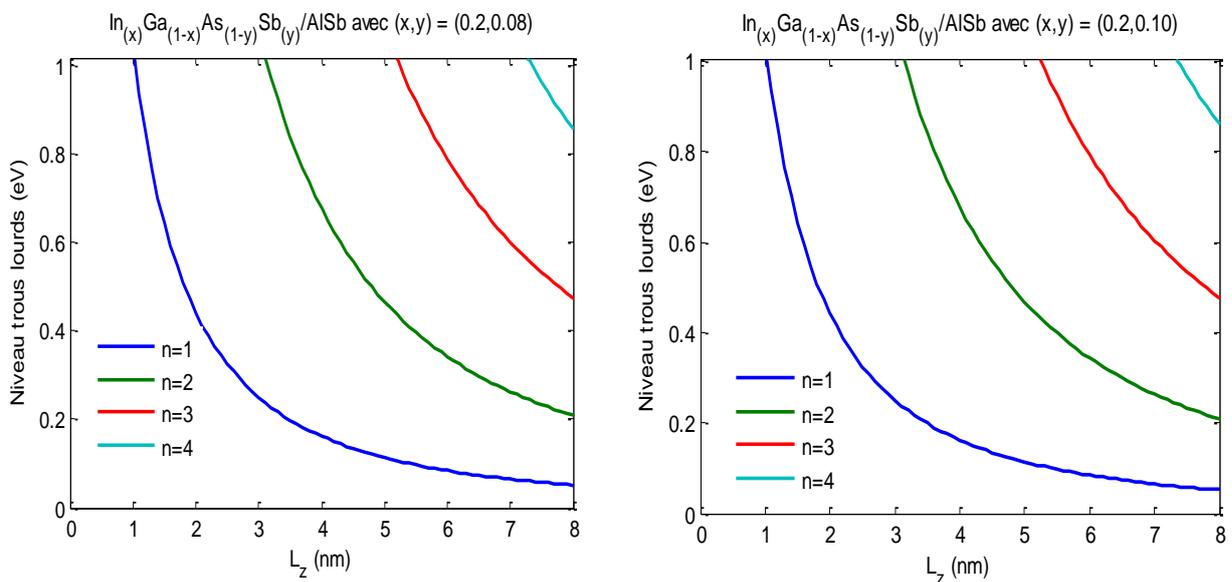


Figure 3.9.a Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/AISb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y = 0.06$.



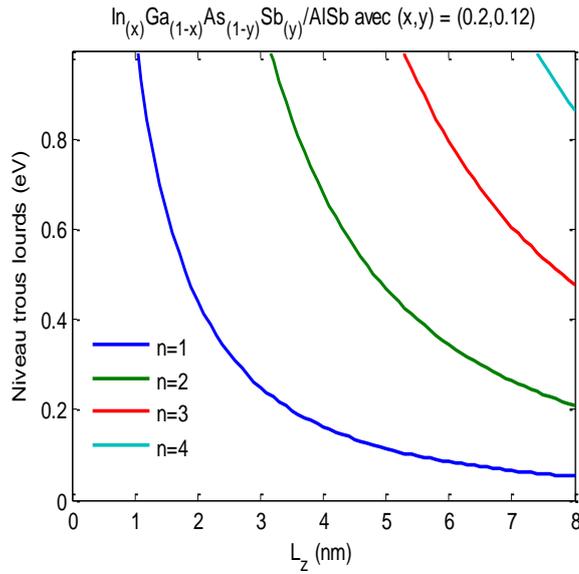
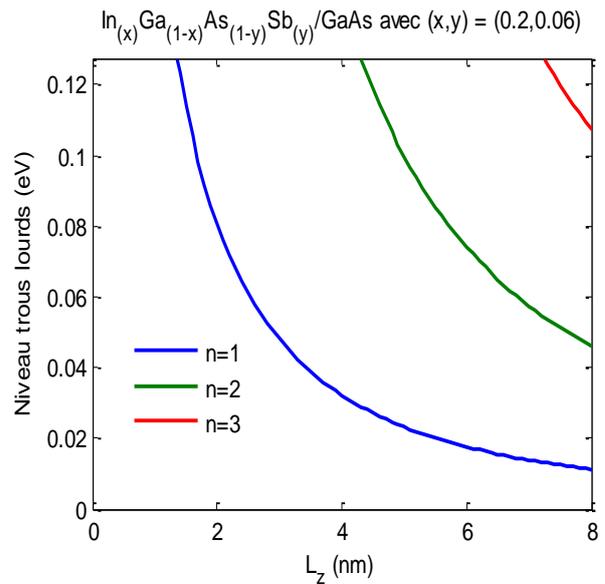
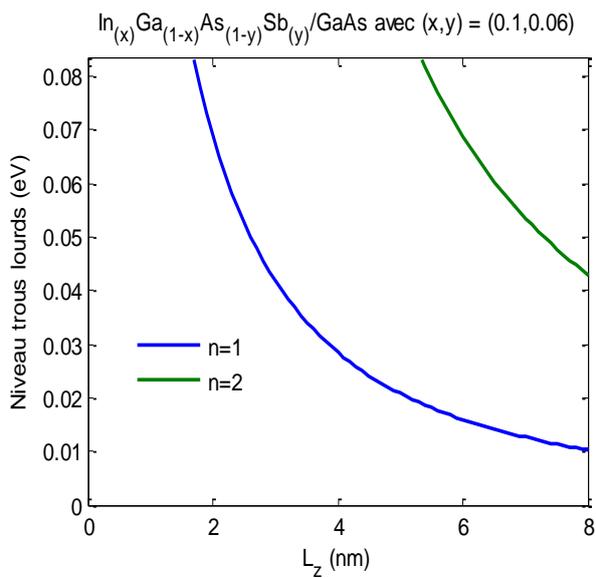


Figure 3.9.b Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/AlSb en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec x= 0.20.

3.9.2 Puits quantique InGaAsSb/GaAs

La figure 3.10.a, illustre les niveaux de confinement des trous dans la deuxième structures InGaAsSb/GaAs, en fonction de la largeur de puits L_z pour plusieurs valeurs d'Indium (10, 20 et 30%) et avec une concentration de Sb $y=0.06$. Sur la figure 3.10.b, on a la variation des niveaux de confinement de la même structure mais cette fois on fixe x à 20% et on vari y de 8 à 12%.



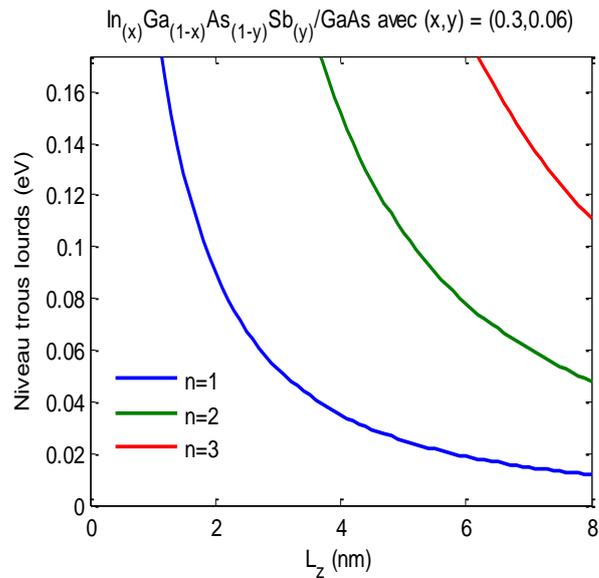
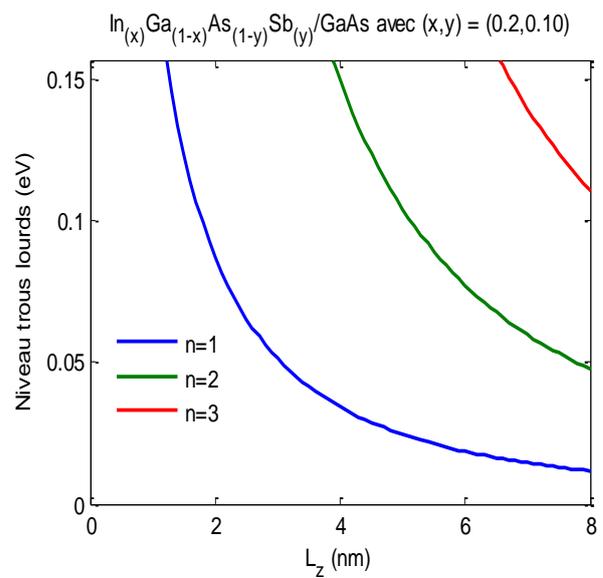
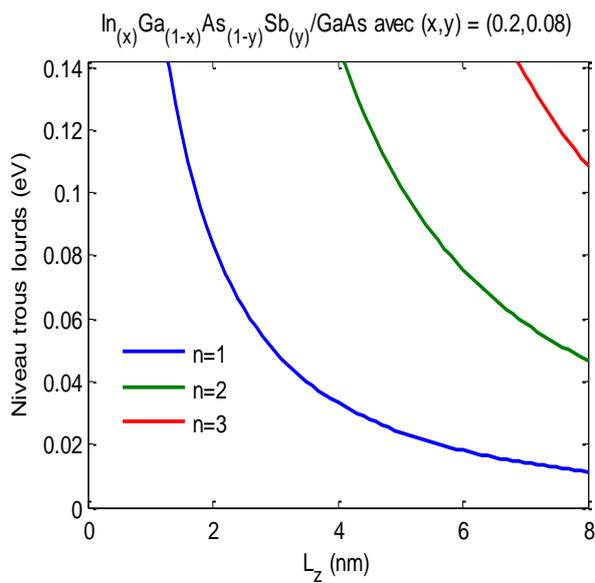


Figure 3.10.a Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits $\text{InGaAsSb}/\text{GaAs}$ en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de x avec $y=0.06$.

Sur les deux simulations, les niveaux de confinement diminuent avec l'élargissement de puits quantique et avec l'augmentation des concentrations de l'indium et l'antimoine dans l'alliage quaternaire InGaAsSb . Pour la première simulation où Sb est fixé à 6%, on a deux (02) pour $x = 10\%$ et lorsque la concentration d' In augmente en aura un nouveau niveau de confinement dû à l'augmentation de la barrière de potentiel.



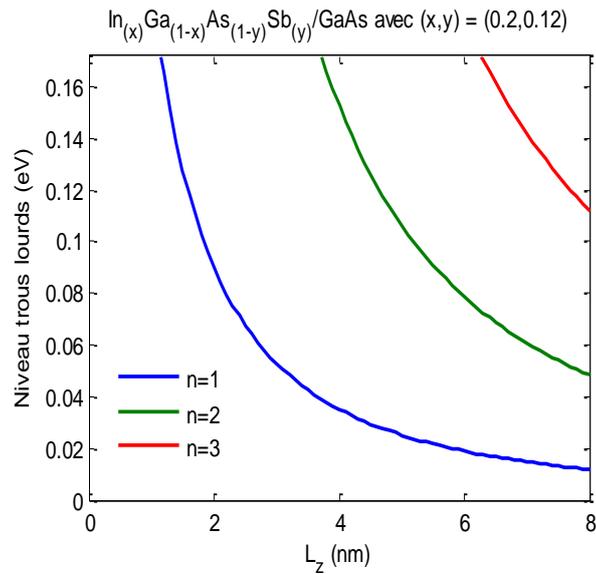


Figure 3.10.b Variation des niveaux énergétiques des trous dans le puits InGaAsSb/GaAs en fonction de sa largeur pour plusieurs valeurs de y avec $x = 0.20$.

Avec la variation de d'antimoine dans la deuxième simulation, on trouve toujours trois (03) niveaux énergétiques car le Sb réduit légèrement le la barrière de potentiel par l'éclatement de la bande de valence du matériau InGaAsSb qui constitue le puits quantique.

3.10 Énergie de transition

La somme des niveaux de confinement des électrons, des trous lourds et l'énergie de la bande interdite du quaternaire donne la valeur de l'énergie libérée par la transition de l'électron de la bande de conduction vers la bande de valence.

3.10.1 Variation de x pour y fixe

La figure suivante, illustre la variation de l'énergie de transition des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb pour plusieurs concentrations de l'indium (10, 20 et 30%) avec une concentration de l'antimoine y égale 0.06.

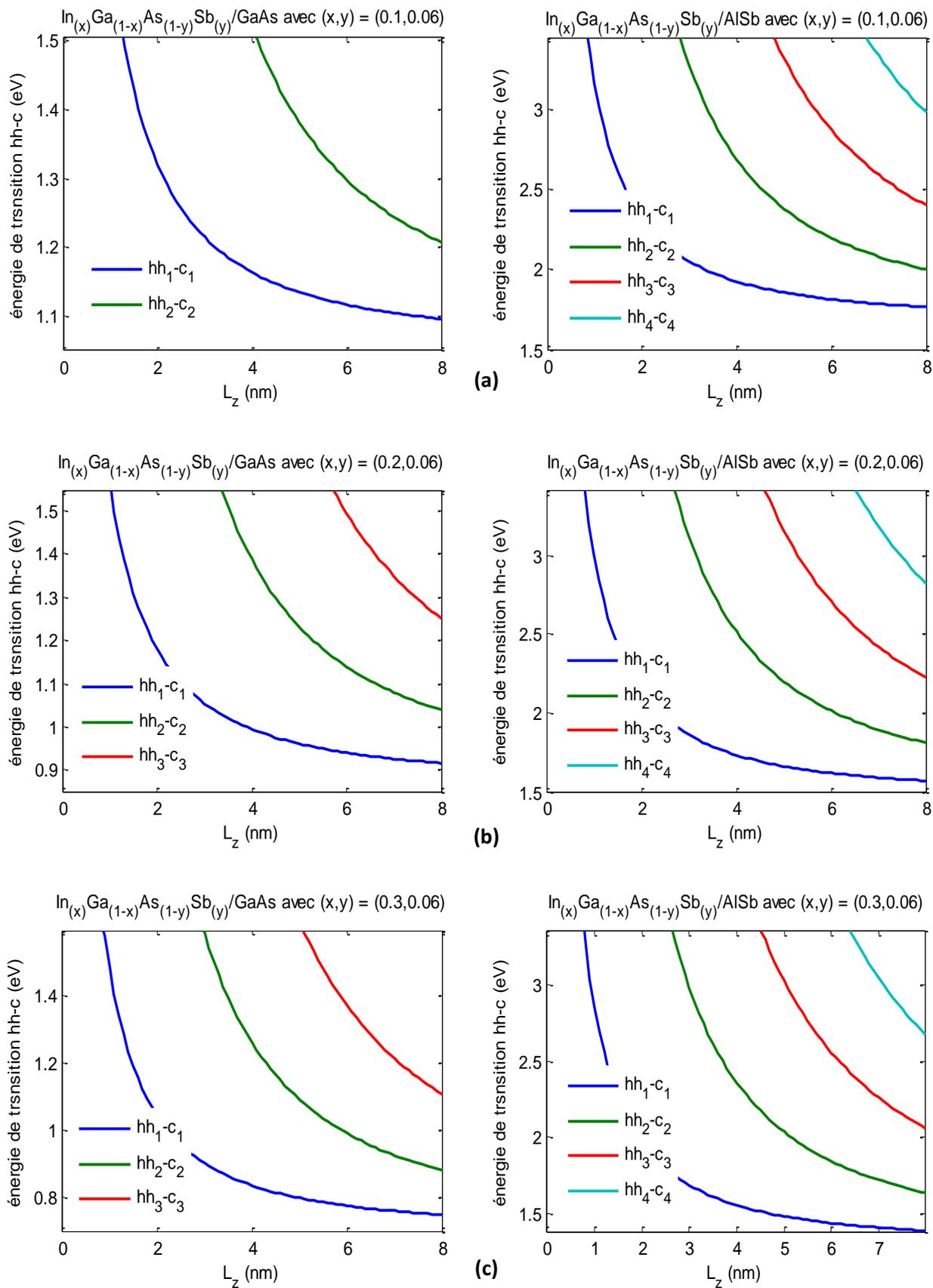


Figure 3.11. Variation de l'énergie de transition en fonction de la largeur de puits pour $y=0.06$ avec (a) $x=0.1$, (b) $x=0.2$ et (c) $x=0.3$.

Dans ces simulations, l'énergie de transition décroît avec l'élargissement de puits cette diminution énergétique est dû à la réduction des niveaux de confinement dans la bande de conduction et la bande de valence avec l'élargissement de puits.

L'incorporation de l'indium dans l'alliage réduit le gap de la couche active par l'effet de la contrainte ce qui augmente la barrière dans la première structure InGaAsSb/GaAs et fait apparait de nouveaux niveaux de confinement donc de nouvelle énergie de transition. L'énergie dégagée par une transition entre deux niveaux éloignés est plus importante par rapport aux énergies dus de transitions entres des niveaux proches. Pour la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, l'effet de l'indium sur les barrières de potentiel est presque négligeable d'où on trouve quatre (04) énergies de transition quel que soit la concentration d'In. Si on compare les deux structures, on peut facilement remarquer que les énergies de transition dans la première structure sont nettement faibles aux celles de la structure InGaAsSb/AlSb, ce qui donne une probabilité de transition dans la structure InGaAsSb/GaAs plus importante que dans la structure InGaAsSb/AlSb.

3.10.2 Variation de y pour x fixe

La figure 3.12, montre la variation de l'énergie de transition dans les deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb pour plusieurs concentrations de l'antimoine (8, 10 et 12%) avec une concentration de l'indium x égale 0.20.

L'énergie de transition décroît avec l'élargissement de puits cette diminution énergétique est due à la réduction des niveaux de confinement dans le puits. L'introduction de l'antimoine réduit légèrement le gap et les barrières de potentiel de la couche active InGaAsSb, de cet effet et dans la première et la deuxième structure nous avons respectivement, trois (03) et quatre (04) niveau énergétique de transition quel que soit la valeur y de l'antimoine.

La probabilité de transition dans la structure InGaAsSb/GaAs est plus importante que dans la deuxième structure InGaAsSb/AlSb car les niveaux de confinement dans les deux bandes (valence et conduction) dans la première structure sont plus proches que dans la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, ce qui favorise et facilite la transition des électrons de la bande de conduction vers la bande de valence après libration d'énergie sous forme de photons.

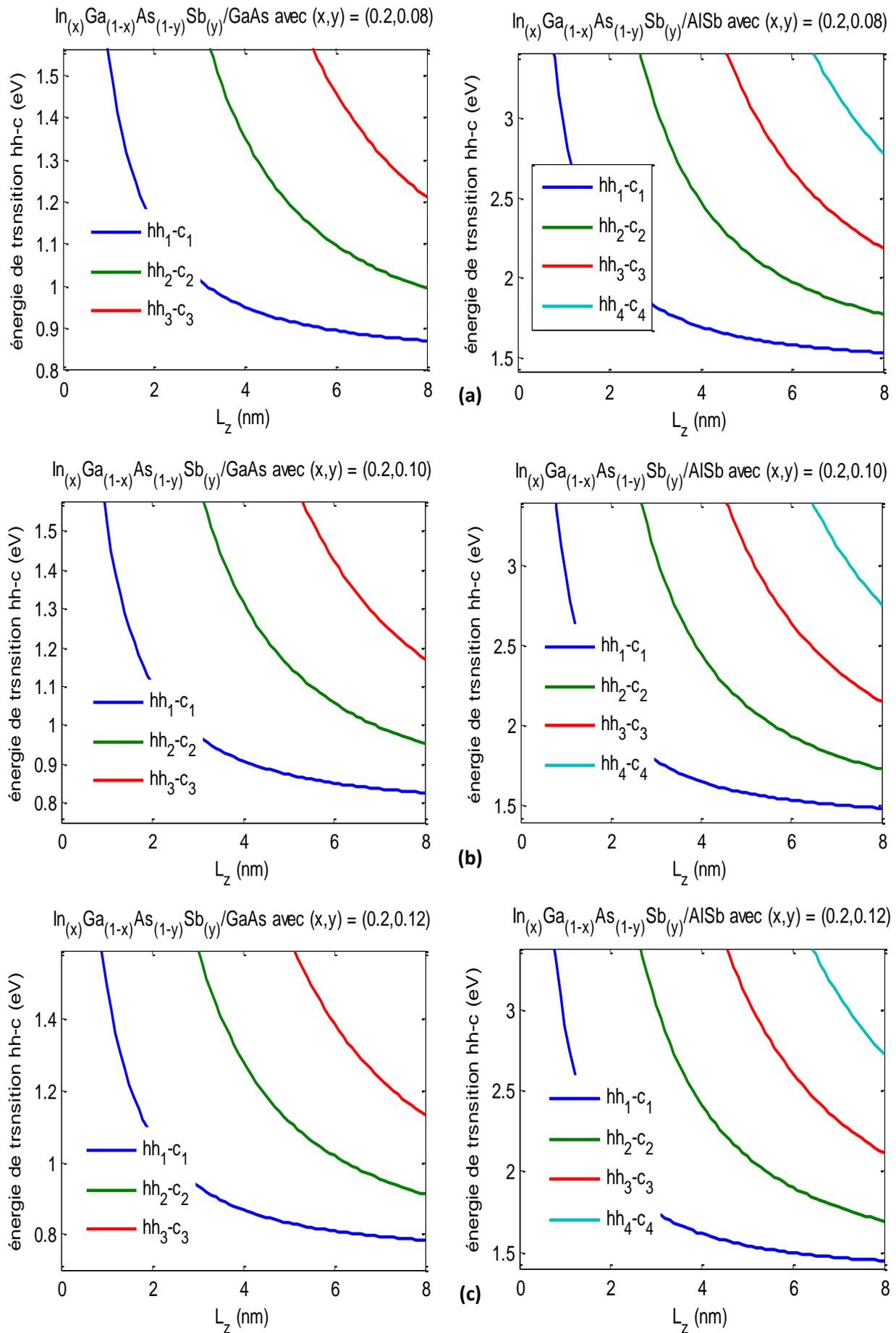


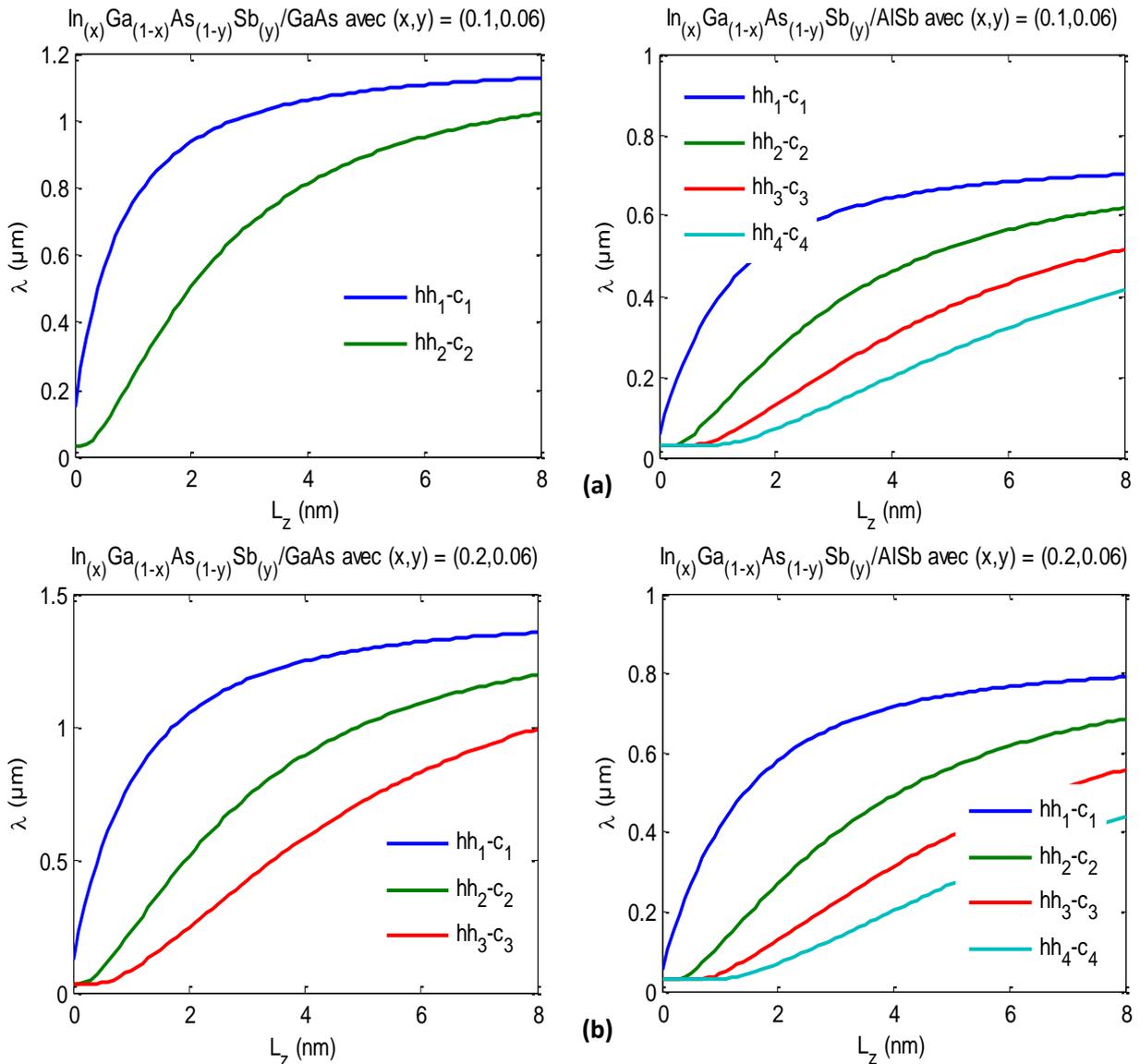
Figure 3.12. Variation de l'énergie de transition en fonction de la largeur de puits pour $x=0.20$ avec (a) $y=0.08$, (b) $y=0.10$ et (c) $y=0.12$.

3.11 Longueur d'onde d'émission

3.11.1 Variation de x pour y fixe

La simulation représentée par la figure 3.13.a, montre la variation de la longueur d'onde d'émission des deux structures en fonction de la largeur de puits L_z pour plusieurs concentrations de l'indium ($x= 10, 20$ et 30%) et y fixe à 6% .

Dans les deux structures, on remarque que la longueur d'onde augmente avec l'élargissement de la couche active dans les premiers nanomètres, puis elle rentre dans un régime de saturation. Ce phénomène, est expliqué par l'entassement des niveaux de confinement dans les deux puits jusqu'ils devineront au même niveau de les bande de conduction et de valence du matériau de puits InGaAsSb.



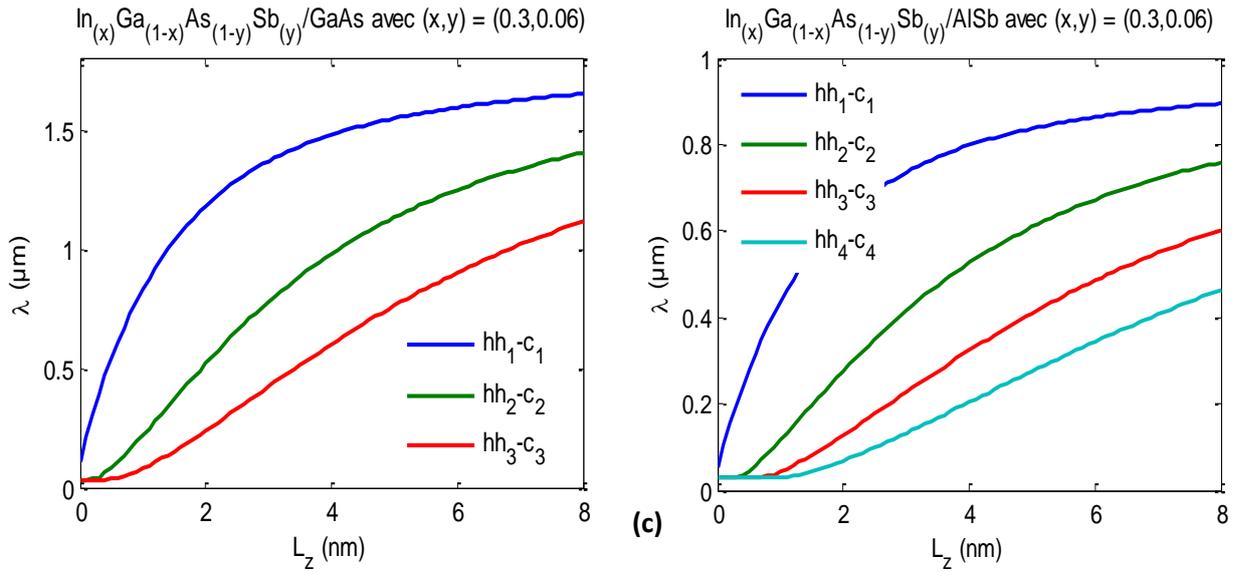


Figure 3.13.a Variation de la longueur d'émission en fonction de la largeur de puits quantique pour $y=0.06$ avec (a) $x=0.10$, (b) $x=0.20$ et (c) $x=0.30$.

Si on compare les longueurs d'ondes émises par les deux structures, on remarque que les longueurs de la première structure InGaAsSb/GaAs ont des valeurs plus importantes que celles de la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, cette différence est causée par les faibles énergies de transition existant dans le premier puits contrairement au deuxième puits qui donne des niveaux d'énergie plus importants.

Les deux structures sont capables de délivrer le $0.85 \mu\text{m}$, mais pour les 1.33 et $1.55 \mu\text{m}$ seule la première structure qui offre ces valeurs de longueurs d'ondes.

3.11.2 Variation de y pour x fixe

La figure 3.13.b, illustre la variation de la longueur d'onde d'émission des deux structures en fonction de la largeur de puits L_z pour plusieurs concentrations d'antimoine ($y=8, 10$ et 12%) et x fixe à 20% .

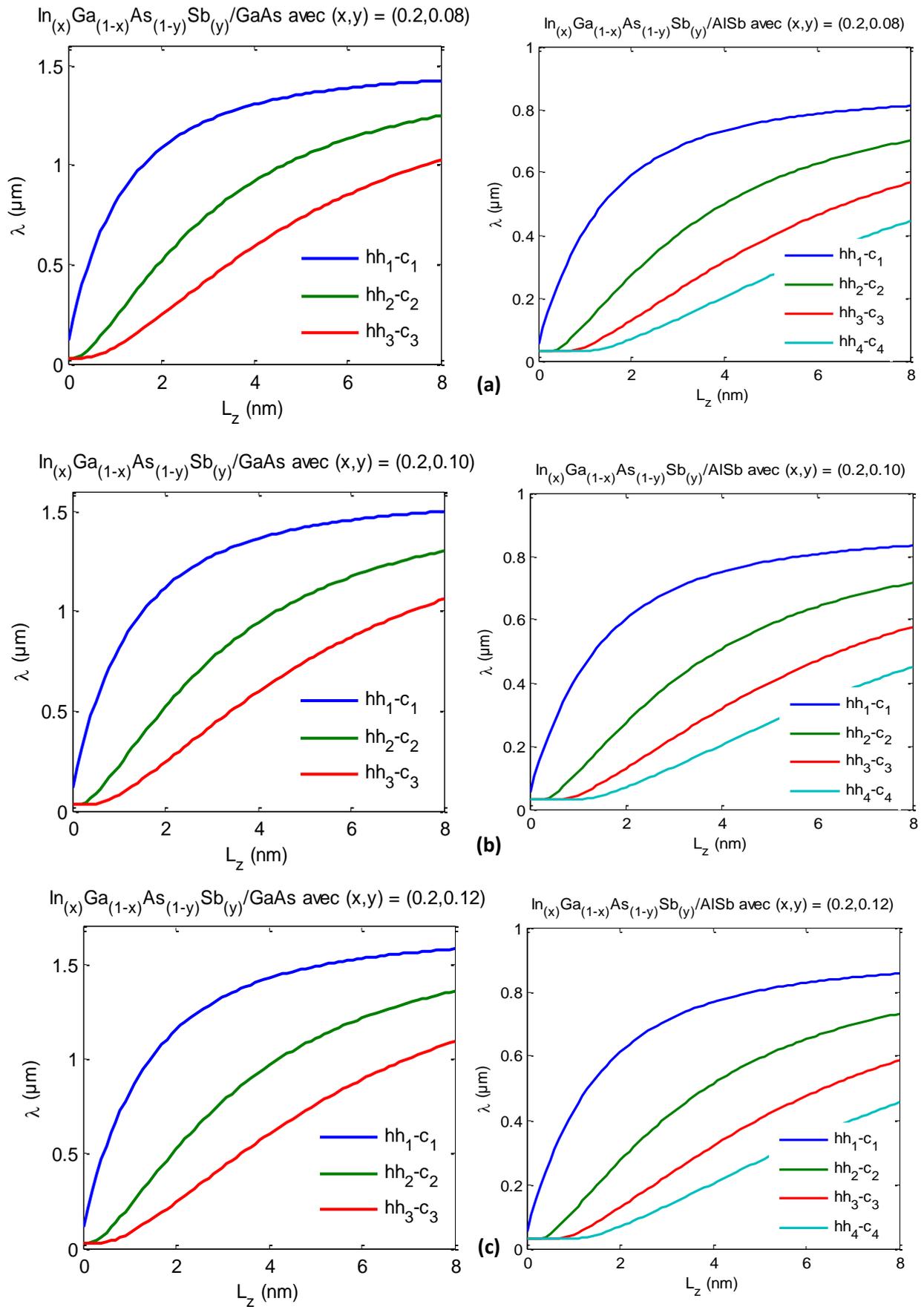


Figure 3.13.b Variation de la longueur d'émission en fonction de la largeur de puits quantique pour $x = 0.20$ avec (a) $y = 0.08$, (b) $y = 0.10$ et (c) $y = 0.12$.

Pour les deux structures, la longueur d'onde augmente en fonction de l'argeur depuis et après quelque μm elle atteind la saturation à cause de rapprochement des niveaux de confinement à la bande de conduction et la bande de valence de l'alliage quaternaire InGaAsSb.

Si on compare les longueurs d'ondes émis par les deux structures, on remarque que les longueurs de la première structure InGaAsSb/GaAs ont des valeurs plus importantes que celles de la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, cette déférence est causée par les faibles énergies de transition existant da le premier puits contrairement au deuxième puits qui donne des niveaux d'énergie plus importante.

3.12 Gain optique

3.12.1 Gain avec la variation de x

La figure 3.14, illustre la variation du gain optique des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb en fonction de λ pour plusieurs concentrations d'indium avec une concentration d'antimoine égale 08 %.

Dans cette simulation, on remarque que le gain optique décale vers des longueurs d'onde d'émissions plus supérieures avec l'incorporation de l'indium, ce décalage spectral est causé par la réduction de la bande interdite de la couche active InGaAsSb du fait de l'augmentation den la fraction x.

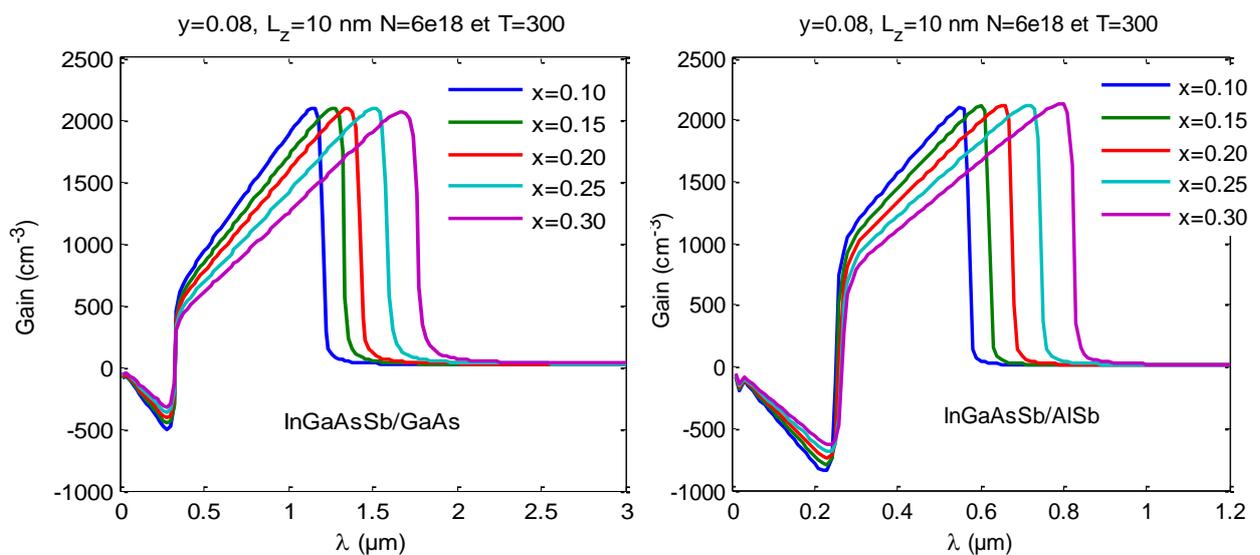


Figure 3.14. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations d'indium avec $y = 0.08$.

3.12.2 Gain avec la variation de y

La simulation suivante, montre la variation du gain optique des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb en fonction de λ pour plusieurs concentrations d'antimoine avec une concentration d'Indium égale 20 %.

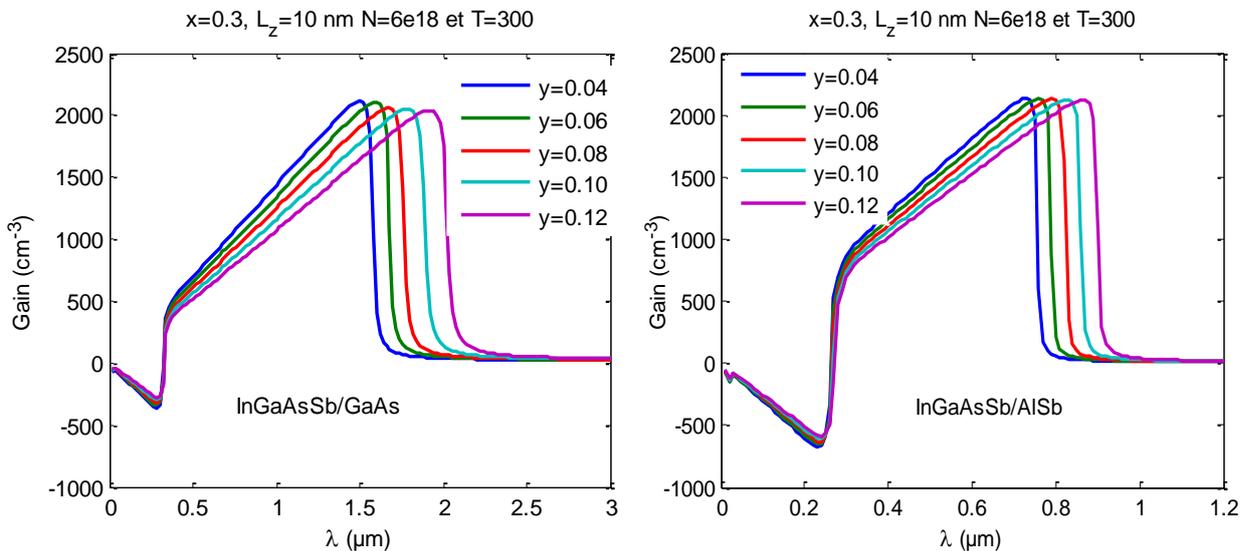


Figure 3.15. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs concentrations d'antimoine avec $x = 0.20$.

Sur cette figure, on peut constater que le gain optique décale vers des longueurs d'onde supérieures avec l'incorporation de l'antimoine qui induit une réduction du gap de la couche active InGaAsSb. Si on compare les gains des deux structures, on peut remarquer que le gain dépasse légèrement les $0.85 \mu\text{m}$ dans la deuxième structure alors qu'il peut atteindre les $2 \mu\text{m}$ dans la première, cette différence confirme la simulation des énergies de transition (figure 3.11 et figure 3.12) d'où on a trouvé après comparaison, que les énergies au niveau du puits InGaAsSb/GaAs sont nettement inférieures au celles du puits InGaAsSb/AlSb.

3.12.3 Gain en fonction de l'injection

La figure 3.16, représente la variation du gain en fonction de longueur d'onde des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb pour le couple $(x, y) = (0.2, 0.08)$ et avec une largeur de puits égale 10 nm.

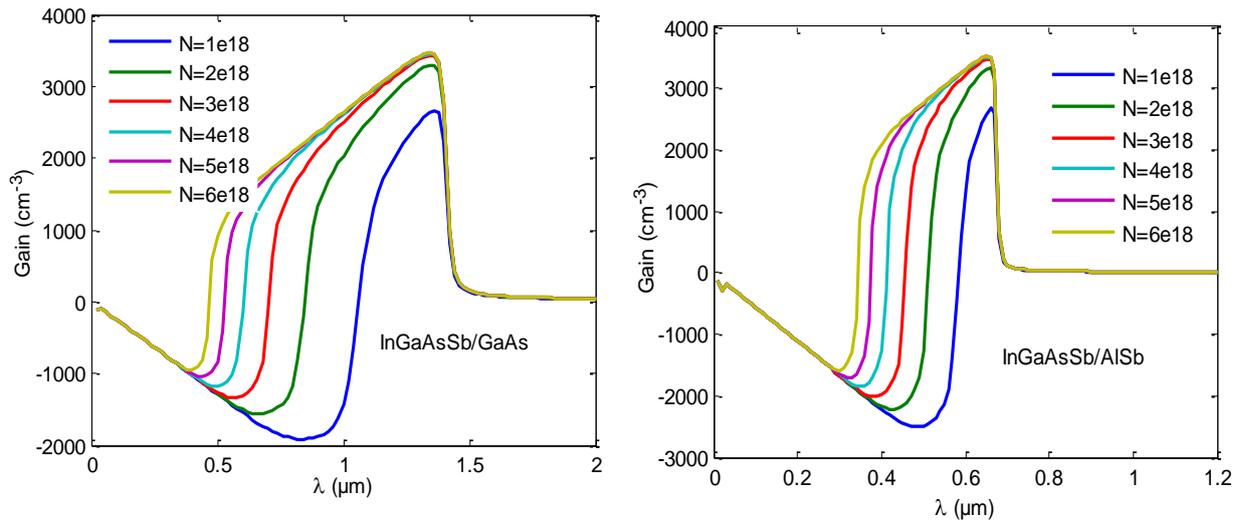


Figure 3.16. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs Injection N avec $(x, y) = (0.2, 0.08)$ et $L_z = 10 \mu\text{m}$.

Avec l'augmentation de la densité d'injection on a un élargissement de la gamme d'émission à cause de l'activation des niveaux de confinement supérieure dans la bande de conduction et un accroissement de l'amplitude du gain optique pour qu'il atteigne la saturation entre $N = 3$ et $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour les deux structures.

3.12.4 Gain en fonction du largeur de puits

La simulation présentée sur la figure 3.17, montre l'évolution du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs largeurs de puits avec $(x,y) = (0.2, 0.08)$ et $N = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Si on augmente l'épaisseur de la couche active InGaAsSb, on constate dans les deux structures un élargissement du gain optique avec une réduction de leur amplitude. L'augmentation de la largeur du puits quantique provoque la réduction de l'énergie de transition et induit l'apparition de nouveaux niveaux de confinement ce qui crée de nouvelles longueurs d'onde d'émission donc un spectre d'émission plus large. En revanche, si on garde la même densité d'injection N , l'amplitude du gain est réduite car cette densité va être confinée sur les nouveaux niveaux de confinement.

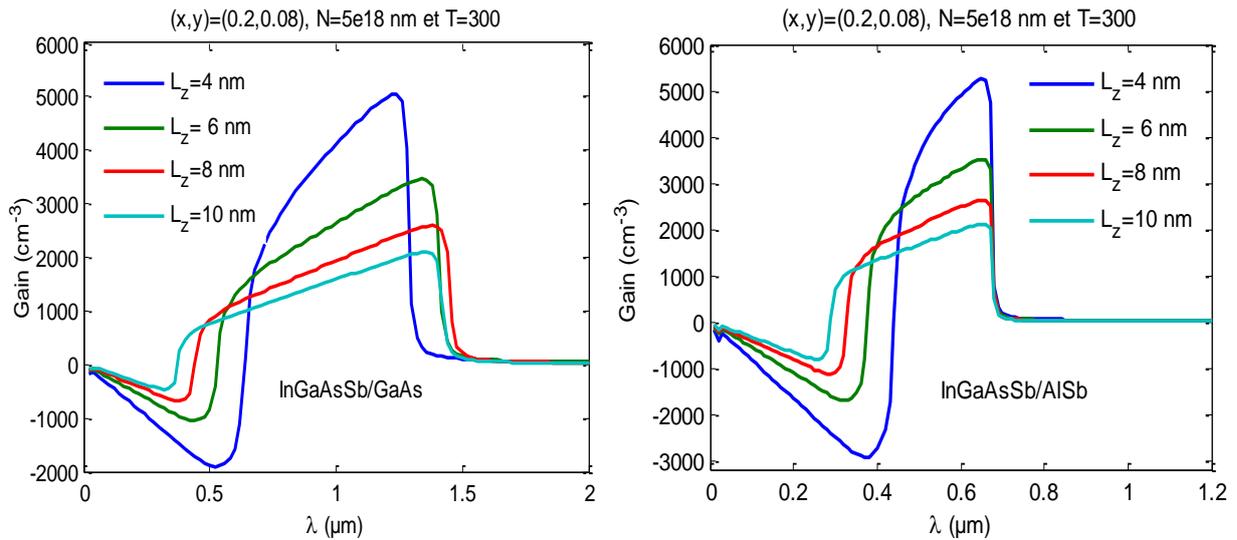


Figure 3.17. Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs largeurs de puits avec $N = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $(x, y) = (0.2, 0.08)$ et $L_z = 10 \text{ nm}$.

3.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des concentrations de l'antimoine et l'indium dans la couche active InGaAsSb, la longueur de puits quantique ainsi que l'injection afin d'avoir des longueurs d'onde d'émission exploitables par la télécommunication avec un gain optique important.

Dans la première partie de ce chapitre, on a étudié l'effet de l'introduction d'In et Sb sur les propriétés physiques des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb :

- L'incorporation de In et Sb augmente la contrainte créée entre la couche active InGaAsSb avec le premier substrat GaAs alors qu'elle réduit cette dernière sur le substrat AlSb, l'alliage InGaAsSb est soumis à une contrainte en compression sur le GaAs et en tension sur le AlSb, la contrainte créée avec le AlSb est plus importante que celle créée avec GaAs.
- La simulation de l'épaisseur critique montre que la couche active InGaAsSb sur le AlSb et sur le GaAs peut avoir une grande épaisseur sans avoir distorsion à l'interface de contact.
- L'évolution des barrières de potentiel montre que pour les deux structures nous avons un puits quantique de type I quel que soit les concentrations de l'indium et l'antimoine dans la couche active InGaAsSb.

Dans la deuxième partie, on a procédé à une quantification des niveaux d'énergie et la simulation de l'effet de la contrainte sur le gap de la couche active dans le but de déterminer l'énergie de transition et la longueur d'onde d'émission :

- La contrainte décale les bandes d'énergie ce qui donne de gap trous lourds et trous légers avec $E_{g_{hh}} > E_{g_{lh}}$ pour la structure InGaAsSb/AlSb et $E_{g_{lh}} > E_{g_{hh}}$ pour la structure InGaAsSb/GaAs, ces deux gaps diminuent avec la contrainte et aussi par l'introduction de l'antimoine qui favorise l'éclatement de la bande de valence en deux sous bande.

- Les niveaux de confinement diminuent avec l'élargissement de puits quantique ainsi qu'avec l'augmentation des densités d'In dans le puits. Alors que le nombre de niveaux de confinement augmente par l'élargissement de puits et la variation de Sb.

- Comme les niveaux de confinement diminuent avec l'élargissement de puits aussi la bande interdite de la couche active avec la variation d'In, l'énergie de transition diminue aussi car égale à la somme de ces énergies, cette réduction énergétique décale λ vers des valeurs supérieures.

La troisième et la dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la simulation et l'interprétation du gain optique des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb :

- Pour la variation de la concentration d'In, le gain de la structure InGaAsSb/GaAs dépasse les $2\mu\text{m}$ alors qu'il ne franchisse pas le $1\mu\text{m}$ pour la structure InGaAsSb/AlSb. Ces décalages sont causés par la diminution de l'énergie de la bande interdite de la couche active. L'antimoine élargie aussi la gamme d'émission par la réduction des niveaux de confinement.

- L'injection augmente l'amplitude du gain optique ce qui résulte une puissance d'émission plus importante. Dans les deux structures on a constaté un élargissement de la gamme d'émission pour des densités d'injections importantes, ce qui a été expliqué par l'activation de niveaux de confinement supérieurs.

- Avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche active, on obtient un décalage du gap vers les longueurs d'onde supérieures, ce décalage est dû à la réduction de l'énergie de transition avec la variation de l'épaisseur L_z . Aussi l'élargissement de puits diminue les niveaux de confinement ce qui provoque l'apparition de nouvelles énergies de transition donc de nouvelles longueurs d'onde d'émission.

Si on compare les deux structures, on peut constater que :

- Avec la variation de la concentration d'In et Sb dans la couche active et l'élargissement de puits dans les deux structures, nous avons trouvé que la gamme d'émission de la structure InGaAsSb/GaAs est toujours supérieure à celle d'InGaAsSb/AlSb. Aussi la structure InGaAsSb/GaAs couvre les longueurs d'onde exploitées dans la télécommunication optique avec une amplitude de gain plus importante que celle d'InGaAsSb/AlSb qui ne dépasse pas le $1\mu\text{m}$, ce qui favorise l'utilisation de substrat GaAs.

Pour les mêmes concentrations d'In et Sb, la première structure InGaAsSb/GaAs donne une gamme d'émission plus importante et avec une épaisseur de puits plus faible que la deuxième structure InGaAsSb/AlSb, donc une quantité de matériau quaternaire InGaAsSb utilisé plus faible, ce qui réduit le prix de la première structure par rapport à la deuxième et favorise son exploitation.

Conclusion générale

Un laser à base de semi-conducteur III-V qui atteint les longueurs d'onde d'émission exploitable dans la fibre optique, représente un support privilégié dans le domaine des télécommunications à haut débit et à une grande distance, dans les applications aéronautiques et dans les transmissions de données en milieu perturbé.

En abordant notre travail de fin d'études, l'objectif primordial, motivé par les caractéristiques fondamentales des matériaux III-V, était d'étudier, optimiser et simuler un laser à base de deux hétérostructures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb basé sur des différentes concentrations d'indium et d'antimoine pour application dans les télécommunications optiques. Des résultats impressionnants sont obtenus et qui sont en bon accord avec les travaux sur les supports de transmission par fibre optique avec une nouvelle hétérostructure.

Nous avons tout d'abord présenté les différents types de laser et leurs domaines d'applications, nous avons ainsi évoqué le principe de fonctionnement du laser et l'intérêt des semi-conducteurs III-V dans le domaine optoélectronique.

Ensuite, on a présenté une méthode pour la constitution d'une hétérostructure à base de semi-conducteur d'un laser, après nous sommes penchés sur les différents types de puits quantiques, les effets de la contrainte et les différents paramètres comme l'épaisseur critique, le gap ainsi que le modèle mathématique pour le calcul de gain optique.

Enfin, la dernière partie avait pour objectif d'optimiser la concentration de l'indium et l'antimoine sur les deux structures, interpréter et comparer les résultats obtenus avec InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb, et de simuler à partir des modèles mathématiques l'effet de la contrainte sur le gap de la couche active dans le but de déterminer l'énergie de transition et la longueur d'onde d'émission exploitable dans les fibres optiques 0.85, 1.33 et 1.55 μm .

On a déterminé depuis la variation des propriétés physiques des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb l'effet de l'indium et l'antimoine. Après cela, on a procédé à la quantification des niveaux d'énergie et la simulation de l'effet de la contrainte sur le gap de la couche active dans le but de déterminer l'énergie de transition et la longueur d'onde d'émission.

Ensuite, on a fait des simulations, interprétations de l'élargissement de puits et du gain optique dans des deux structures InGaAsSb/GaAs et InGaAsSb/AlSb et comparer entre ces deux derniers. On a constaté que InGaAsSb/GaAs couvre les longueurs d'onde exploitées dans la télécommunication optique avec une amplitude de gain plus importante que celle de InGaAsSb /GaAs, ce qui favorise l'utilisation de substrat GaAs. A la fin, nous nous sommes basés sur les résultats obtenus le long de ce travail pour proposer des structures émettant à $1.55\mu\text{m}$, et présentant de bonnes caractéristiques.

Bibliographie

- [1] I. Vurgaftman, Meyer J R & Ram-Mohan LR, J. Appl. Phys. 89(11), 5815 (2001).
- [2] <http://www.saint-brieuc.fr/ville-attractive/ville-numerique/la-fibre-optique-a-saint-brieuc/>.
- [3] <https://www.stelvision.com/astro/les-grands-observatoires-terrestres/>.
- [4] <https://francais.rt.com/international/56326-armee-russe-devoile-images-imposant-systeme-combat-peresvet-videos>.
- [5] <http://www.montreal.tv/2015/10/bien-saisir-la-chirurgie-des-yeux-au-laser/>.
- [6] <https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/582-laser>.
- [7] Tarik Bouragba. Propriétés optiques de puits quantiques GaInAnt/GaAs. Physique des Hautes Energies- Expérience [hep-ex]. Université Blaise Pascal - Clermont- Ferrand II, (2006) Français.<NNT : 2006CLF21648>. <tel-00688818>.
- [8] Teissier. R, Christol. P, Joullié. A, Université de Montpellier (CEM2), Nouveaux lasers à semiconducteur pour le moyen Infra-rouge.
- [9] J. W. Matthews. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals, J. Vac. Sci. Technol., vol. 12, no 1, p. 126-133, (1975).
- [10] Joonashilska. Effect of growth parameters on the properties of GaAsBi Tampere. University of technology Master of Science Thesis, 68 pages, 0 Appendix pages May (2016).
- [11] <https://sfo.edpsciences.org/articles/sfo/pdf/1996/01/sfo19964p1.pdf>
- [12] Maazi Yousra. Modélisation d'une cavité à laser chimique. Université Med Khider Biskra Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, 72 pages, (2014).
- [13] Julien Bouvier. Etude des épitaxies sélectives des alliages SiGe(C) pour électrode de base des transistors bipolaires performants. Thèse de Doctorat, 2010, Matériaux, L'institut National des sciences appliquées, Lyon.

- [14] A. Aissat, M. El Bey et al. Modeling and Simulation of Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP quaternary structure for photovoltaic. International journal of Hydrogen Energy, 2014.
- [15] Julien Barjon. Etude d'un laser UV compact a semiconducteurs (Al,Ga)N pompé par micropoint .thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble 2002.
- [16] Patrice Camy, Olivier Musset. Systèmes laser pompés par diode à fibres cristallines : oscillateurs Er : yAG, amplificateurs Nd : yAG par Igor Martial thèse de doctorat Ecole doctorale Ondes et Matière (Orsay, Essonne).
- [17] M. Guillaume Levaufre , thèse de doctorat. Circuits photonique intègres incluant des lasers hybrides III-V sur silicium pour applications en Télécommunication très haut débit. L'université Paris-Saclay, (2016).].
- [18] A. Aissat, M. El Bey et al., Modeling and Simulation of Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP quaternary structure for photovoltaic. International journal of Hydrogen Energy, 2014.
- [19] Y.VanCluminal. Réalisation et étude de diodes lasers à base de GaSb émettant vers 2.3µm pour application à l'analyse des gaz. Thèse de doctorat. Université MONTPELLIER II, 1997.
- [20] Tableau-periodique-agrandissement, www.lachimie.fr. (n.d.). Retrieved from <https://www.lachimie.fr/definitions/tableau-periodique-agrandissement.php>.
- [21] W. Porod and D. K. Ferry., Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds. PHYSICAL REVIEW B, 1983, Vol 27: p 2587-2589.
- [22] Sadao Adachi., Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors, Edition first published 2009, Wiley Series in Materials for Electronic & Optoelectronic Applications.
- [23] J. H. Robertson, Landolt-Börnstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. Group III. Crystal and solid state physics. Vol. 7. Crystal structure data of inorganic compounds . Part c 1 by W. Pies and A. Weiss, Acta Crystallogr. Sect., vol. 35, no 1, p. 254-254, janv. (1979).
- [24] K. Kassali. Thèse de doctorat d'état, université de Ferhat Abbas-Setif (2004).
- [25] J. L. Birman, Simplified lcao method for zincblende, wurtzite, and mixed crystal structures, Phys. Rev., vol. 115, pp. 1493–1505, (Sep 1959).
- [26] Francis levy. Traité des matériaux (18). Physique et technologie des semiconducteurs. Presses polytechniques et universitaires Romandes (1995).
- [27] solidstates, openchemistry.in. (n.d.). retrieved from <http://openchemistry.in/solid/solidstates.html>.

- [28] Tarik Bouragba., propriétés optiques de puits quantique GaInAsN/GaAs, Thèse de doctorat, 2006, Matériaux et Composants pour l'Electronique, Université Blaise Pascal.
- [29] MATLAB User Interface for Simulation of Silicon Germanium Solar Cell - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/Direct-andindirect-band-gap_fig11_281067517 (accessed 2 Jun, 2018).
- [30] Ali Lanacer, Etude des propriétés optiques de puits quantiques contraints ultra-minces d'InAs/InP. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de PhilosophiæDoctor (Ph.D.) en Physique. Université de Montréal, (2006).
- [31] C. Sibilia, T.M. Benson, M. Marciniak · T. Szoplik, "PhotonicCrystals:Physics and Technology", Springer, (2008).
- [32] T. Ando. Hole Subbands at GaAs/AlGaAs Heterojunctions and Quantum Wells, Journal of the Physical Society of Japan, 54(4), (April 1985).
- [33] M. Altarelli. Electronic structure and semiconductor-semimetal transition in InAs GaSb superlattices, Physical Review B, 28(2), (July 1983).
- [34] Fisher, H.Kuhn AND H.Richter. New approach in equilibrium theory for strained layer relaxation. Phys. Rev. Lett. 73, 2712–2715 (1994).
- [35] CHAALA Nadifa,ETUDEDES STRUCTURES LASER DANS L'INFRA-ROUGE MOYEN A BASE DE PUIITS QUANTIQUE DE GaInAsSb/GaAlAsSb. Mémoire présenté à la faculté des sciences département physique pour l'obtention du diplôme de magister université d'Oran.
- [36]https://www.frontiersin.org/files/Articles/141029/fphy-03-00038HTML/image_m/fphy-03-00038-g001.jpg.
- [37] AYAT MAHA, ETUDE NANOSTRUCTURES LASERS A BASE DE MATERIAUX QUINAIRES InGaAlAsSb/GaSb.Mémoire présenté a la faculté des sciences département physique pour l'obtention du diplôme de magister université d'Oran.
- [38] <https://www.youtube.com/watch?v=XvjLzRKgkfM>
- [39] Sébastien QUOIZOLA, EPITAXIE EN PHASE VAPEUR DE SILICIUM SUR SILICIUM MESOPOREUX POUR REPORT SUR SUBSTRATS ECONOMIQUES ET APPLICATION PHOTOVOLTAIQUE BAS COUT institut national des sciences appliquées de lyon.
- [40] P. S. Zory, JR (ED.), Quantum Well Lasers, Academic Press, New York (1993).

- [41] Tarik Bouragba. Propriétés optiques de puits quantiques GaInAnt/GaAs. Physique des Hautes Energies- Expérience [hep-ex]. Université Blaise Pascal - Clermont- Ferrand II, (2006) Français. <NNT : 2006CLF21648>. <tel-00688818>.
- [42] Renard, C. Hétérostructures Antimoniures/ Arséniures pour les applications optoélectroniques dans le moyen infrarouge, Université Paris VII, (30 Septembre 2005).
- [44] Julien Bouvier., Etude des épitaxies sélectives des alliages SiGe(C) pour électrode de base des transistors bipolaires performants. Thèse de Doctorat, 2010, Matériaux, L'institut National des sciences appliquées, Lyon.
- [45] J. H. Robertson, Landolt-Börnstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. Group III. Crystal and solid state physics. Vol. 7. Crystal structure data of inorganic compounds. Part c 1 by W. Pies and A. Weiss, Acta Crystallogr. Sect., vol. 35, no 1, p. 254-254, janv. (1979).
- [46] M. Ferhat ET A. Zaoui, Structural and electronic properties of III-V bismuth compounds, Phys. Rev. B, vol. 73, no 11, p. 115107, mars (2006).
- [47] A. Aissat, M. El Bey et al., Modeling and Simulation of Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP quaternary structure for photovoltaic. International journal of Hydrogen Energy, 2014, Vol 39: p 15287-15291.
- [48] Y.VanCluminal. Réalisation et étude de diodes lasers à base de GaSb émettant vers 2. 3µm pour application à l'analyse des gaz. Thèse de doctorat. Université MONTPELLIERII, 1997.
- [49] C. I. Cabrera, J. C. Rimada et al., Modelling of GaAsP/InGaAs/GaAs strainbalanced multiple-quantum well solar cells, Journal of Applied Physics, 2013, Vol 113: p 024512-1 to 024512-7.
- [50] Mickaël D. TESSIER. Thèse de Doctorat, Synthèse et spectroscopie optique de puits quantiques colloïdaux. ÉCOLE DOCTORALE : Physique et Chimie des Matériaux (ED397), (2013).
- [51] K.Koksal, B.G. Critical Layer Thickness ogGaIn (n) As(Sb) qws on GaAs and InP substrates for (001) and (111) orientations. The European Physical journal (5 may 2009), 211-218.
- [52] G. Bastard and J.A. Brum. Electronic states in semiconductor heterostructures. IEEEJournalofQuantumElectronics,22(9), (september1986).
- [53] D.J Ben daniel and C.B Duke. Space-charged effect on electron tunneling Phy. Rev. 152,683-692(1966).

[54] CstInP, www.polytech-lille.fr. (n.d.). Retrieved from [http://www.polytech-lille.fr/cours atome-circuit-integre/CstInP.htm](http://www.polytech-lille.fr/cours%20atome-circuit-integre/CstInP.htm).

[55] Lasladj Meriem, Mémoire de Magistère, Simulation numérique des cellules solaires de troisième génération pour des applications spatiales, université Sétif 1 (2014/2015).

[56] A. Aissat, M. El Bey et al., Modeling and Simulation of Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP quaternary structure for photovoltaic. International journal of Hydrogen Energy, 2014, Vol 39: p 15287-15291.

[57] Y.VanCluminal. Réalisation et étude de diodes lasers à base de GaSb émettant vers 2.3 μm pour application à l'analyse des gaz. Thèse de doctorat. Université MONTPELLIERII, 1997