

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 ELECTRONIQUE

OPTION : SYSTÈMES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

présenté par

SAIDANI MERIEM

&

BOUKENDAKDJI KHOULOU

# Etude et simulation d'une structure à puits quantique à base d'un quinaire pour les télécommunications

Promotrice:

M<sup>me</sup>. Chenini Lynda

Co-promoteur :

M<sup>r</sup>. Aissat Abdelkader

2023-2024

---

## ملخص

يركز هذا العمل على دراسة ومحاكاة بنية البئر الكمومية InGaNaSb/InP بشكل أكثر دقة، فإنه يتضمن تقييم تأثير مزيج الإنديوم (In)، والنيتروجين (N) والأنتيمون (Sb) على بنية النطاق والكسب البصري باستخدام نموذج مضاد تقاطع النطاق (BAC)

أولاً، سوف نقوم بتحديد الخصائص الفيزيائية والهيكلية للمواد III-V، لجعلها سبيكة خماسية ذات بنية جيدة الكم. يؤدي دمج الأنتيمون إلى تقسيم نطاق التكافؤ إلى نطاقين فرعيين. وينطبق الشيء نفسه على دمج النيتروجين الذي يتسبب في انقسام نطاق التوصيل إلى نطاقين فرعيين. وتتمثل ميزة هذا التأثير في أنه يقلل بشكل كبير من فجوة النطاق ويسمح بتغيير طول موجة الانبعاث. سيكون من الممكن تحقيق أقصى كسب قدره 5275 سم<sup>-1</sup> الموافق لطول موجة الانبعاث  $\lambda = 1.3$  ميكرومتر الذي يمكن استخدامه بواسطة الألياف الضوئية للاتصالات.

**الكلمات الرئيسية:** أشباه الموصلات; الكسب البصري; InGaNaSb ; BAC

---

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude et la simulation de la structure du puits quantique InGaNaSb/InP. Plus précisément, il s'agit d'évaluer l'influence de la combinaison d'indium (In), l'azote (N) et de l'antimoine (Sb) sur la structure de bande et le gain optique à l'aide du modèle d'anticroisement (BAC).

Dans un premier temps, nous déterminerons les propriétés physiques et structurelles des matériaux III-V, pour en faire un alliage quinaire d'une structure de puits quantique. L'incorporation de l'antimoine provoque l'éclatement de la bande de valence en deux sous bandes. Il en est de même pour l'incorporation d'azote qui provoque un éclatement de la bande de conduction en deux sous bandes. L'avantage de cet effet est qu'il réduit considérablement la bande interdite et permet de décaler la longueur d'onde d'émission. Il sera possible d'atteindre un gain maximal de 5275 cm<sup>-1</sup> correspondant à une longueur d'onde d'émission  $\lambda = 1.3$  µm exploitable par les fibres optiques pour les télécommunications.

**Mots clés :** Semiconducteurs; gain optique ; InGaNaSb ; BAC.

---

## Abstract

This work focuses on the study and simulation of the InGaNaSb/InP quantum well structure. More precisely, it is about evaluating the influence of the combination of indium (In), nitrogen 'N' and antimony 'Sb' on the band structure and optical gain using the anticrossing model (BAC).

In a first step, we will determine the physical and structural properties of III-V materials, to make a quinary alloy of a quantum well structure. The incorporation of antimony causes the splitting of the valence band into two sub-bands. The same is true for the incorporation of nitrogen which causes a splitting of the conduction band into two sub-bands. The advantage of this effect is that it considerably reduces the band gap and allows to shift the emission wavelength. It will be possible to achieve a maximum gain of 5275 cm<sup>-1</sup> corresponding to an emission wavelength of  $\lambda = 1.3$  µm usable by optical fibers for telecommunications.

**Keywords:** Semiconductors; optical gain; InGaNaSb ; BAC.

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu tout-puissant et bon de nous avoir donné la foi, le courage, la santé et la volonté pour commencer et terminer cette thèse dans les délais.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à la promotrice, M<sup>me</sup> CHENINI LYNDA pour son encadrement efficace et son suivi quotidien, qui ont contribué à rendre notre recherche possible, intéressante et enrichissante.*

*Nous tenons à exprimer les remerciements les plus grands au Professeur ABDELKADER AISSAT qui nous a offert l'opportunité d'effectuer ce travail de master et de nous avoir encadrer.*

*L'honneur que nous ont fait les membres du jury en acceptant d'évaluer notre mémoire est immense et nous leur en sommes très reconnaissants.*

*À cette occasion, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous les professeurs du département du génie électronique, plus spécifiquement de la majeure en télécommunications, pour leur soutien tout au long de notre cursus de premier cycle (2019-2024). Leurs encouragements et leur disponibilité sont d'une grande importance pour notre réussite.*

*Nous tenons également à remercier toutes nos familles, tous nos amis, tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À*

*Ma chère mère*

*Tout au long de ma vie, tu as été ma source d'inspiration, ma force et mon soutien indéfectible. Ta gentillesse, ton amour et ta sagesse m'ont guidé à chaque étape de ce voyage d'apprentissage. Tu as toujours cru en moi, même quand je doutais. Merci d'être ma lumière dans les moments d'obscurité et ma joie dans les moments de succès. Ce travail est dédié à toi, pour tout ce que tu as fait et continues de faire pour moi. Je t'aime tellement MAMAN.*

*Mon cher père*

*Tu as toujours été à mes côtés et m'as toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance que tu trouves ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tous les efforts et les moyens que tu as déployés pour m'aider à réussir mes études. Dieu te protégera. Aujourd'hui, je te dédie ces mots, PAPA, pour te dire que je suis heureuse d'être ta fille et que tu es le meilleur père dont j'aurais pu rêver.*

*À mes chers frères et sœurs, NASSIBA, AMINA, YACINE et RIADH*

*À toute ma famille et à tous mes amis que j'aime, qui m'ont encouragé et soutenu cette année.*

*S.MERIEM*

## Dédicaces

À

*Ma chère mère*

*Malgré ton absence physique, ton amour et ton soutien continuent d'inspirer et de guider ma vie. Le souvenir des encouragements et des enseignements que tu m'as donnés est encore vif, tout comme les valeurs que tu m'as transmises comme le travail et la persévérance. Ma gratitude pour les sacrifices que tu m'as consentis et ton amour inconditionnel est palpable. Même si ton corps n'est plus là, ton esprit reste pour moi une source de réconfort et de motivation, Tu resteras ma plus belle étoile MAMAN.*

*Mon cher père*

*Tu es mon pilier inébranlable, celui vers qui je me tourne pour trouver du soutien, des conseils et un amour inconditionnel. Tu m'as câlinée, cajolée, soutenue et protégée. Tu m'as donné beaucoup d'amour et ça c'est vraiment précieux. Aujourd'hui je te suis reconnaissante de tout ce que tu as été pour moi, et je souhaite te dire à quel point je t'aime, mon PAPA.*

À

*Mes chers frères et sœurs et meilleurs amis ABDEMALEK, ABDERAHIM, RAZAN et RANIA*

*Vous avez toujours été à mes côtés pour me soutenir, m'encourager et me donner de la force. Que ce travail reflète ma gratitude et mon affection.*

*À toute ma famille et mes amis, à tous ceux que j'aime et à tous ceux qui m'ont encouragé et ont fait de leur mieux pour me soutenir cette année.*

**B. KHOULOU**

# Table des matières

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale .....	1
<b>Chapitre 1 : Généralités</b>	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Définition du semi-conducteur .....	3
1.3 La structure cristalline .....	6
1.4 Semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque.....	10
1.5 La Structure des bandes d'énergie .....	10
1.6 Semi-conducteur à gap direct et indirect .....	13
1.7 L'épitaxie.....	14
1.8 Epaisseur critique.....	16
1.9 Défauts structuraux.....	18
1.10 La contrainte .....	20
1.11 Structure à puits quantique .....	21
1.12 Niveaux d'énergies dans les puits quantiques.....	25
1.13 Gain optique .....	26
1.14 Conclusion .....	28
<b>Chapitre 2 : Etude d'une structure à puits quantique à base du quinaire InGaNASb/InP</b>	
2.1 Introduction .....	29
2.2. Propriétés optoélectroniques.....	29
2.2.1. Paramètre de maille .....	30
2.2.2. La contrainte .....	32

2.2.3. Energie de la bande interdite .....34  
2.2.4. La masse effective .....37  
2.2.5. Les alignements des bandes .....41  
2.2.6. Gain optique.....42  
2.3. Conclusion ..... .45  
**Conclusion Générale .....46**  
Références

## Listes des acronymes et abréviations

- $a_e$ : Paramètre de maille de la couche épitaxiée.
- $a_c$ : Potentiel hydrostatique de déformation de la bande de conduction.
- $a_s$ : Paramètre de maille du substrat.
- $a_v$ : Potentiel hydrostatique de déformation de la bande de valence.
- $As$ : Arsenic.
- $BC$ : Bande de conduction.
- $BV$ : Bande de valence.
- $c$ : vitesse de la lumière dans le vide.
- $C_{ij}$ : Coefficients d'élasticités.
- $E_g$ : Energie de la bande interdite.
- $E_g^{cont}$  : Energie de la bande interdite contrainte.
- $E_g^{ncont}$  : Energie de la bande interdite non contrainte.
- $E_{hh}$ : Énergie de la bande de trous lourds.
- $E_i$ : Energie au niveau  $i$ .
- $E_{lh}$ : Énergie de la bande de trous légers.
- $E_{v,moy}$ : Energie moyenne de la bande de valence.
- $In$  :Indium.
- $Ga$ : Gallium.
- $h$ : Constante de Planck.
- $L_p$ : Largeur du puits quantique.
- $m_e^*$  : Masse effective de l'électron.
- $m_{hh,lh}^*$  : Masse effective des trous (hh: lourds, lh: légers).
- $m_0$ : Masse effective de l'électron dans le vide.
- $n$ : Indice de réfraction.
- $N$ : Azote
- $Sb$  : Antimoine.
- $x$ : Concentration d'aluminium.
- $y$ : Concentration de l'antimoine.
- $\Delta_a$ : Désaccord paramétrique.
- $\lambda$ : Longueur d'onde.
- $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ : Paramètres de Luttinger.
- $\varepsilon$ : Déformation hydrostatique.

$\gamma$ : Coefficient de poisson.

$\Delta_0$ : Énergie de décalage spin-orbite.

$\Delta E_{sh}$ : Décalage énergétique induit par la contrainte de cisaillement

$\Delta E_{hh}$ : Décalage d'énergie de la bande de trous lourds.

$\Delta E_{lh}$ : Décalage d'énergie de la bande de trous légers.

$\epsilon_0$ : Permittivité du vide.

$\epsilon_{//}$ : Déformation bi-axiale.

$\epsilon_{\perp}$ : Déformation uni-axiale.

$\Delta\nu$ : Largeur spectrale.

$K$ : Constante de Boltzmann.

$\Delta$ : Laplacien.

$\varphi$ : Fonction d'onde

## Liste des figures

### Chapitre1 : Généralités

Figure 1.1 : Tableau de Mendeleïev.....	4
Figure 1.2 : Les sept systèmes cristallins .....	7
Figure 1.3 : Réseaux cristallins cubiques.....	8
Figure 1.4 : Structure « Zinc Blende » .....	9
Figure 1.5: Structure « Wurtzite » .....	9
Figure 1.6 : Structure de bande d'énergie .....	10
Figure 1.7 : Les énergies de bande d'isolant, semi-conducteur et conducteur.....	11
Figure 1.8: Evolution de l'énergie $E_g$ et du paramètre cristallin des III-V .....	13
Figure 1.9: (a) semiconducteur à gap direct, (b) semiconducteur à gap indirect .....	14
Figure 1.10 : Bâti d'épitaxie par jet moléculaire .....	15
Figure 1.11 : Banc d'épitaxie en phase vapeur.....	16
Figure 1.12 : Schéma (a) montrant une couche sans dislocation, (b) schéma montrant la dislocation de la couche .....	17
Figure 1.13 : a) Une lacune dans un cristal, b) Site interstitiel .....	18
Figure 1.14: a) Atome en substitution, b) Atome en insertion .....	19
Figure 1.15 : Représentation schématique des dislocations .....	19
Figure 1.16 : Croissance d'une couche contrainte: a) compression, b) tension .....	20
Figure 1.17 : Diagramme de puits quantique en 3D .....	21
Figure 1.18 : Diagramme de bandes d'énergie d'un puits quantique .....	22
Figure 1.19 : Puits quantique type I.....	23
Figure 1.20 : Puits quantique type II.....	24
Figure 1.21 : Puits quantique type III.....	24
Figure 1.22 : Structure des niveaux énergétiques dans un puits quantique.....	25

Figure 1.23 : Transition entre les sous-bandes d'un puits quantique et règles de selections..... 27

## Chapitre 2 : Etude d'une structure à puits quantique à base du quinaire InGaNASb/InP

Figure 2.1: Schéma de la structure à puits quantique InGaNASb/InP.....29

Figure 2.2 : Variation du paramètre de maille d'InGaNASb en fonction des concentrations d'In et de N .....31

Figure 2. 3 : Variation du paramètre de maille d'InGaNASb en fonction des concentrations d'In et de Sb ..... 31

Figure 2.4: Variation de la contrainte en fonction des concentrations In et N de la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}/\text{InP}$  .....33

Figure 2 .5: Variation de la contrainte en fonction des concentrations N et Sb de la structure  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$  .....33

Figure 2.6: L'état des bandes d'énergie dans la structure InGaNASb/InP : (1) avant et (2) après éclatement.....35

Figure 2.7: Variation de l'énergie de la bande interdite en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.9-y}\text{Sb}_{0.1}$  à  $T=300\text{K}$ ..... 36

Figure 2.8: Variation de l'énergie de la bande interdite en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  à  $T=300\text{K}$ .....36

Figure 2.9: Variation de la masse effective des électrons en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ ..... 38

Figure 2.10: Variation de la masse effective des électrons en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  .....38

Figure 2.11: Variation de la masse effective des trous lourds en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ .....39

Figure 2.12: Variation de la masse effective des électrons en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  .....39

Figure 2.13: Variation de la masse effective des trous légers en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ ..... 40

Figure 2.14 : Variation de la masse effective des trous légers en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  ..... 40

Figure 2.15: Variation des décalages de bande  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  en fonction des concentrations N et In dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}/\text{InP}$ . ..... 42

Figure 2.16: Variation des décalages de bande $\Delta E_c$ et $\Delta E_v$ en fonction des concentrations N et Sb dans la structure $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$ .	42
Figure 2.17: Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) pour différentes concentrations d'In et $L_p=80\text{\AA}$	43
Figure 2.18: Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) pour différentes concentrations de N et $L_p=80\text{\AA}$	44
Figure 2.19: Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) pour différentes concentrations de Sb et $L_p=80\text{\AA}$ .	44

### Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés des principaux composés binaires III-V	5
Tableau 2.1 : Paramètres de maille des matériaux binaires III-V à $T=300\text{ K}$	30
Tableau 2.2 : $C_{11}$ et $C_{12}$ des matériaux binaires III-V à $T=300\text{ K}$	32

# Introduction générale

Le besoin croissant de vitesse de fonctionnement, d'efficacité et de faible consommation d'énergie à coûts réduits dans le secteur des télécommunications a mené à une innovation technologique et a révolutionné le monde des semi-conducteurs et par conséquent, a développé et a modernisé les dispositifs existants. Les matériaux III-V constituent la base de l'optoélectronique et du photovoltaïque hautes performances [1]. Les alliages III-V occupent toujours une place importante, car les caractéristiques de ces derniers s'améliorent de jour en jour grâce aux recherches. Les composés semi-conducteurs III-V sont préférés car ils ont une mobilité électronique élevée et une bande interdite directe qui permet l'émission de lumière à travers des transitions radiatives.

Les semi-conducteurs dilués à base de nitrure III-N-V ont suscité un grand intérêt grâce à des recherches approfondies [2,3]. Ces matériaux sont caractérisés par leurs propriétés électroniques remarquables, produites par l'incorporation d'azote (N) où l'introduction de seulement 1% de N réduit l'énergie de la bande interdite d'environ 180 meV, en raison d'une forte perturbation des états de conduction [4]. Par conséquent, les matériaux nitrures peuvent améliorer les performances des composants électroniques et peuvent également être utilisés pour créer des structures à faible résistance thermique et à haute réflectivité ainsi que pour les applications solaires photovoltaïques à haut rendement [5].

Mais, malgré les progrès rapides qui ont permis l'émergence de la technologie nitrure à l'échelle industrielle, les propriétés intrinsèques des composés III-N-V et les mécanismes qui gouvernent les performances des dispositifs restent encore mal connus.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude de la structure à puits quantique InGaNaSb/InP. Cet attrait s'explique par les propriétés exceptionnelles de cet alliage quinaire. En effet, lorsqu'une petite quantité d'azote est ajoutée aux matrices des semi-conducteurs III-V conventionnels, on obtient une bande interdite inférieure à celle du substrat InP, d'où l'intérêt pour des applications dans le domaine de l'optoélectronique et télécommunication telle que les diodes lasers émettant à 1,3 et 1,55  $\mu\text{m}$ . Ainsi, ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre traite les semi-conducteurs III-V et vise à fournir des concepts de base ainsi que leurs caractéristiques et propriétés physiques et électroniques. Il comprend des définitions des structures cristallines, le concept de l'énergie de la bande interdite ainsi que diverses techniques d'épitaxie et également certaines propriétés importantes telles que l'épaisseur critique, la contrainte, les alignements des bandes, etc.

Le deuxième chapitre se compose de deux parties. Dans la première partie, nous présenterons et interpréterons les résultats obtenus en simulant la structure du puits quantique InGaNaNAsSb/InP pour déterminer l'influence de la composition de l'indium (In), de l'azote (N) et de l'antimoine (Sb) sur les propriétés structurales et électroniques telles que : le paramètre de maille, la bande interdite (gap) ainsi que la masse effective des différents porteurs de charges...etc.

Dans la deuxième partie, nous allons vérifier ces effets sur le gain optique et enfin nous concluons le mémoire par une conclusion générale.

# Chapitre 1 : Généralités

## 1.1. Introduction

Les semi-conducteurs III-V sont presque tous à gap direct et sont les champions des dispositifs optoélectroniques. L'arséniure de gallium GaAs est le représentant le plus connu, de gap 1,42 eV, InP en est un autre, de gap 1,35 eV. Leur grande force réside dans le nombre quasi illimité d'alliages possibles entre Ga, As, Al, In, Sb et P. Cette particularité a donné aux semi-conducteurs III-V la première place pour l'optoélectronique et notamment pour les lasers semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs III-V sont utilisés dans la plupart des dispositifs électriques et optiques en électronique rapide et optoélectronique, dans les applications militaires et spatiales ainsi que dans les domaines des radiofréquences et hyperfréquences. Ils sont notamment utilisés dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques [6].

On citera pour exemple quelques matériaux III-V : Antimoniure d'aluminium (AlSb), Arséniure d'aluminium (AlAs), Nitrure d'aluminium (AlN), Phosphure d'aluminium (AlP), L'arséniure d'aluminium-gallium (GaAlAs), L'arséniure d'indium-gallium (InGaAs), ... etc. Les propriétés de ces matériaux sont intéressantes pour les performances des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Les composés semi-conducteurs III-V sont préférés aux autres matériaux, en prenant le silicium comme exemple, les propriétés de ce matériau sont insuffisantes en termes de mobilité des porteurs relativement faible et il se caractérise par un gap d'énergie indirecte d'où nous allons avoir des transitions électroniques indirectes.

## 1.2. Définition du semi-conducteur

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique. La figure 1.1 rassemble l'ensemble des éléments chimiques qui constitue le tableau périodique de Mendeleïev (il contient 118 éléments, les nombres au-dessus et en dessous représentent respectivement le numéro atomique et la masse atomique).

## TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Non-métaux    
 Métaux pauvres    
 Gaz nobles  
 Métaux alcalins    
 Métalloïdes    
 Lanthanide  
 Métaux alcalino-terreux    
 Halogènes    
 Actinide  
 Métaux de transitions

Figure 1.1 : Tableau de Mendeleïev [7]

### 1.2.1. Les alliages des semi-conducteurs III-V :

À partir des éléments répertoriés dans le tableau périodique, les semi-conducteurs composés suivants peuvent être créés :

- Binaire.
- Ternaire.
- Quaternaire.
- Quinaire (c'est ce type qui va faire l'intérêt de notre travail).

#### 1.2.1.1. Les composés binaires

Tous les composés binaires de forme  $A^{III}B^V$  ne présentent pas les mêmes avantages potentiels. Des études de leurs propriétés, et notamment de leur structure de bande, montrent que les éléments les plus légers forment des composés présentant de larges bandes interdites

indirectes et également des masses électroniques effectives élevées.

Les composés contenant du bore (B), de l'aluminium (Al) ou de l'azote (N) entrent dans cette catégorie ; ils sont souvent de peu d'intérêt pour les dispositifs électroniques rapides, qui nécessitent des semi-conducteurs à forte mobilité des porteurs, ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est requise pour l'optique.

Les composés à base de gallium (GaAs, GaSb), ou d'indium (InP, InAs, InSb) sont les binaires dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau 1 résume quelques paramètres pour différents matériaux binaires de la famille III-V [8].

Avec

$E_g$  : énergie de bande interdite.

$\lambda$  : longueur d'onde correspondante.

$a$  : paramètre de maille.

**Tableau 1.1:** Propriétés des principaux composés binaires III-V [8].

Composés binaires III-V	$E_g$ (eV)	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$a$ ( $\text{\AA}$ )	Structure de bande
InAs	0.36	3.44	6.058	Directe
InSb	0.17	7.30	6.479	Directe
InP	1.35	0.92	5.868	Directe
GaAs	1.42	0.87	5.653	Directe
GaSb	0.72	1.85	6.095	Directe
GaP	2.26	0.55	5.449	Indirecte
AlAs	2.16	0.57	5.661	Indirecte
AlSb	1.58	0.75	6.138	Indirecte
AlP	2.45	0.51	5.463	Indirecte
BP	2.0	0.62	4.538	Indirecte

### 1.2.1.2. Les composés ternaires

Pour obtenir un alliage ternaire, il faut remplacer partiellement l'un des éléments III ou V par un élément de la même colonne. Il existe deux types :

- ✓ Alliage ternaire anionique  $A^{III}B_x^V C_{1-x}^V$  tel que  $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$ ,  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ ,  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ .
- ✓ Alliage ternaire cationique  $A_x^{III}B_{1-x}^{III}C^V$  tel que  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Où  $x$  est un coefficient stœchiométrique qui varie entre 0 et 1.

### 1.2.1.3. Les composés quaternaires

Ce type d'alliage fait intervenir quatre composés binaires AC, AD, BC et BD, ces alliages ont la forme :

- ✓  $A_x^{III}B_{1-x}^{III}C_y^V D_{1-x-y}^V$  :  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{P}_{1-y}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$
- ✓  $AB_x^V C_y^V D_{1-x-y}^V$  :  $\text{InSb}_x\text{P}_y\text{As}_{1-x-y}$ ,  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x-y}\text{Bi}_y$
- ✓  $A_x^{III}B_y^{III}C_{1-x-y}^{III}D$  :  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{As}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}$

Où  $x$  et  $y$  sont des coefficients stœchiométriques qui varient entre 0 et 1.

### 1.2.1.4. Les composés quinaires

Ce type d'alliage fait intervenir cinq atomes, à titre d'exemple : l'Arséniure-antimoniure-nitride de gallium-indium ( $\text{InGaNASb}$ ) et l'Arséniure-antimoniure-phosphure de gallium-indium ( $\text{GaInAsSbP}$ ).

L'alliage quinaire  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  a beaucoup attiré l'attention au cours des dix dernières années [9-12].

Où  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont des coefficients stœchiométriques qui varient entre 0 et 1.

## 1.3 La structure cristalline

On peut classer tout arrangement cristallin dans l'une des sept catégories suivantes, dites « système cristallin », figure 1.2 :

- 1 Cubique
- 2 Quadratique
- 3 Orthorhombique
- 4 Monoclinique
- 5 Triclinique
- 6 Rhomboédrique
- 7 Hexagonal

Ces systèmes cristallins sont obtenus par les combinaisons possibles entre les paramètres linéaires (a, b et c) et les paramètres angulaires ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ).

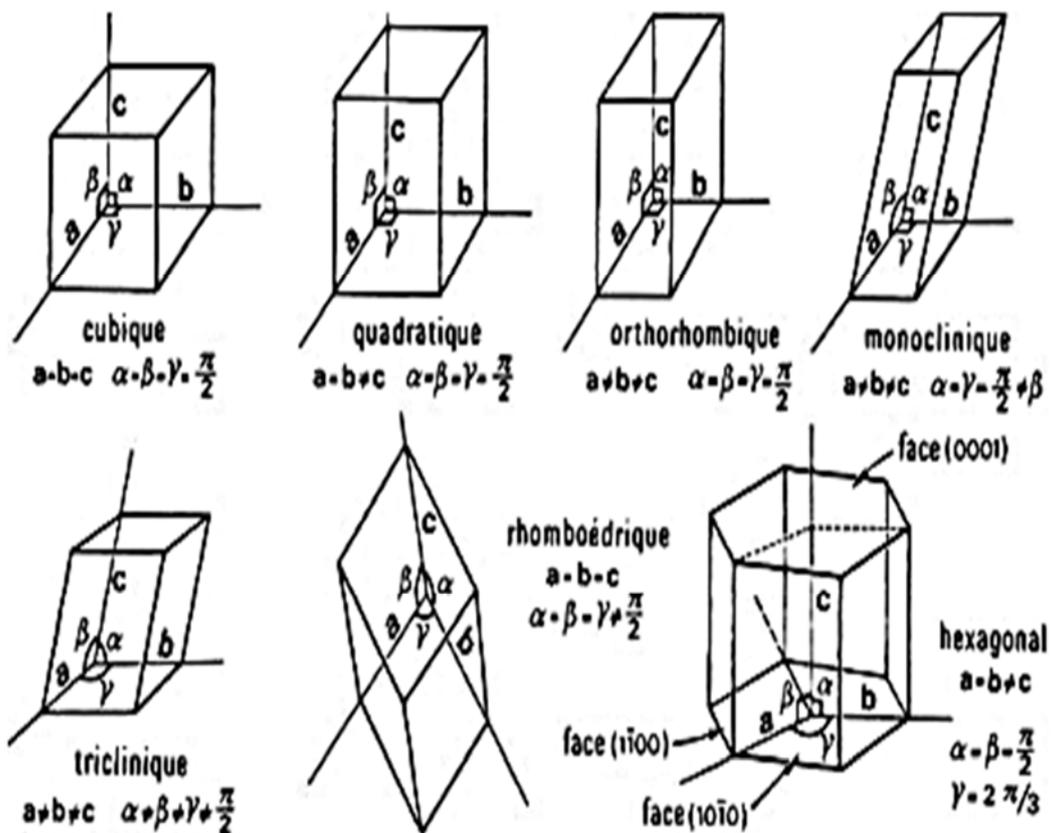


Figure 1.2. Les sept systèmes cristallins [13].

La plupart des semi-conducteurs cristallisent dans le système cubique constitué de trois (03) réseaux différents. La figure 1.3 montre les trois réseaux, selon la disposition des atomes :

- ✓ Cubique simple (CS) : les atomes sont aux sommets du cube.
- ✓ Cubique centré (CC) : identique au cubique simple mais avec un atome au centre du cube.
- ✓ Cubique face centrée (CFC) : ayant un atome au centre de chaque face du cube.

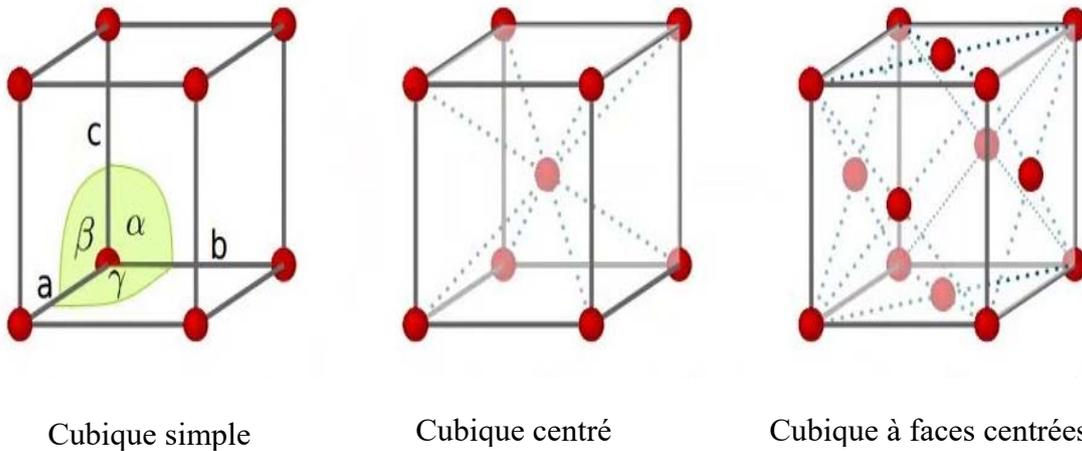
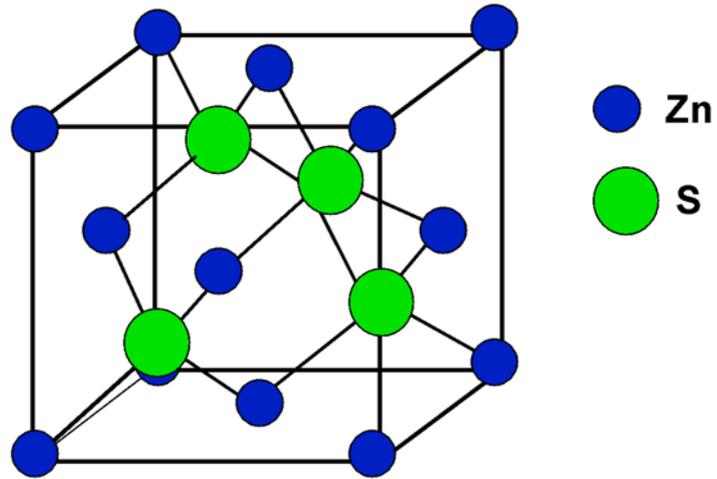


Figure 1.3. Réseaux cristallins cubiques.

### 1.3.1. Structure Zinc blende

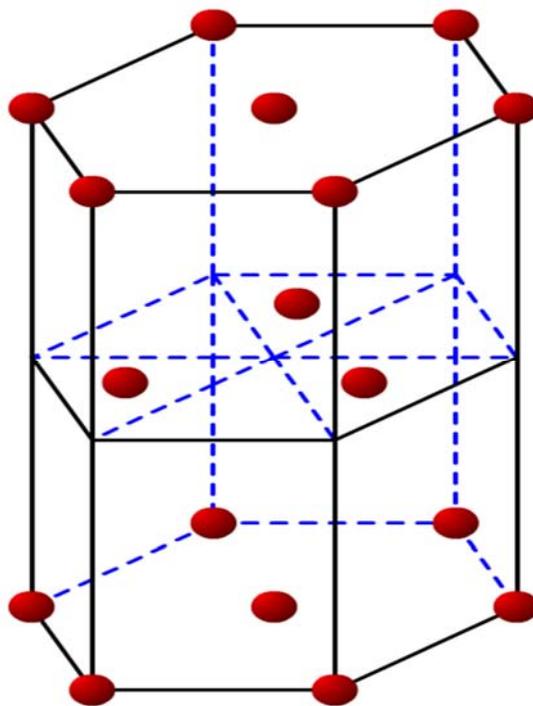
En général, les semi-conducteurs III-V existent sous la forme cristallographique « Zinc Blende », cette structure est similaire à celle du diamant et elle est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, un réseau est formé par les éléments de la colonne III et l'autre par les éléments de la colonne V, décalé l'un par rapport à l'autre par un quart de la diagonale principale, elle est constituée de deux sous-réseaux à l'autre le long de la diagonale du cube, soit  $a\sqrt{3}/4$ , d'une quantité  $(a_0/4, a_0/4, a_0/4)$ ,  $a_0$  est le paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire. La figure 1.4 illustre la structure de Zinc blende.



**Figure 1.4.** Structure « Zinc Blende ».

### 1.3.2. Structure Wurtzite

Concernant la structure Wurtzite illustrée sur la figure 1.5. Cette structure est composée de deux réseaux de Bravais hexagonaux, c'est la structure la plus stable, ce qui est bien car tout système physique cherche à avoir la stabilité.



**Figure 1.5.** Structure Wurtzite.

## 1.4. Semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque

On distingue deux types de semi-conducteurs :

- ✓ Semi-conducteur intrinsèque.
- ✓ Semi-conducteur extrinsèque.

### 1.4.1. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau dont le comportement électrique dépend uniquement de sa structure, et non de l'ajout d'impuretés comme dans le cas du dopage. Seule l'agitation thermique provoque le passage des électrons de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC) ce qui entraîne une augmentation de la conductivité en fonction de la température.

### 1.4.2. Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques qui lui confèrent des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc.) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc.). Ce type est obtenu en introduisant des impuretés par le dopage de type  $p$  (positive) ou de type  $n$  (négative), ce qui augmentera la conductivité des semi-conducteurs.

## 1.5. La structure des bandes d'énergie

La théorie des bandes est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les porteurs. Ces porteurs n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des bandes d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de structure de bandes. Elles sont divisées en une bande inférieure, la bande de valence, et une bande supérieure, la bande de conduction (figure 1.6).

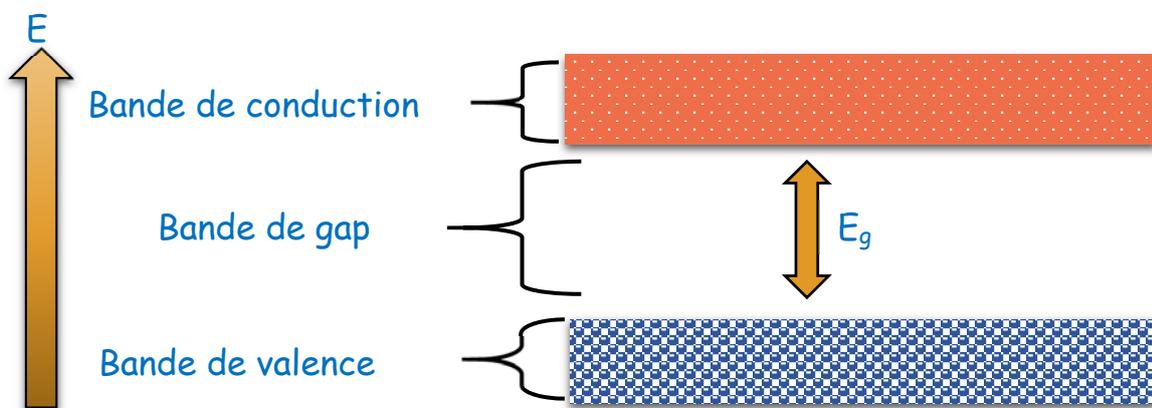


Figure 1.6. Structure de bande d'énergie [14].

On distingue donc trois cas selon le remplissage des bandes et la valeur du gap.

**✚ Premier cas**

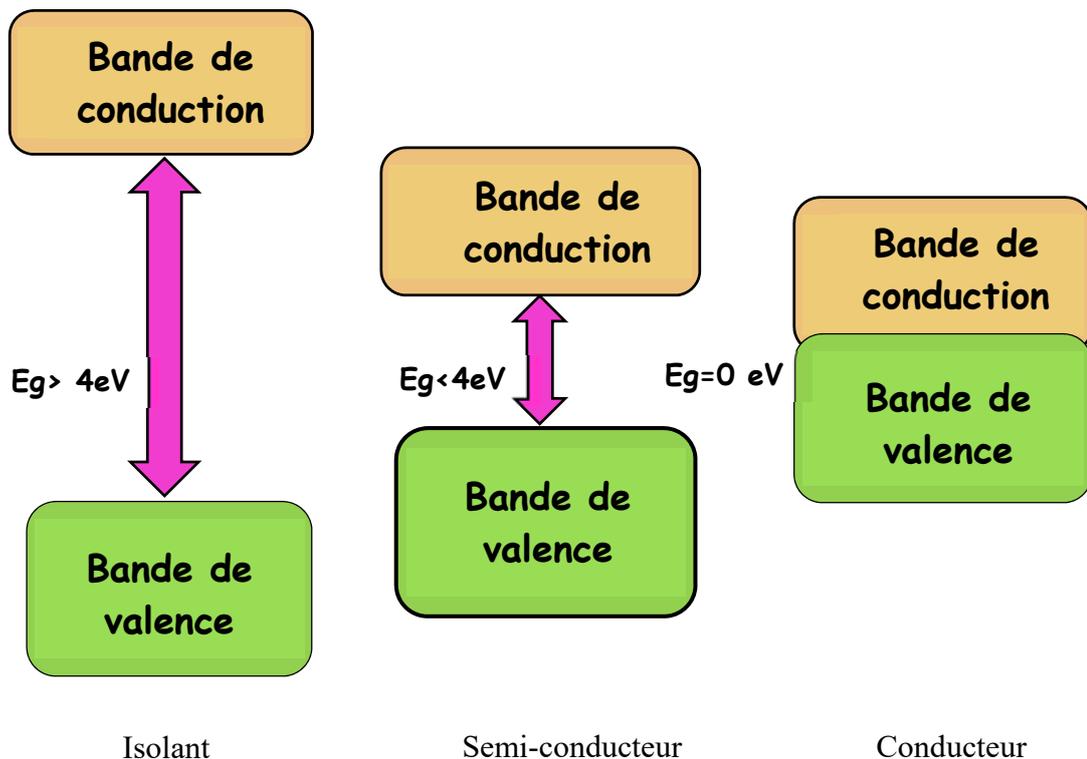
La bande de conduction est vide et le gap est grand ( $> 9 \text{ eV}$ ). Le solide ne contient alors aucun électron capable de participer à la conduction. Le solide est isolant.

**✚ Deuxième cas**

La bande de conduction est vide mais le gap est plus faible ( $< 4 \text{ eV}$ ). Le solide est donc isolant à température nulle, mais une élévation de température permet de faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. La conductivité augmente avec la température : c'est la caractéristique d'un semi-conducteur.

**✚ Troisième cas**

La bande de conduction est partiellement occupée, même à une température de zéro kelvin, alors un faible champ électrique peut faire passer un électron aux niveaux d'énergies supérieurs, sans dépenser beaucoup d'énergie, le solide est alors conducteur. La bande interdite séparant les deux bandes décrites ci-dessus détermine principalement les propriétés de transport dans les semi-conducteurs, comme le montre la figure 1.7.



**Figure 1.7.** Les énergies de bande d'isolant, semi-conducteur et conducteur [14].

### 1.5.1. Répartition énergétique des électrons. Statistique de Fermi-Dirac

Pour prévoir théoriquement la valeur de la conductibilité électrique d'un cristal, nous devons connaître la répartition des électrons entre ses différentes bandes d'énergie. Selon le principe d'exclusion de Pauli, il peut y avoir 0, 1 ou 2 électrons par niveau quantique. La probabilité  $f(E)$  pour qu'un électron du cristal occupe un niveau d'énergie  $E$ , est donnée par la statistique de Fermi-Dirac. Celle-ci est fondée sur les postulats suivants:

- un électron n'est pas distinguable d'un autre.
- il est tenu compte du principe de Pauli.
- le nombre total d'électrons est considéré comme constant.

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (1.1)$$

- $k$ : constante de Boltzmann ( $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )
- $T$ : température absolue
- $E_F$ : énergie de Fermi.

### 1.5.2. Energie de bande interdite

Il existe une bande d'énergie entre la BV et la BC où aucun état électronique n'existe. Cette bande est appelée bande interdite ou énergie de gap, notée  $E_g$ . Contrairement aux isolants, la bande interdite des semi-conducteurs est suffisamment étroite pour permettre à un grand nombre d'électrons d'être excités thermiquement de la BV vers la BC à température ambiante.

La figure 1.8 représente la variation de la bande interdite d'un alliage en fonction du paramètre cristallographique, qui lui-même varie avec la composition. Ce schéma montre qu'il est possible d'obtenir des matériaux dont la bande interdite et donc les propriétés optiques varient dans une large gamme.

Il existe cependant une limitation importante à la réalisation de ces matériaux, qui sont réalisés en couches minces par croissance épitaxiale sur un substrat binaire : le paramètre cristallin doit être très proche de celui du substrat [8].

Le diagramme de la figure 1.8 permet de connaître la composition de tout alliage ternaire susceptible d'être épitaxié en couche mince sur un substrat binaire GaAs ou InP.

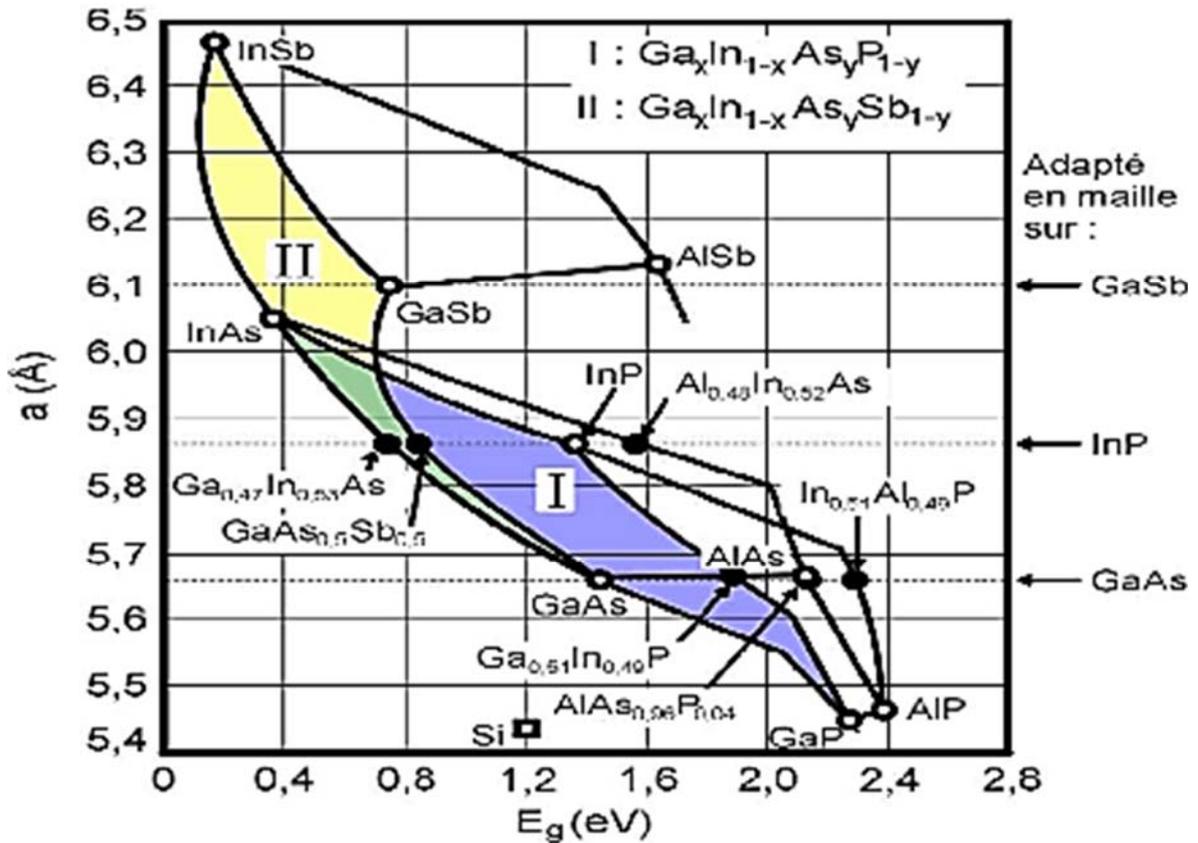


Figure 1.8. Evolution de l'énergie  $E_g$  et du paramètre cristallin des alliages des III-V [15].

## 1.6. Semi-conducteur à gap direct et indirect

Les semi-conducteurs sont classés en deux familles : les semi-conducteurs à "gap direct" et ceux à "gap indirect".

### 1.6.1. Semi-conducteur à gap direct

Un semi-conducteur est à gap direct si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction peuvent correspondre au même vecteur d'onde  $k$  (figure 1.9. a).

### 1.6.2. Semi-conducteur à gap indirect

Un semi-conducteur est à gap indirect si le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction ne correspondent pas au même vecteur d'onde  $k$ , (figure 1.9.b). La distinction entre les semi-conducteurs à gap direct et indirect est très importante, notamment dans les processus radiatifs. Le processus d'absorption ou d'émission est significativement plus important dans les semi-conducteurs à gap direct que dans les semi-conducteurs à gap indirect.

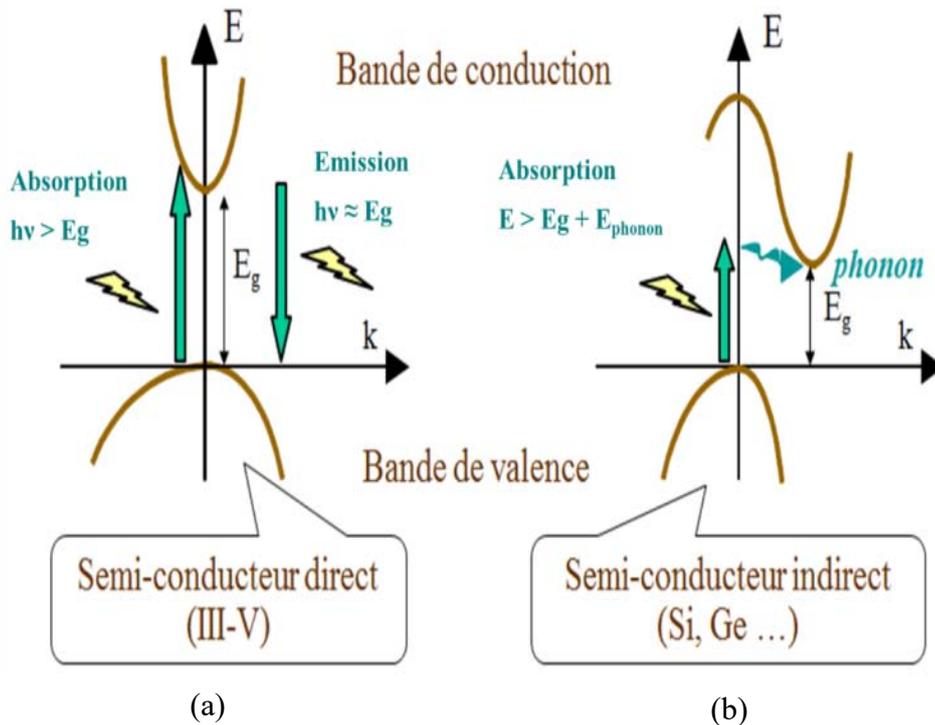


Figure 1.9. (a) semi-conducteur à gap direct, (b) semi-conducteur à gap indirect [16].

On constate, que dans un semi-conducteur à gap direct un électron du haut de la BV qui acquière une énergie suffisante passe dans la BC sans changer de quantité de mouvement, ce qui ne se produit pas dans le cas dans un semi-conducteur à gap indirect.

### 1.7. L'épitaxie

L'épitaxie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal. Etymologiquement, "épi" signifie "sur" et "taxis", "arrangement". La technique consiste donc à utiliser le substrat comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche. Le substrat est choisi de manière à avoir des paramètres de maille proches de ceux du cristal que l'on souhaite obtenir.

### 1.7. 1. L'épitaxie par jet moléculaire (EJM)

Connue en anglais sous le nom de Molecular Beam Epitaxy (MBE). Cette technique permet de réaliser des hétérostructures fines tout en conservant une vitesse de croissance raisonnable (de l'ordre de quelques microns à l'heure). Elle permet la croissance d'échantillons comportant des nanostructures de plusieurs  $\text{cm}^2$  à une vitesse d'environ une monocouche atomique par seconde. La croissance est effectuée dans une enceinte de croissance EJM sous ultra-vide, (figure 1.10). Les matériaux épitaxiés nécessitent un contrôle d'impuretés pour limiter les contaminations (induites par le vécu du réacteur de croissance) pouvant avoir des conséquences néfastes sur les propriétés physiques des matériaux épitaxiés. Les réacteurs d'épitaxie sont donc généralement dédiés à un nombre restreint de matériaux. Ils sont constitués de différents matériaux (quartz, inox ...).

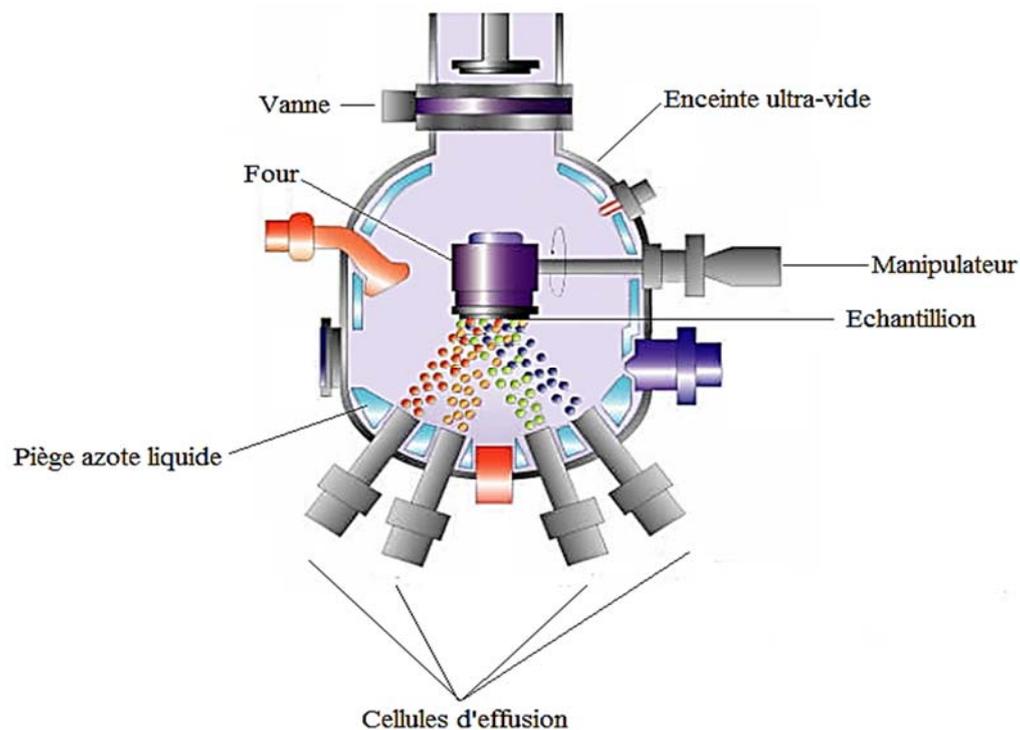


Figure 1.10. Bâti d'épitaxie par jet moléculaire [17].

### 1.7.2. L'épitaxie en phase vapeur (VPE ou CVD)

Cette technique de croissance est particulièrement prisée dans l'industrie des semi-conducteurs III-V en raison de la bonne reproductibilité. Les réactions mises en jeu sont très

différentes et elles peuvent même conduire à des effets négatifs. Il faudra donc aussi contrôler les équilibres chimiques par injection de gaz résultant de la décomposition de la source. La figure 1.11 donne un aperçu sur un banc d'épithaxie en phase vapeur.

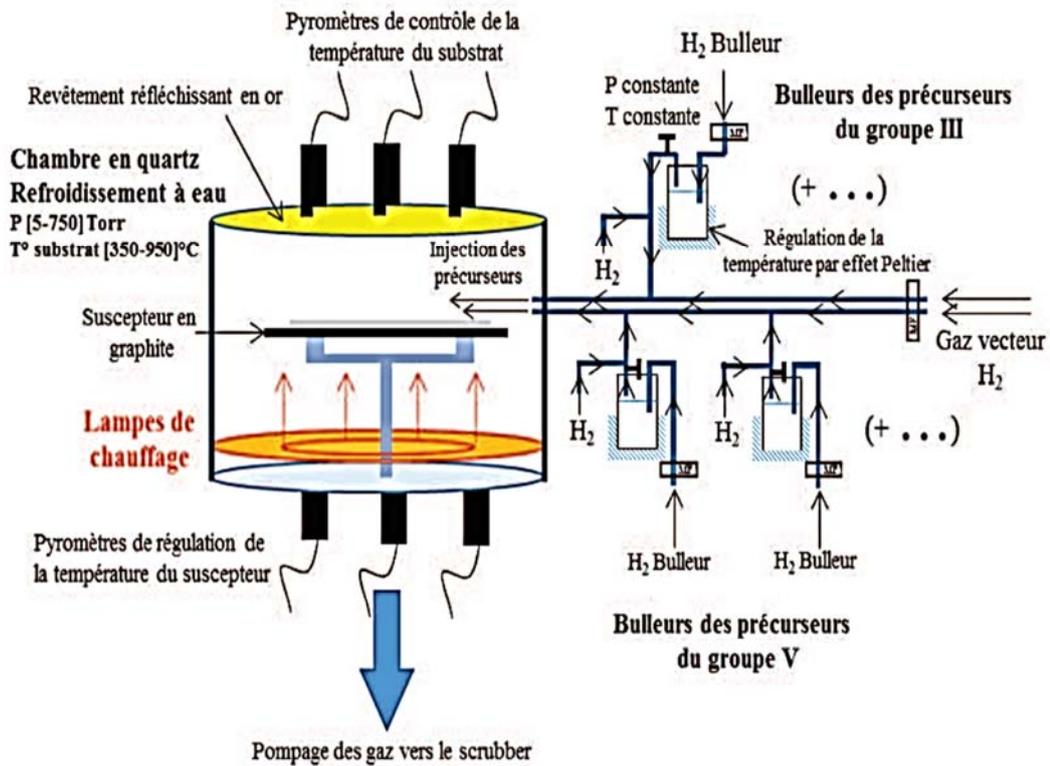


Figure 1.11. Banc d'épithaxie en phase vapeur [18].

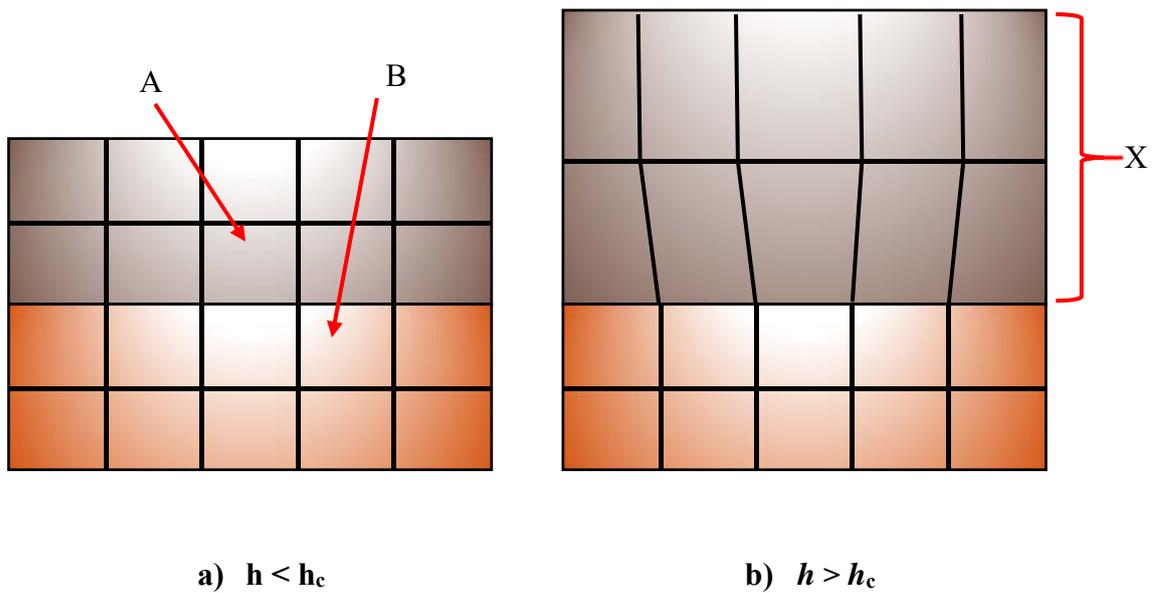
## 1.8. Épaisseur critique

L'épithaxie est une technique de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. On distingue l'homoépithaxie, qui consiste à faire croître un cristal sur un autre cristal de nature chimique identique, et l'hétéroépithaxie, dans laquelle les deux cristaux sont de natures chimiques différentes.

L'épaisseur critique, représente la valeur maximale de l'épaisseur de la couche épithaxiée qu'on ne doit pas dépasser lors du dépôt, cela veut dire qu'au-delà de cette épaisseur correspond à la situation où l'énergie élastique est suffisante pour créer un réseau de dislocation qui affecte la qualité cristalline du matériau tel que l'on peut voir sur la figure 1.12.

La croissance parfaite d'une hétéro-épitaxie n'est possible que si l'épaisseur de la couche épitaxiée ne dépasse pas l'épaisseur critique.

-  A : Couche épitaxiée
-  B : Couche substrat
-  X : Relaxation de la couche



**Figure 1.12.** Schéma (a) montrant une couche sans dislocation, (b) schéma montrant la dislocation de la couche.

Il est possible d'estimer la valeur de l'épaisseur critique d'un système via la relation [18]:

$$h_c = \frac{b}{8\pi f(1+\nu)} \left( \ln \frac{h_c}{b} + 1 \right) \quad (1.2)$$

$b$  : est la norme du vecteur de Burgers de la dislocation

$\nu$  : est le coefficient de Poisson du matériau épitaxié

$f = \frac{a_s - a_e}{a_e}$  : est le désaccord de paramètre de maille, avec  $a_s$  est le paramètre de maille du substrat et  $a_e$  est celui du matériau épitaxié.

## 1.9. Défauts structuraux

Il est connu que les défauts réduisent les performances et limitent la durée de vie des composants optoélectroniques.

### 1.9.1. Défauts ponctuels

On appelle défauts les déviations par rapport à une structure idéalisée. Les défauts cristallins sont également déterminés par des perturbations dans la disposition régulière et périodique des atomes dans le cristal. Il existe deux types de défauts : les défauts ponctuels intrinsèques et les défauts ponctuels extrinsèques.

#### a) Les défauts ponctuels intrinsèques :

Ce type de défauts ne nécessite pas l'apport d'atomes étrangers. On y trouve

- ✓ **La lacune** : est un site du réseau ne contenant aucun motif, aucun atome. La lacune notée V (pour "Vacancy" en anglais) correspond à un atome manquant dans un réseau cristallin parfait (figure 1.13).
- ✓ **L'auto-interstitiel** : Ce défaut est un atome dans une position inhabituelle. Autrement dit, il occupe une position laissée par les atomes en position substitutionnelle.

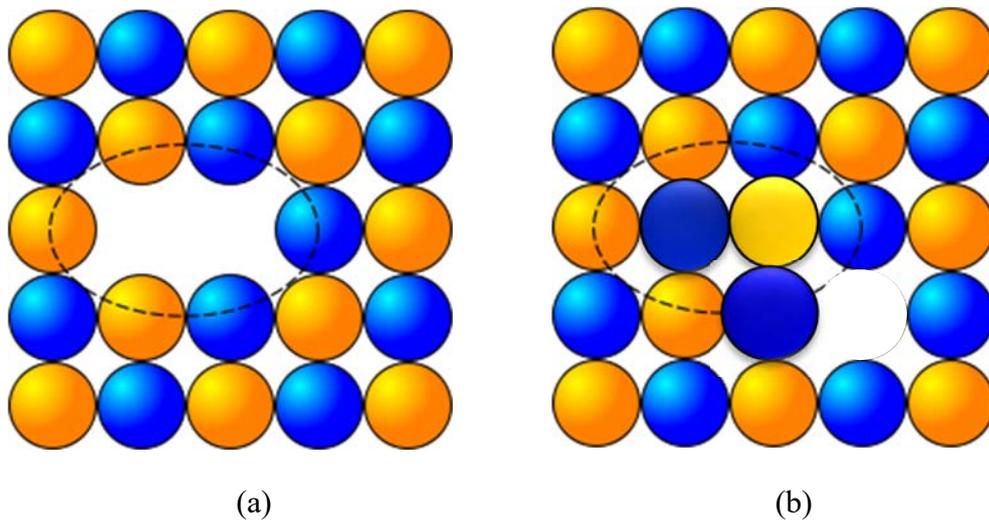


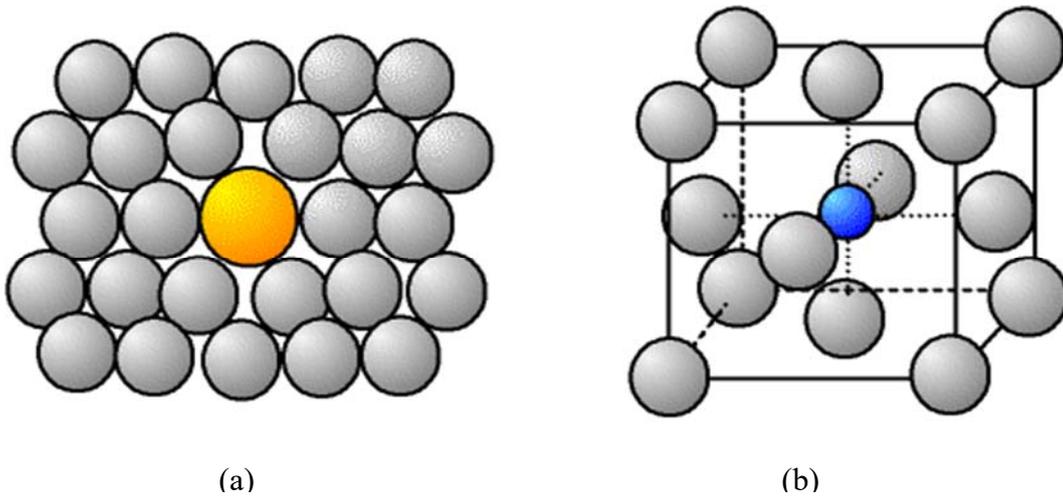
Figure 1.13. a) Une lacune dans un cristal, b) Site interstitiel [19].

#### b) Les défauts ponctuels extrinsèques :

Les défauts ponctuels extrinsèques mettent en jeu des atomes étrangers :

✓ **L'atome de substitution:** pour ce type de défaut, la position régulière occupée par un atome étranger est en général de même taille que celle de l'atome du réseau (figure 1.14.a).

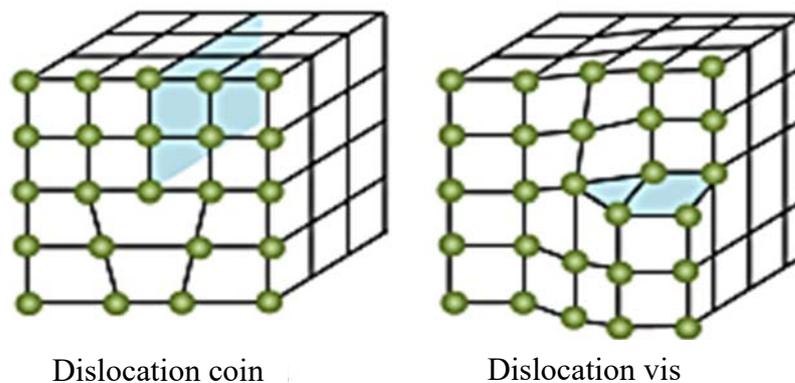
✓ **L'atome interstitiel:** L'atome étranger s'insère dans les espaces vides du réseau. La taille de l'atome étranger est en général inférieure à celle de l'atome de réseau (figure 1.14.b).



**Figure 1.14.** a) Atome en substitution, b) Atome en insertion [19].

## 1.9.2. Dislocations

Une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Notons qu'une lacune dans le réseau cristallin ralentit une dislocation ce qui durcit le matériau. Il existe deux types : dislocation vis et dislocation coin (figure 1.15).



**Figure 1.15.** Représentation schématique des dislocations.

## 1.10. La contrainte

Suite au désaccord paramétrique du paramètre de maille entre le matériau épitaxié et le substrat, une déformation ou une rupture aura lieu à l'interface reliant les deux matériaux. 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'allonge selon l'axe de croissance pour préserver son volume, c'est la contrainte en compression, (figure 1.16.a). Si ( $a_{e||} < a_s$ ): dans ce cas, la maille se dilate pour adapter son paramètre de maille dans le plan parallèle, et s'allonge selon l'axe de croissance pour préserver son volume. C'est la contrainte en tension, (figure 1.16.b).

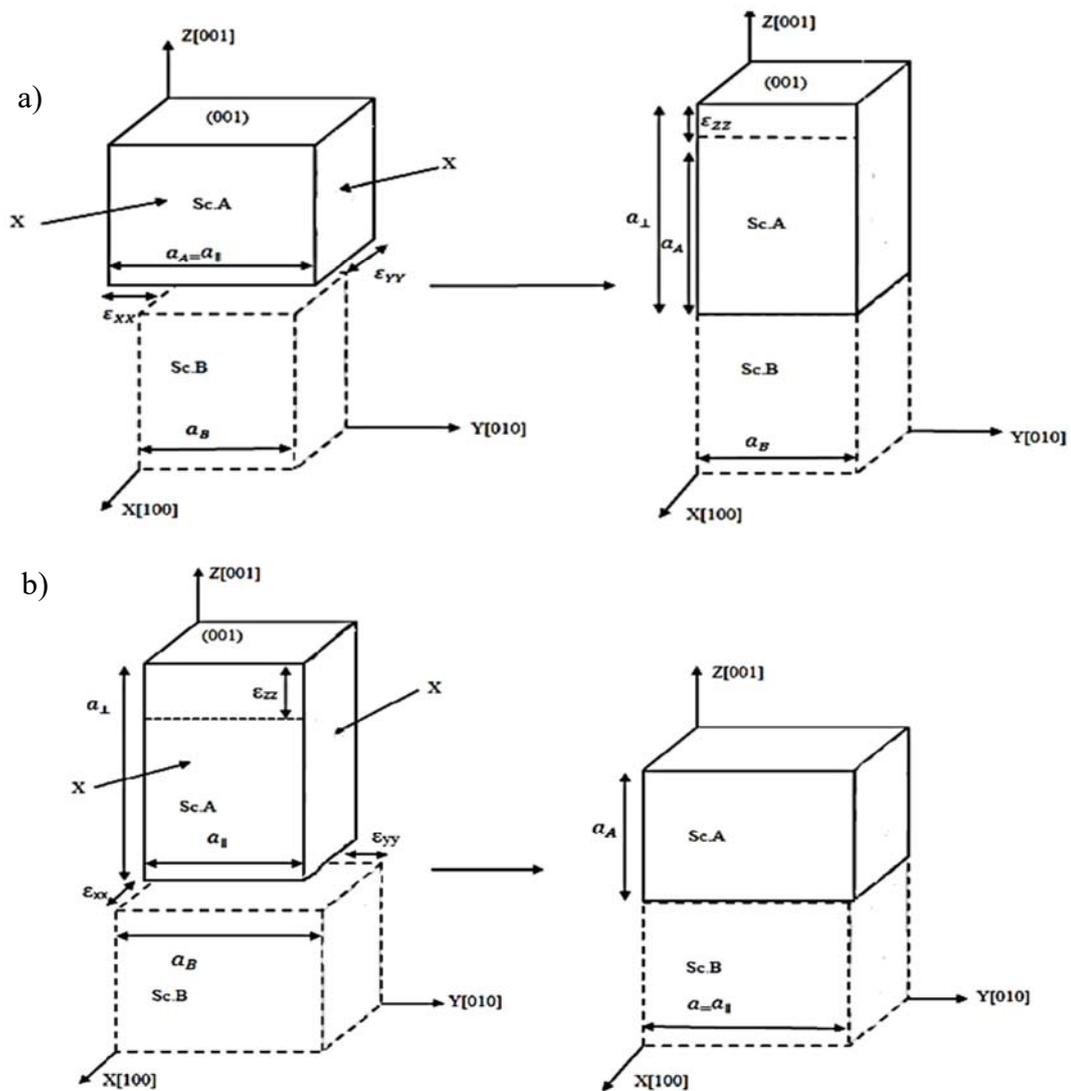
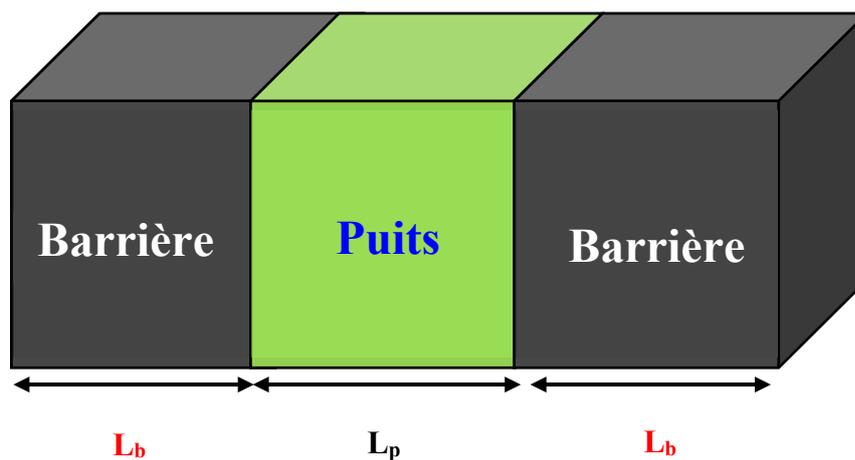


Figure 1.16. Croissance d'une couche contrainte: a) compression, b) tension [20].

## 1.11. Structure à puits quantique

Le puits quantique s'obtient en réduisant la dimension du solide dans une des directions de l'espace à une valeur proche de la longueur d'onde de De Broglie de la particule (typiquement quelques dizaines de nanomètres). Le mouvement des électrons et des trous est alors confiné dans une direction de l'espace et libre dans les deux autres directions (confinement 1D). Il est obtenu en faisant croître une couche de matériau semi-conducteur A entre deux autres couches de matériau semi-conducteur B. Ce dernier présente un gap d'énergie plus grand que celui du matériau A. La discontinuité entre les bandes d'énergie dans les deux matériaux crée une barrière de potentiel qui confine les porteurs (électron et trou) dans le puits quantique. La figure 1.17 montre un diagramme de puits en 3D.



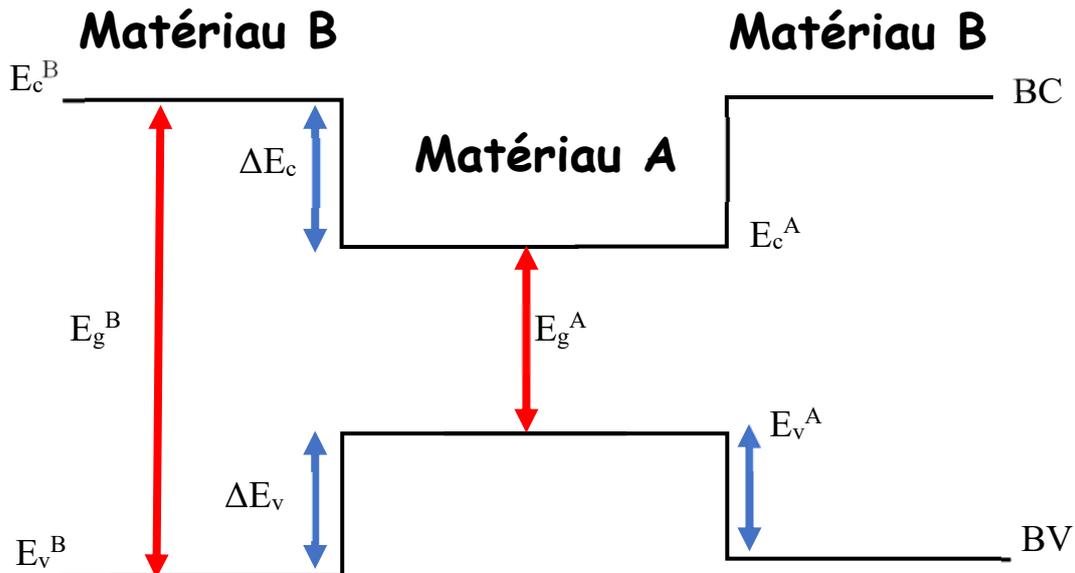
**Figure 1.17.** Diagramme de puits quantique en 3D, [14].

Dans le puits quantique, il y a trois paramètres principaux qui peuvent modifier l'énergie de confinement :

- La largeur de puits quantique  $L_p$ .
- L'énergie de la bande de conduction  $\Delta E_c$ .
- L'énergie de la bande de valence  $\Delta E_v$ .

### 1.11.1. Les alignements des bandes

L'épitaxie d'un matériau sur un autre dans une hétérojonction semi-conductrice et vu la différence des deux bandes interdites crée un décalage des bandes qui décrit l'alignement relatif des bandes d'énergie tel que l'on peut voir sur la figure 1.18.



**Figure 1.18.** Diagramme de bandes d'énergie d'un puits quantique.

$\Delta E_c$ : c'est la différence d'énergie qui sépare la bande de conduction du matériau B et celle de matériau A, ( $\Delta E_c = E_c^B - E_c^A$ ).

$\Delta E_v$ : c'est la différence d'énergie qui sépare la bande de valence du matériau A et celle du matériau B, ( $\Delta E_v = E_v^A - E_v^B$ ).

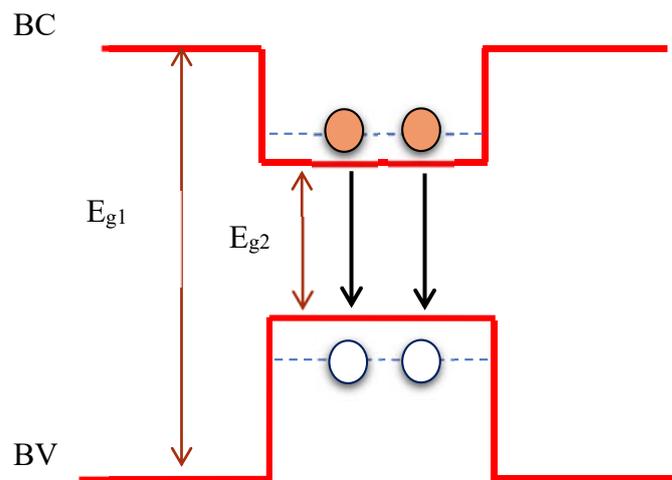
En conséquence, le matériau A, joue le rôle d'une zone d'accumulation des électrons et des trous quant au matériau B, il joue le rôle de puits (zone de déplétion) pour les électrons et les trous.

### 1.11. 2. Les types de puits quantique

Selon la nature de la discontinuité des bandes interdites à l'interface Puits/barrière, on distingue trois types de puits quantiques :

### ✓ Puits quantique type I

Les extrema des bandes de valence et de conduction sont situés dans le même matériau, c'est-à-dire dans la même région de l'espace, comme le montre la figure 1.19. L'énergie du photon émis dépend de l'énergie de confinement des porteurs et du gap du matériau puits. La principale caractéristique des hétérostructures du type I est que les transitions électroniques entre les états de valence et de bande de conduction sont des transitions directes.



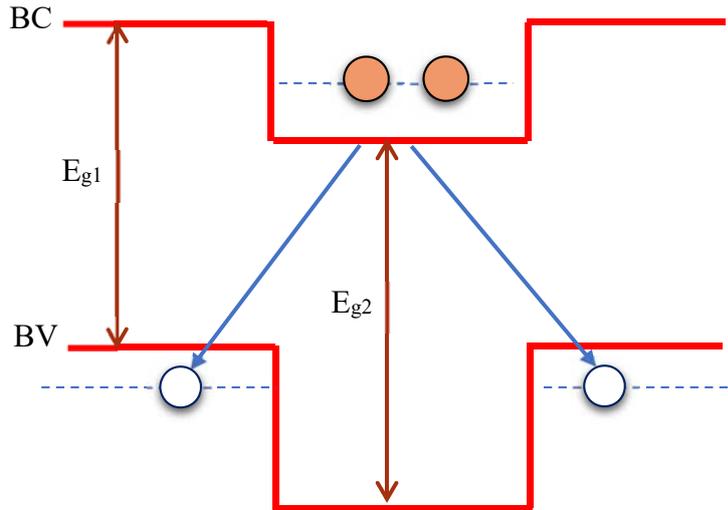
**Figure 1.19.** Puits quantique type I.

### ✓ Puits quantique type II

Les extrema des bandes de valence et de conduction ne sont pas situés dans la même région de l'espace, comme le montre la figure 1.20. Dans ce cas, l'énergie du photon dépend des énergies de confinement des porteurs mais dépend également des gaps des deux matériaux formant l'hétérostructure.

Le matériau  $SC_1$  agit comme un puits quantique pour les électrons et de barrière de potentiel pour les trous. Le matériau  $SC_2$  joue le rôle de puits quantique pour les trous et de barrière de potentiel pour les électrons [14].

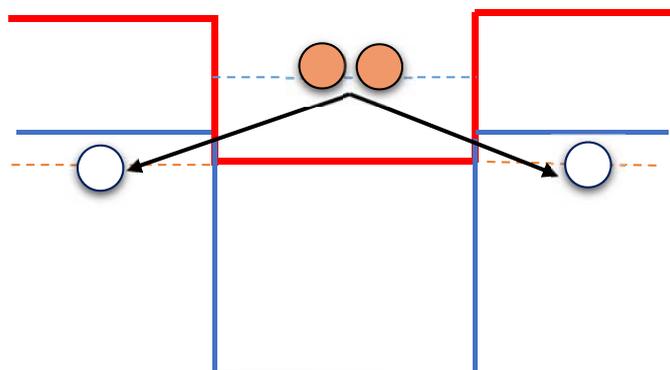
Les transitions dans ce type d'hétérostructure sont différentes de celles de l'hétérostructure de type I, dans le sens où les transitions optiques seront indirectes.



**Figure 1.20.** Puits quantique type II.

✓ **Puits quantique de type III**

L'hétérostructure du cas de la figure 1.21 présente une spécificité toute particulière résultant du fait que la bande de conduction du matériau puits a une énergie inférieure à la bande de valence dans la barrière. Il en résulte que les électrons liés de la bande de valence de la barrière se libèrent dans la bande de conduction du matériau puits. La structure présente un comportement semi-métallique.



**Figure 1.21.** Puits quantique type III.

## 1.12. Niveaux d'énergies dans un puits quantique

Il existe des niveaux d'énergie possibles pour les électrons dans la bande de conduction et différents niveaux d'énergie pour les trous dans la bande de valence (figure 1.22).

Il existe trois niveaux d'énergie dans un semi-conducteur à puits quantique :

- ✚ Niveaux d'énergies des électrons ( $E_{cn}$ ).
- ✚ Niveaux d'énergies des trous lourds ( $E_{hhn}$ ).
- ✚ Niveaux d'énergies des trous légers ( $E_{lh}$ ).

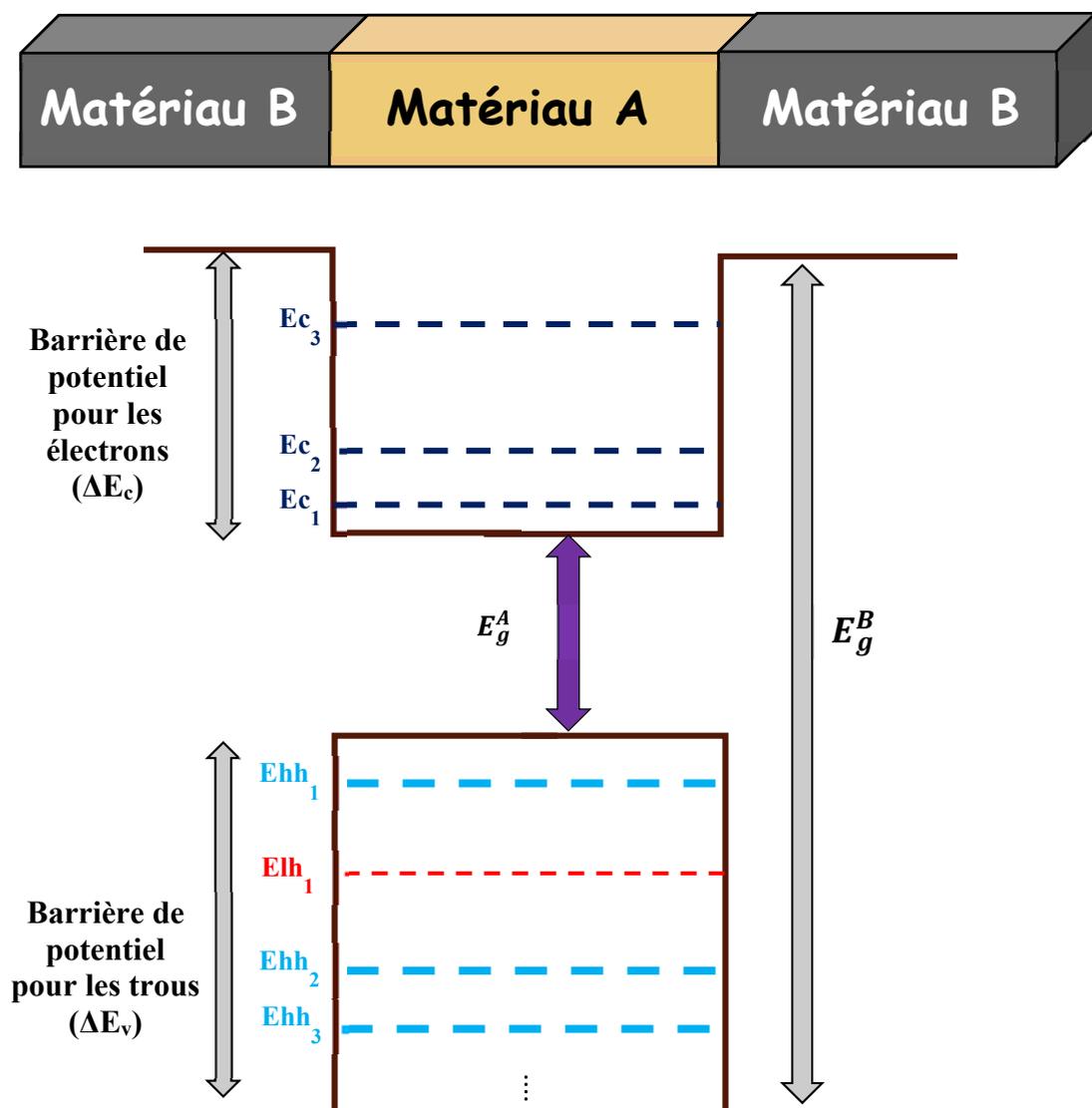


Figure 1.22. Structure des niveaux énergétiques dans un puits quantique.

Dans un puits quantique, les porteurs de charge sont confinés à différents niveaux d'énergie. Pour déterminer ces valeurs propres d'énergie dans un puits de potentiel unidimensionnel de largeur  $L_p$  dans la direction de l'axe  $x$ , on doit résoudre l'équation de Schrödinger. L'équation de Schrödinger indépendante du temps peut être écrite comme suit :

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x) \quad (1.3)$$

Avec :

- ✓  $\hbar$ : Constante réduite de Planck.
- ✓  $m^*$ : Masse effective de la particule.
- ✓  $\varphi(x)$ : Fonction d'onde.
- ✓  $V(x)$ : Fonction décrivant le potentiel pour chaque valeur de  $x$ .
- ✓  $E$ : Énergie de quantification.

L'équation de Schrödinger est l'équation fondamentale de la physique quantique, tel que la loi de Newton en physique classique. On la retrouve pour décrire des phénomènes assez divers, que ce soit en optique quantique (propagation des faisceaux laser), en physique atomique (supraconductivité, condensation de Bose-Einstein), en technologie électronique (semi-conducteurs) d'où notre intérêt. L'équation de Schrödinger prédit que l'énergie de la particule en évolution dans un tel puits quantique sera quantifiée.

### 1.13. Gain optique

L'amplificateur optique est un dispositif important déployé pour la communication optique et la physique des lasers. Le gain optique est le facteur le plus important pour la fabrication des lasers à semi-conducteurs, car il décrit l'amplification optique dans les matériaux semi-conducteurs. Ce coefficient doit non seulement être positif pour que le milieu soit amplifié, mais doit également atteindre une valeur telle que les pertes du résonateur soient compensées, pour qu'une émission laser apparaisse.

L'optimisation structurelle nécessite un grand degré de calcul numérique car il existe un grand nombre de paramètres laser, tels que la composition des puits et la barrière quantique, le nombre de puits, la longueur de la cavité et la réflectivité.

Certains auteurs ont proposé des méthodes pour déterminer le gain optique des structures de puits quantiques. Considérons le modèle de Al et Asada [21], qui suppose que toutes les

sous-bandes sont paraboliques et que les transitions obéissent à la règle de sélection-k (figure. 1.23).

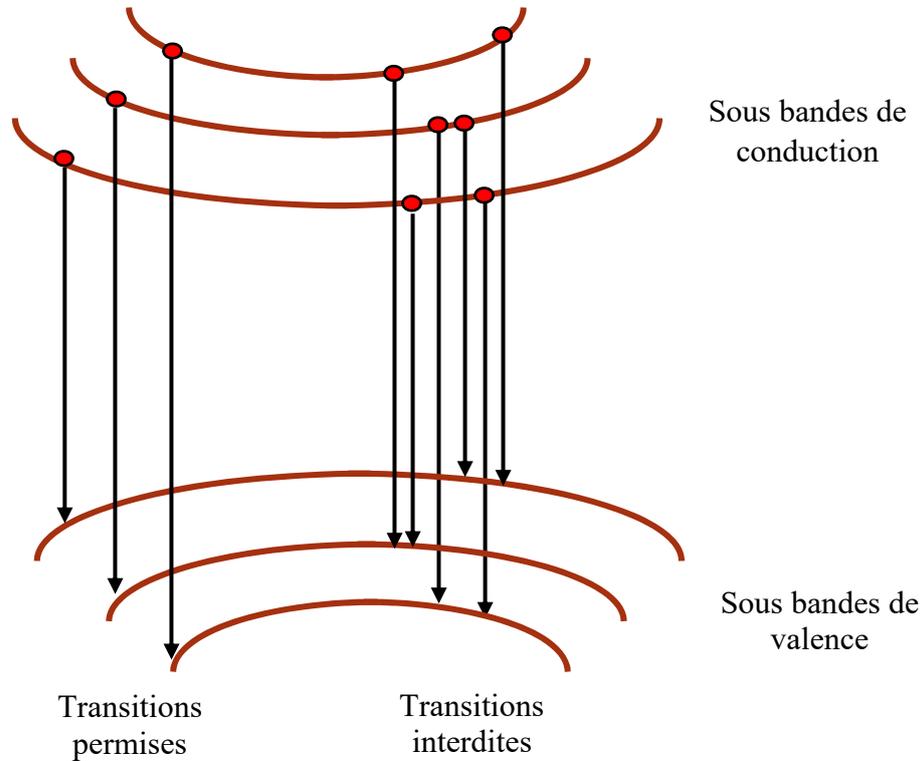


Figure 1.23. Transition entre les sous-bandes d'un puits quantique et règles de sélections.

Le gain optique est exprimé selon la relation suivante :

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\pi \hbar^2 L_p} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left( \frac{m_e^* m_{hh}^*}{m_e^* + m_{hh}^*} \right) \sum \int_{E_{tr}}^{\infty} |R_{ch}|^2 (f_c - f_v) L(E_{ch}) dE_{ch} \quad (1.4)$$

Où  $\hbar$  la constante réduite de Planck,  $L_p$  la largeur du puits,  $\omega$  la fréquence angulaire de la lumière,  $\mu$  la mobilité,  $\varepsilon$  la constante diélectrique,  $m_e^*$  et  $m_{hh}^*$  la masse effective des électrons et des trous lourds, respectivement, dans la bande de conduction et la bande de valence.  $f_c$  et  $f_v$  sont les fonctions de distribution de Fermi Dirac pour les bandes de conduction et de valence.

$$\begin{cases} f_c = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E - E_{fc}}{k_B T}\right)}} \\ f_v = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E_{fv} - E}{k_B T}\right)}} \end{cases} \quad (1.5)$$

$E_{f_c}$  et  $E_{f_v}$  sont les quasi-niveaux de Fermi des électrons et des trous, respectivement.

L'élément de la matrice optique ( $R_{ch}$ ) pour le mode TE, est donné par l'équation :

$$R_{ch} \cong \frac{3}{4} \left( 1 + \frac{E_{eh}}{E_{cn}} \right) \frac{e^2 \hbar^2}{2E_{ev}} \frac{E_g(E_g + \Delta_{SO})}{E_g + (2/3)\Delta_{SO}} \frac{1}{m_e^*} \quad \text{si } E > E_{ch} \quad (1.6)$$

$$R_{ch} \cong \frac{3}{2} \frac{e^2 \hbar^2}{2E_{ev}} \frac{E_g(E_g + \Delta_{SO})}{E_g + (2/3)\Delta_{SO}} \frac{1}{m_e^*} \quad \text{si } E \leq E_{ch} \quad (1.7)$$

$L(E_{ch})$  : est la fonction d'élargissement :

$$L(E) = \frac{\hbar/\tau_{intr}}{(E - \hbar\omega)^2 + (\hbar/\tau_{intr})^2} \quad (1.8)$$

$\tau_{intr}$  est le temps de relaxation intrabande.

## 1.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu de manière générale quelques concepts de bases sur les matériaux semi-conducteurs, plus précisément les semi-conducteurs III-V, qui nous intéressent en raison de leurs caractéristiques et propriétés physiques et électroniques particulières, en commençant par définir les alliages possibles : (binaire, ternaire, quaternaire) et structures cristallines. Nous avons ensuite présenté la structure de bande d'énergie, ainsi qu'un bref aperçu sur les principales techniques d'épitaxie et également certaines propriétés importantes tel que : l'épaisseur critique, la contrainte, la disposition des bandes....

On s'est intéressées aussi aux différents types de puits quantique et on a fini par décrire les niveaux énergétiques obtenus par la résolution l'équation de Schrödinger ainsi que le gain optique.

# Chapitre 2 : Etude d'une structure à puits quantique à base du quinaire InGaNaSb/InP

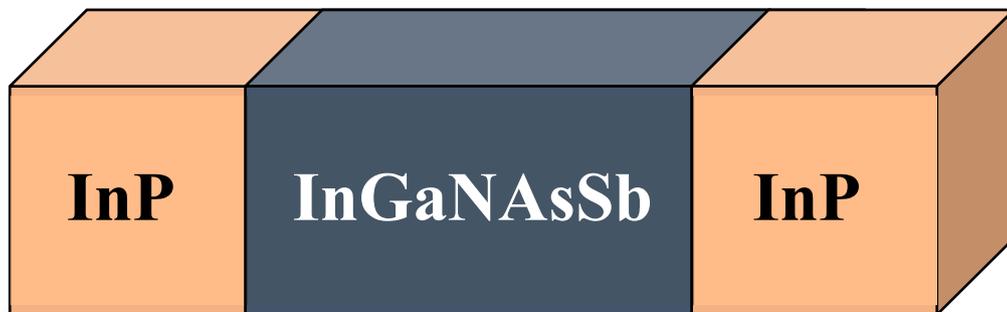
## 2.1. Introduction

L'étude des matériaux semi-conducteurs, tant théoriquement que pratiquement, constitue certainement une branche majeure de la physique du solide. De nombreux composés (binaires : GaAs, InSb, ternaires InGaAs, GaNaSb,...) ont été étudiés en s'appuyant sur les connaissances acquises à partir des éléments simples. La recherche d'alliages toujours plus performants a conduit à explorer des combinaisons de matériaux III-V. L'incorporation de l'azote (N) et de l'antimoine (Sb) en substitution avec les atomes de l'arsenic a ouvert la voie à des propriétés optiques et électroniques uniques, de nombreuses recherches sont engagées dans cette voie [9-12]. Tout au long de ce chapitre nous réaliserons une étude théorique des propriétés optoélectroniques de la structure du puits quantique InGaNaSb/InP.

Dans la première partie, nous examinerons l'effet de la composition de l'indium (In), l'azote (N) et de l'antimoine (Sb) sur le paramètre de maille, la bande interdite (gap) ainsi que d'autres paramètres. Dans la deuxième partie, nous verrons cet effet sur le coefficient du gain optique de cette structure.

## 2.2. Propriétés optoélectroniques

La figure 2.1 nous montre la structure que nous allons étudier.



**Figure 2.1.** Schéma de la structure à puits quantique InGaNaSb/InP.

### 2.2.1. Paramètre de maille

Le paramètre de maille est la distance qui sépare deux mailles consécutives dans une structure cristalline. Lors de la fabrication d'alliages avec différents semi-conducteurs, le paramètre de maille de l'alliage évolue linéairement en fonction de la composition des différents binaires qui le composent [22].

Le paramètre de maille du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$ , est déterminé par interpolation linéaire des paramètres binaires qui le composent à l'aide de la loi de Végard [22].

Il sera défini par l'expression suivante :

$$a(x, y, z) = x \cdot y \cdot a(\text{InN}) + x \cdot (1 - y - z) \cdot a(\text{InAs}) + x \cdot z \cdot a(\text{InSb}) + y \cdot (1 - x) \cdot a(\text{GaN}) + (1 - x) \cdot (1 - y - z) \cdot a(\text{GaAs}) + z \cdot (1 - x) \cdot a(\text{GaSb}). \quad (2.1)$$

Où :  $x, y, z$  sont, respectivement, les concentrations des atomes d'indium, d'azote et d'antimoine.

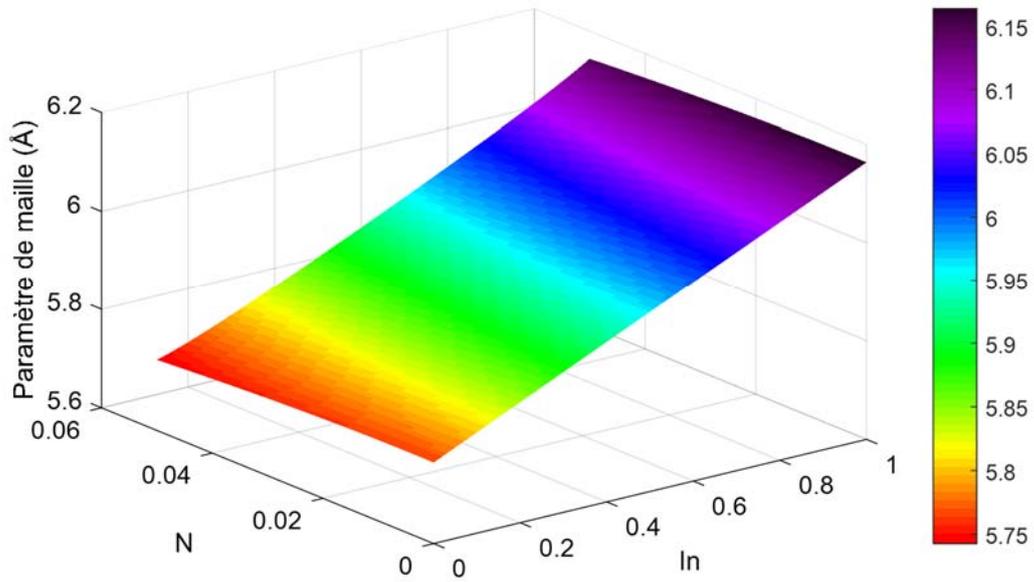
Le tableau suivant donne les paramètres de maille des binaires des semi-conducteurs III-V : InN, InAs, InSb, GaN, GaAs et GaSb, InP utilisés dans ce travail.

**Tableau 2.1.** Paramètres de maille des matériaux binaires III-V à T=300 K [23]

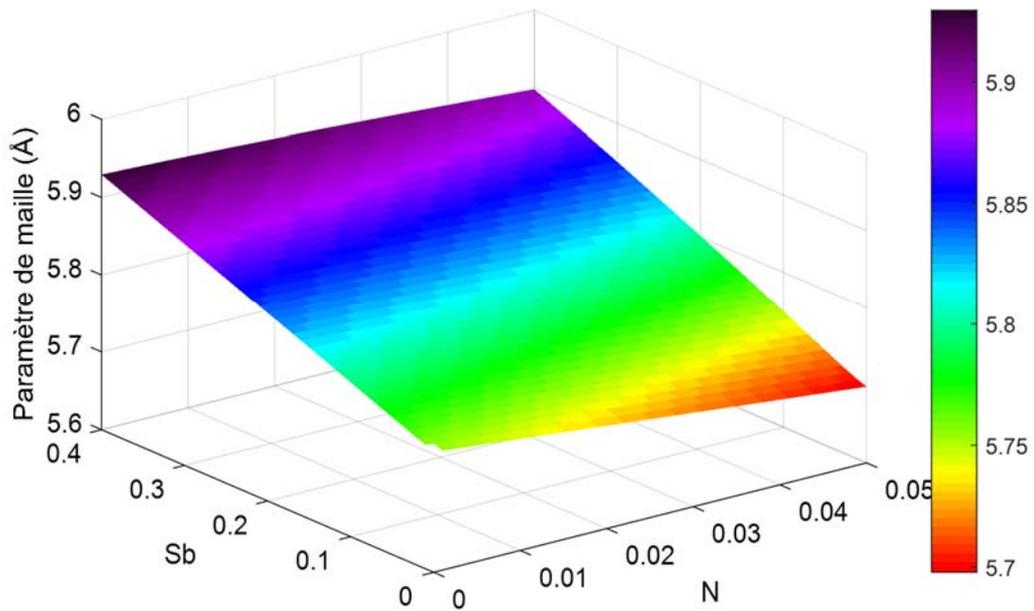
a	InN	InAs	InSb	GaN	GaAs	GaSb	InP
(Å)	4.986	6.058	6.479	4.52	5.653	6.096	5.869

Les figures 2.2 et 2.3 illustrent la variation du paramètre de maille de l'alliage quinaire  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  en fonction des concentrations d'indium, d'azote (N) et d'antimoine (Sb).

À partir de ces figures, nous constatons que le paramètre de maille augmente avec l'augmentation des concentrations d'indium et d'antimoine, tandis que l'augmentation de la concentration d'azote (N) réduit la valeur de ce paramètre.



**Figure 2.2.** Variation du paramètre de maille d' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$  en fonction des concentrations d'In et de N.



**Figure 2.3.** Variation du paramètre de maille d' $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  en fonction des concentrations de N et de Sb.

## 2.2.2. La contrainte

Quand on applique une contrainte à un corps solide il se déforme cela suite au désaccord de maille des couches du matériau épitaxié et le substrat. L'effet de la contrainte se traduit par un déplacement des extrema des bandes électroniques induisant une levée de dégénérescence de la bande de valence. Dans notre étude, l'épitaxie du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  sur un substrat InP, et vue la différence de valeur des paramètres de mailles des deux matériaux, provoque l'apparition d'une contrainte.

Dans le plan de la couche, nous aurons une contrainte biaxiale  $\varepsilon_{//}$ :

$$\varepsilon_{//} = \frac{a_s - a_e}{a_e} \quad (2.2)$$

$a_s$  est le paramètre de maille du substrat InP et  $a_e$  celui du matériau épitaxié InGaNASb.

Dans la direction de croissance, on aura une contrainte uniaxiale  $\varepsilon_{\perp}$ :

$$\varepsilon_{\perp} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \varepsilon_{//} \quad (2.3)$$

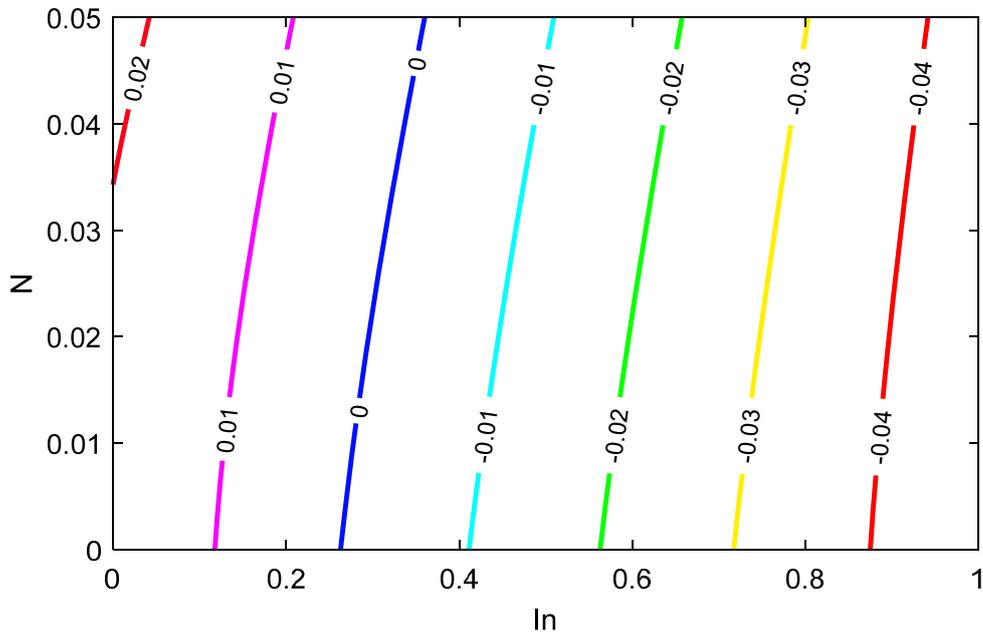
$C_{11}$  et  $C_{12}$  sont les coefficients d'élasticité obtenus à partir de la loi de Végard.

Les figures 2.4 et 2.5 montrent l'évolution de la contrainte en fonction des concentrations en In, N et Sb.

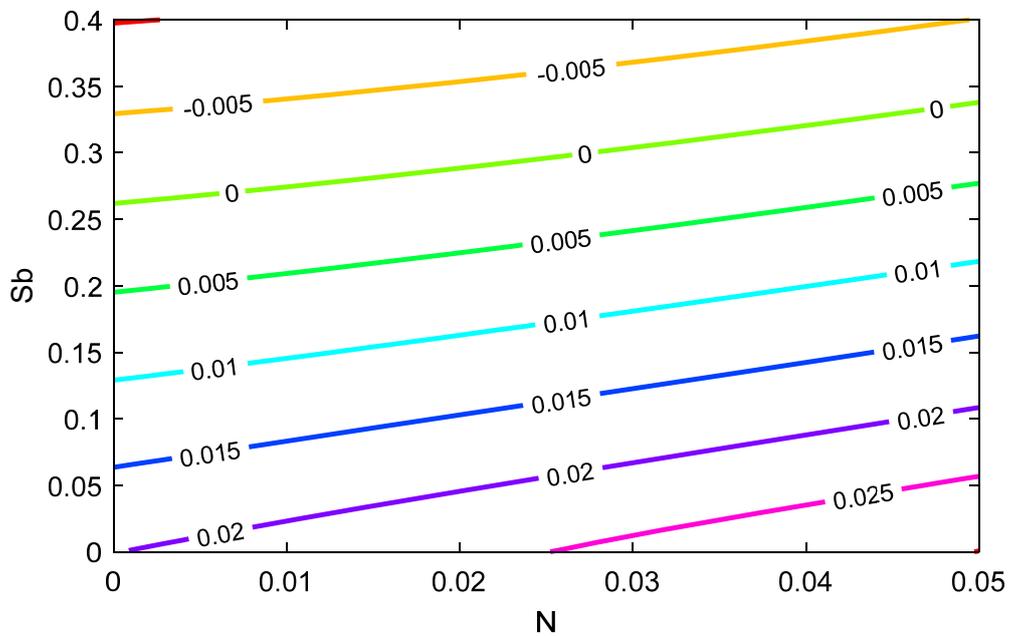
**Tableau 2.2.**  $C_{11}$  et  $C_{12}$  des matériaux binaires III-V à  $T=300$  K [23]

	InN	InAs	InSb	GaN	GaAs	GaSb
$C_{11}(10^{11}\text{dyn/cm}^2)$	19.2	8.329	6.608	29.1	11.88	8.838
$C_{12}(10^{11}\text{dyn/cm}^2)$	7.30	4.526	3.531	14.8	5.38	4.027

À partir de ces figures, nous constatons que la contrainte diminue avec l'augmentation des concentrations d'indium et d'antimoine, tandis que l'augmentation de la concentration d'azote augmente la contrainte. Nous constatons également que le matériau épitaxié peut être accordé en maille au substrat ( $x=0.28$ ,  $y=0.013$ ,  $z=0.25$ ), comme il peut être relaxé en exposant des contraintes de type compression ou de tension. Par exemple, on peut avoir une contrainte en compression pour la combinaison ( $x=0.35$ ,  $y=0.013$ ,  $z=0.25$ ) et une contrainte en tension pour ( $x=0.2$ ,  $y=0.013$ ,  $z=0.25$ ).



**Figure 2.4.** Variation de la contrainte en fonction des concentrations In et N de la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}/\text{InP}$ .



**Figure 2.5.** Variation de la contrainte en fonction des concentrations N et Sb de la structure  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$ .

### 2.2.3. Energie de la bande interdite

L'incorporation d'atomes de N et de Sb dans le matériau InGaAs peut être modélisée à l'aide du modèle BAC (band anticrossing model) démontrant que l'ajout d'atomes de N conduit à la création d'un état localisé conduisant à la création de sous-bandes de conduction  $E_{c+}$  et  $E_{c-}$  (figure 2.6).

Cela se produit grâce à l'interaction entre le niveau de résonance de l'azote et la bande de conduction en raison de la grande différence d'électronégativité entre les atomes d'As et de N [12].

L'introduction de Sb dans la matrice de InGaAs provoque une perturbation des états électroniques, qui se reflète principalement dans la bande de valence. Comme l'effet de l'azote sur la bande de conduction de l'InGaAs, l'introduction des atomes de Sb modifie la bande de valence et l'éclate en deux sous bandes  $E_{v+}$  et  $E_{v-}$  (figure 2.6), [12].

Le maximum de la bande de valence est poussé vers une énergie élevée, tandis que le minimum de la bande de conduction est poussé vers une énergie faible, entraînant une diminution de  $E_g$ , comme le montre la figure 2.6.

Les énergies des nouvelles bandes sont obtenues à partir des équations (2.4) et (2.5).

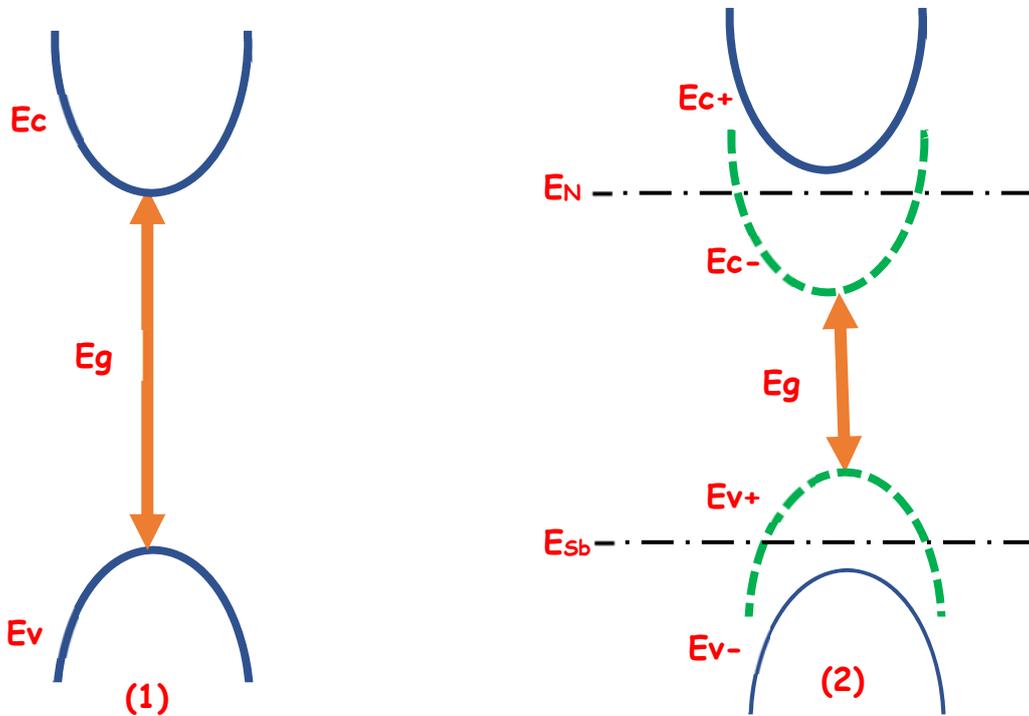
$$E_{c\pm} = \frac{1}{2} \left[ E_N + E_c(\text{InGaAs}) \pm \sqrt{(E_N + E_c(\text{InGaAs}))^2 + 4C_N^2 y} \right] \quad (2.4)$$

$$E_{v\pm} = \frac{1}{2} \left[ E_{Sb} + E_v(\text{InGaAs}) \pm \sqrt{(E_{Sb} + E_v(\text{InGaAs}))^2 + 4C_{Sb}^2 z} \right] \quad (2.5)$$

Où  $E_N = 1.65(1-x) + 1.44x - 0.38x(1-x)$  en eV et  $E_{Sb} = -1$  eV, sont respectivement les états d'impuretés résonants avec la bande de conduction et la bande de valence du matériau InGaAs,  $C_N = 2.4(1-x) + 1.75x$  et  $C_{Sb} = 1.05$  eV sont des termes de couplage [12].

Les nouvelles positions énergétiques des bandes nous aiderons à obtenir l'expression de l'énergie de la bande interdite calculée à partir de la relation :

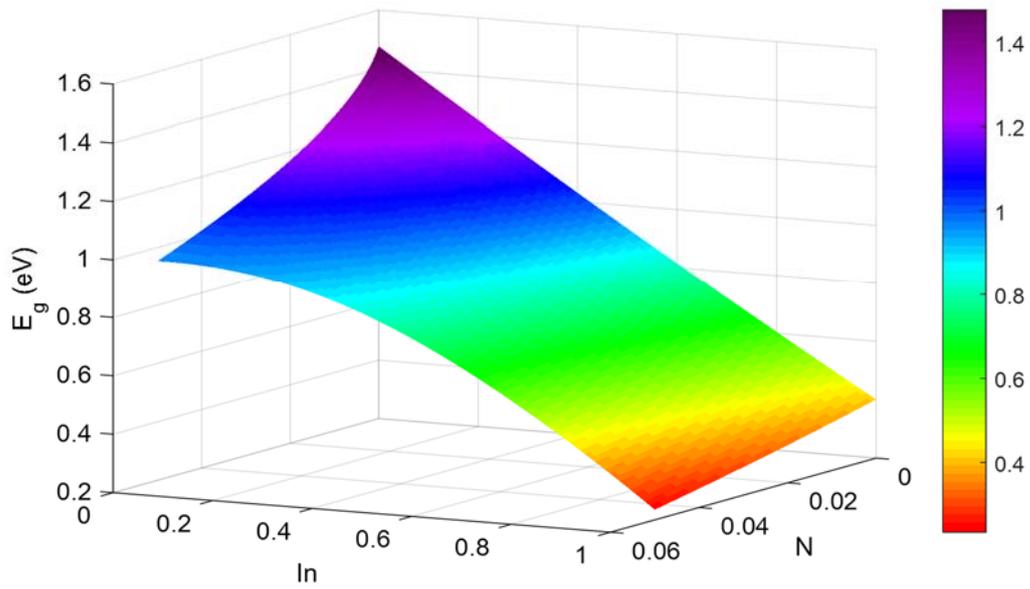
$$E_g = E_{c-} - E_{v+} \quad (2.6)$$



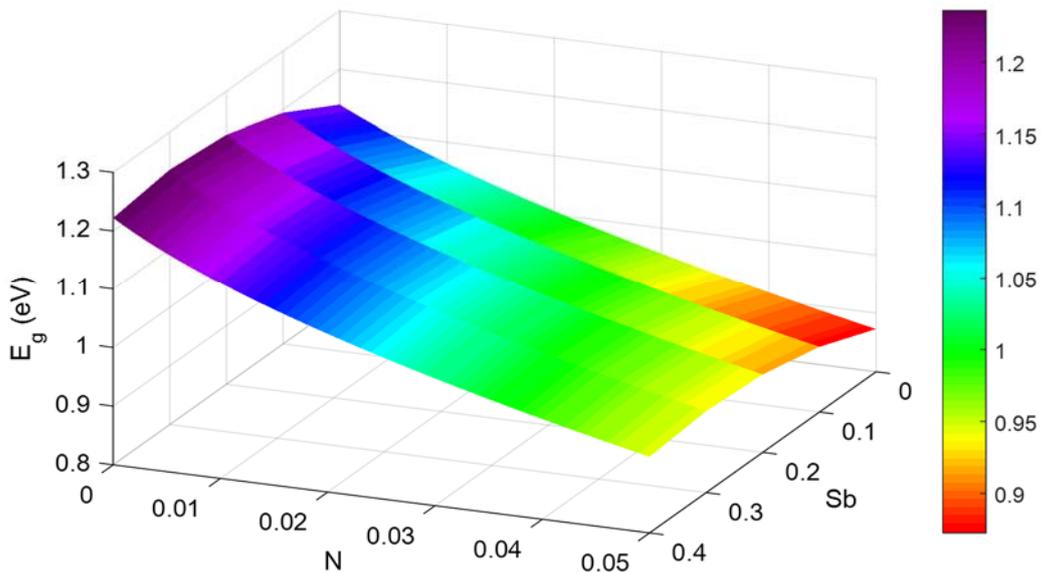
**Figure 2.6.** L'état des bandes d'énergie dans la structure InGaNASb/InP : (1) avant et (2) après éclatement, [14].

Les figures 2.7 et 2.8 montrent la variation de l'énergie de la bande interdite (gap) de la structure InGaNASb/InP en fonction des concentrations en indium, azote et antimoine, rappelons que l'effet de la contrainte a été pris en considération.

On constate qu'on introduisant l'azote en faible quantité et l'indium dans la structure réduit fortement la valeur de l'énergie de la bande interdite, tandis que l'incorporation d'antimoine l'augmente.



**Figure 2.7.** Variation de l'énergie de la bande interdite en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.9-y}\text{Sb}_{0.1}$  à  $T=300\text{K}$ .



**Figure 2.8.** Variation de l'énergie de la bande interdite en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$  à  $T=300\text{K}$ .

#### 2.2.4. La masse effective

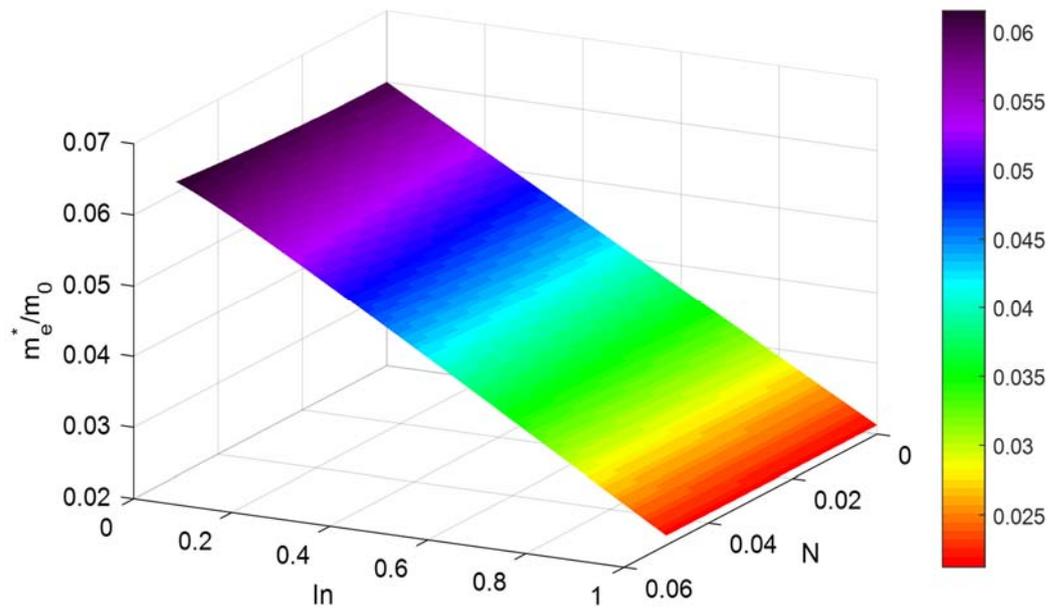
La masse effective est un concept utilisé en physique du solide pour étudier le transport des électrons. Au lieu de décrire des électrons comme ayant une masse fixe évoluant dans un certain potentiel, nous les décrivons comme des électrons libres avec une masse effective variable. C'est un paramètre qui peut être positive ou négative, supérieure ou inférieure à la masse réelle de l'électron.

- ✓ Dans le cas des semiconducteurs à bande interdite directe (InP), la bande de conduction est isotrope au voisinage de  $k=0$ , dont la masse effective isotrope et la mobilité électronique dans le cristal restera constante quelle que soit la direction de propagation.
  
- ✓ Dans le cas d'une bande interdite indirecte (comme le silicium Si), la bande de conduction n'est plus isotrope, La surface  $E(k)=C^{te}$  n'est plus une sphère comme dans le cas précédent, mais une série d'ellipsoïdes orientés selon les trois directions de l'espace.

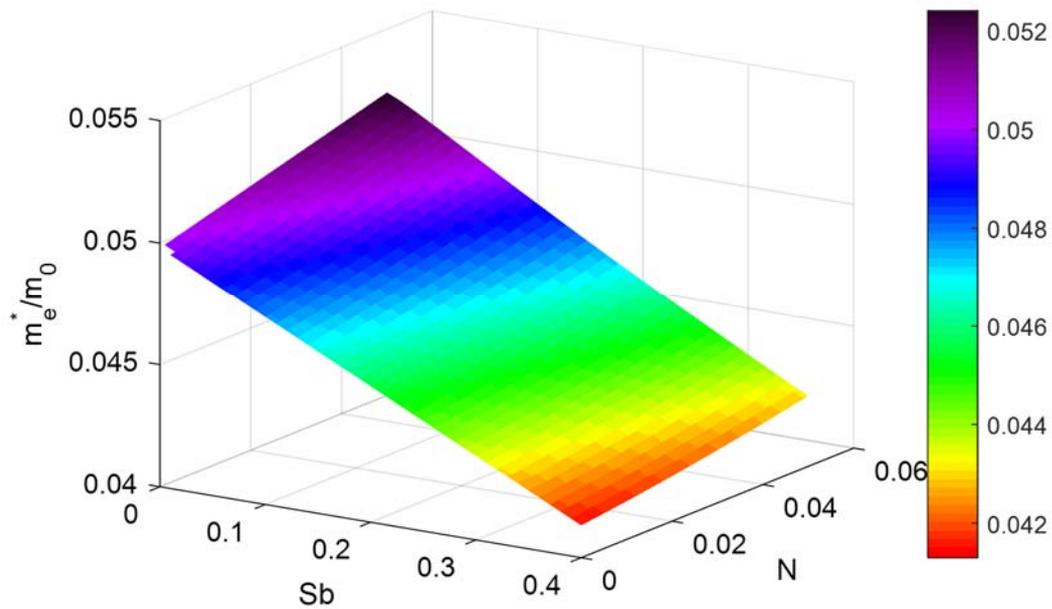
La masse effective des porteurs est inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion de l'énergie dans l'espace  $k$ . La masse effective des différents porteurs a été calculée à partir de la loi de Vegard.

Les figures 2.9 et 2.10 montrent l'évolution de la masse effective des électrons du matériau InGaNASb en fonction des concentrations d'indium, d'azote et d'antimoine.

On constate que l'introduction d'azote en petite quantité entraînera l'augmentation de la valeur de la masse effective des électrons dans le puits tandis que l'incorporation d'indium et d'antimoine réduit la valeur de la masse effective des électrons.

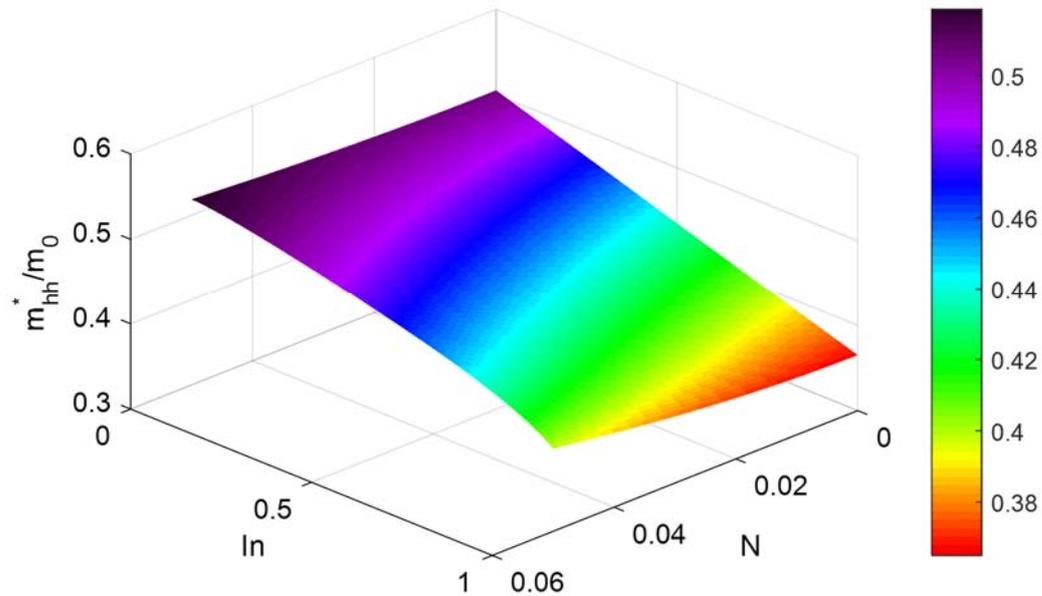


**Figure 2.9.** Variation de la masse effective des électrons en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ .

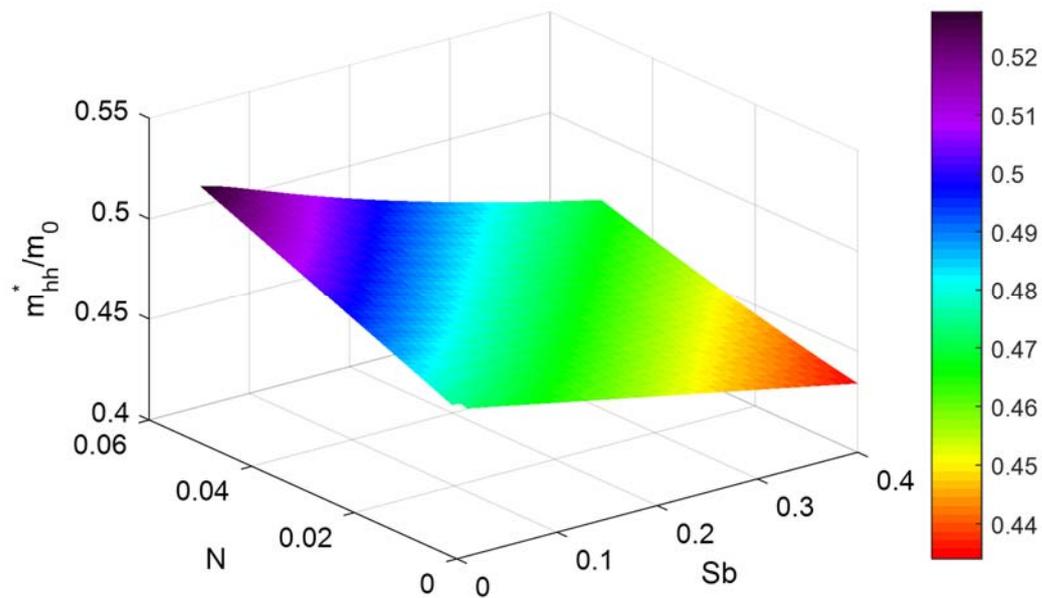


**Figure 2.10.** Variation de la masse effective des électrons en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$ .

Les figures 2.11 et 2.12 montrent l'évolution de la masse effective des trous lourds du matériau en fonction des concentrations d'indium, d'azote et d'antimoine. On constate que l'insertion d'azote en petite quantité entraînera l'augmentation de la valeur de la masse effective des trous lourds tandis que l'incorporation d'In et de Sb la réduit.

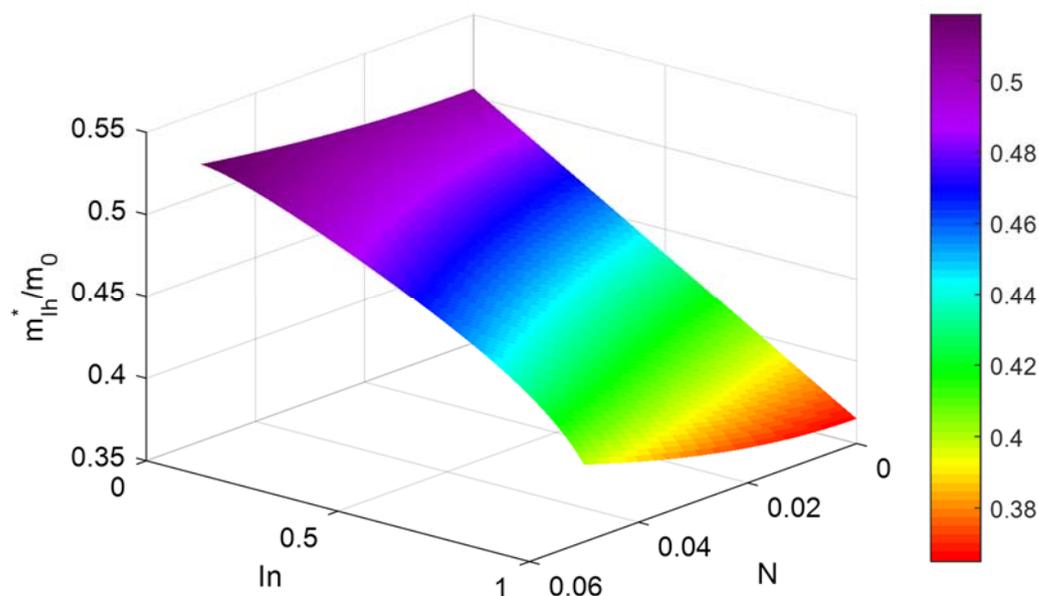


**Figure 2.11.** Variation de la masse effective des trous lourds en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ .

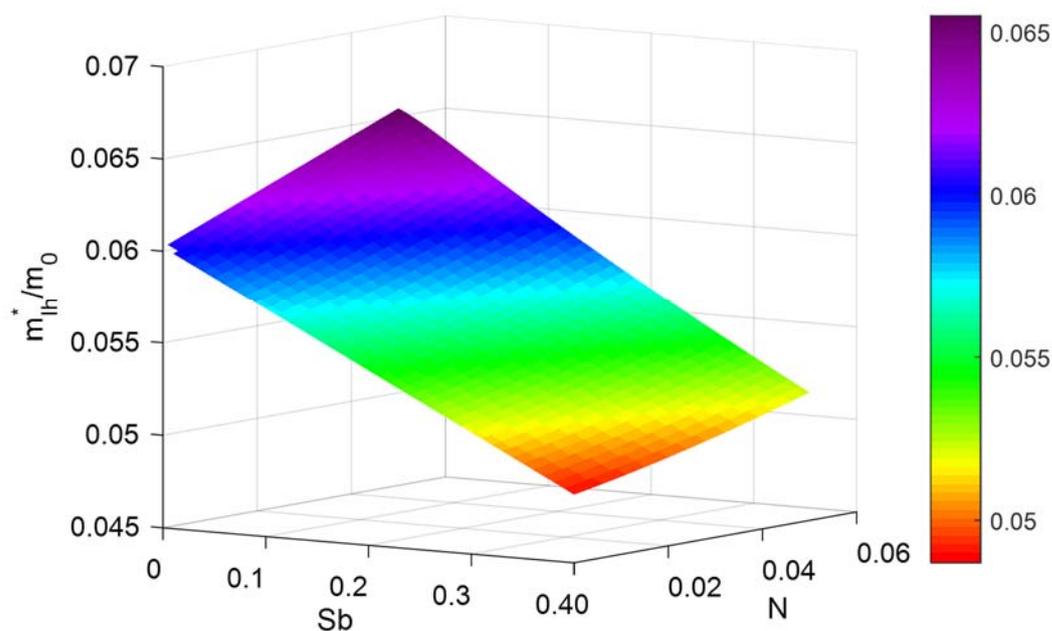


**Figure 2.12.** Variation de la masse effective des trous lourds en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$ .

Les figures 2.13 et 2.14 montrent l'évolution de la masse effective des trous légers du matériau en fonction des concentrations d'indium, d'azote et d'antimoine. On constate que l'insertion d'azote en petite quantité entraînera l'augmentation de la valeur de la masse effective des trous légers tandis que l'incorporation d'In et de Sb la réduit.



**Figure 2.13.** Variation de la masse effective des trous légers en fonction des concentrations N et In de l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}$ .



**Figure 2.14.** Variation de la masse effective des trous légers en fonction des concentrations N et Sb de l' $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z$ .

### 2.2.5. Les alignements des bandes

Dans une hétérojonction semiconductrice, les bandes d'énergie de deux matériaux différents se combinent, conduisant à des interactions. Les deux structures de bandes des deux matériaux adjacents sont positionnées de manière discontinue l'une par rapport à l'autre.

Le décalage de bande est dû à la différence de largeur des bandes interdites du puits InGaNASb et du substrat InP et est réparti entre deux discontinuités de bandes.

Le décalage des bandes a été calculé à l'aide de la méthode de Van De Walle et obtenu à l'aide des équations suivantes [24] :

$$E_c(\text{InGaNASb}) = E_v(\text{InGaNASb}) + E_g(\text{InGaNASb}) \quad (2.7)$$

$$E_v(\text{InGaNASb}) = E_{v,\text{moy}}(\text{InGaNASb}) + \frac{\Delta_0(\text{InGaNASb})}{3} \quad (2.8)$$

Avec :  $E_c$  et  $E_v$  sont, respectivement, l'énergie de la bande de conduction et l'énergie de la bande de valence du puits InGaNASb.

$E_{v,\text{moy}}$ : Energie moyenne de la bande de valence.

$\Delta_0$ : Energie du décalage spin-orbite.

Les décalages de bandes seront donc donnés par les équations (2.9) et (2.10) :

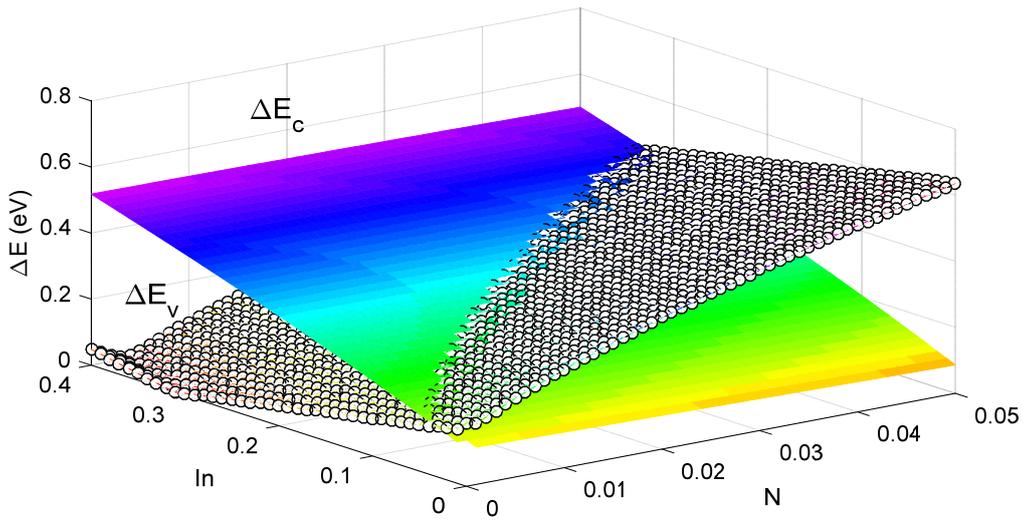
$$\Delta E_c = E_c(\text{InP}) - E_c(\text{InGaNASb}) \quad (2.9)$$

$$\Delta E_v = E_v(\text{InGaNASb}) - E_v(\text{InP}) \quad (2.10)$$

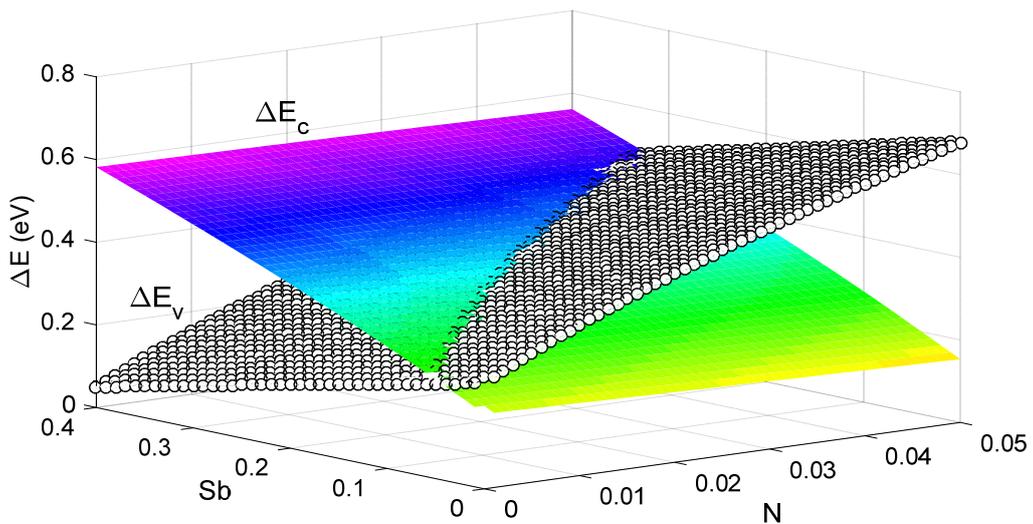
Les figures (2.15) et (2.16) nous montrent l'évolution des décalages de bande  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  dans la structure InGaNASb/InP en fonction des concentrations en indium, azote et antimoine.

Nous pouvons voir sur la figure (2.15) que  $\Delta E_c$  augmente rapidement lors de l'incorporation d'atomes In et de Sb, alors qu'il diminue lors de l'incorporation d'azote dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}/\text{InP}$ .

Nous pouvons voir sur la figure (2.16) que  $\Delta E_v$  diminue rapidement lors de l'incorporation d'atomes In et de Sb, alors qu'il augmente lors de l'incorporation d'azote dans la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$ .



**Figure 2.15.** Variation des décalages de bande  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  en fonction des concentrations N et In dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{0.75-y}\text{Sb}_{0.25}/\text{InP}$ .



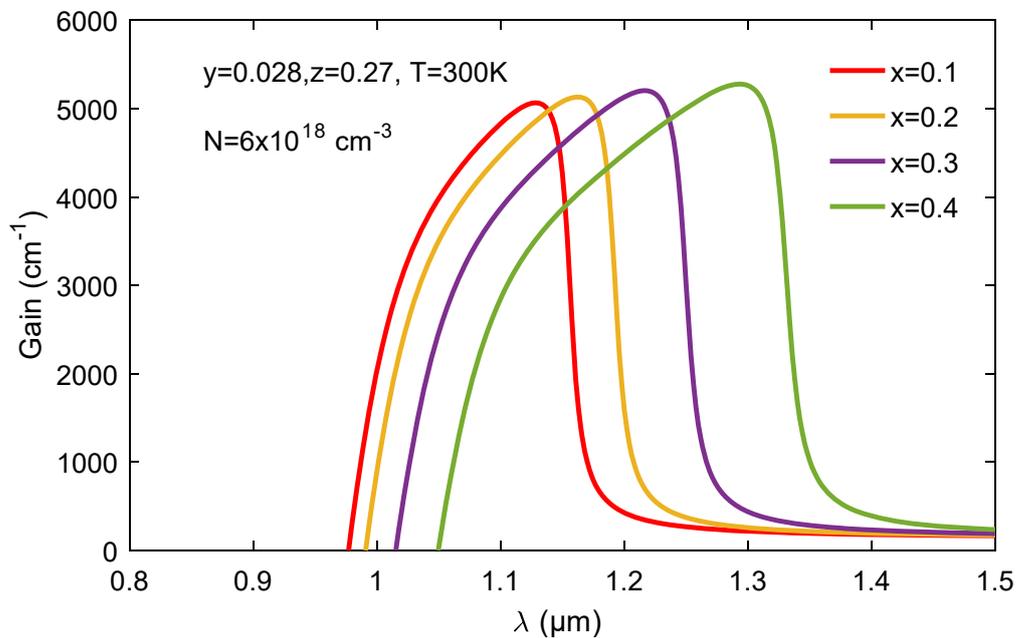
**Figure 2.16.** Variation des décalages de bande  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  en fonction des concentrations N et Sb dans la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$ .

### 2.2.6. Gain optique

L'amplification optique se base essentiellement sur le gain qui est le facteur le plus important pour la réalisation d'un laser à semi-conducteur. Ce gain optique est dû

à une émission stimulée associée à une émission lumineuse créée par la recombinaison d'électrons et de trous.

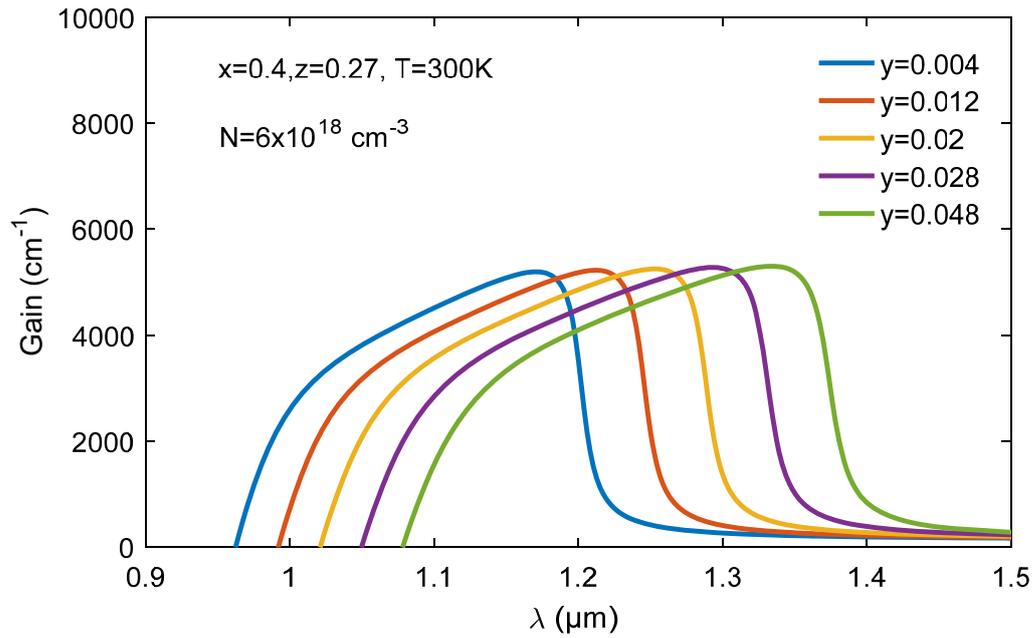
La figure (2.17) illustre la variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde d'émission  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) pour plusieurs concentrations d'In dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.702}\text{Sb}_{0.27}/\text{InP}$ . D'après la figure (2.17) on remarque un élargissement, une augmentation du gain maximum et un décalage du gain optique vers les grandes longueurs d'ondes. Une valeur maximale du gain optique de  $5275 \text{ cm}^{-1}$  est obtenue pour la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.702}\text{Sb}_{0.27}/\text{InP}$  avec une longueur d'onde d'émission correspondante de  $1.3 \mu\text{m}$ .



**Figure 2.17.** Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) pour différentes concentrations d'In et  $L_p=80\text{\AA}$ .

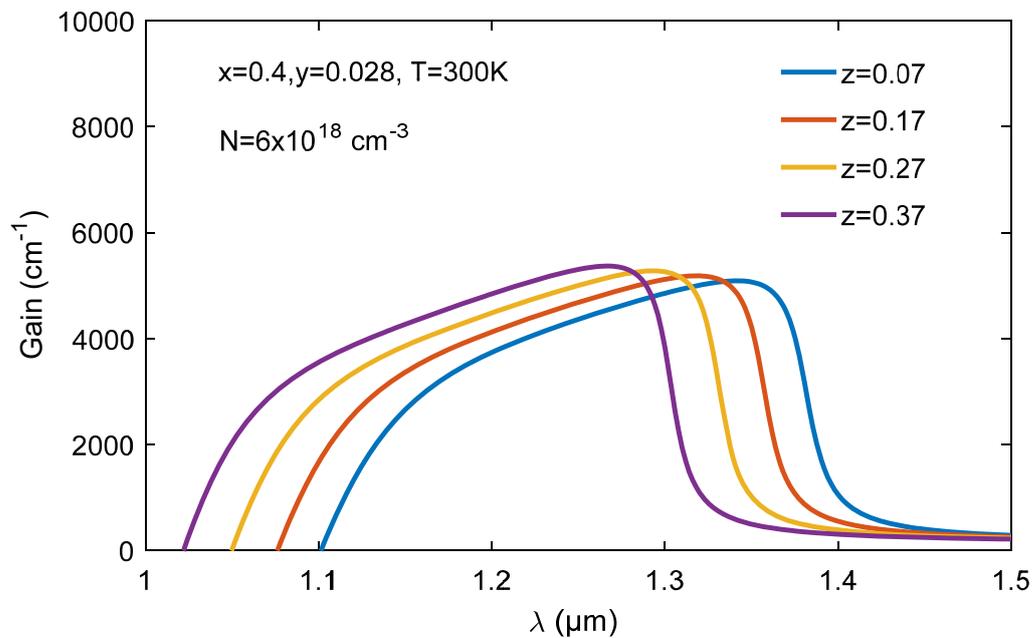
La figure (2.18) illustre la variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde d'émission  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) pour plusieurs concentrations d'azote, dans la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_y\text{As}_{0.73-y}\text{Sb}_{0.27}/\text{InP}$ .

On constate de la figure (2.18) qu'un élargissement avec un décalage du gain optique vers les grandes longueurs d'ondes sont obtenus en augmentant la concentration de l'Azote (N).



**Figure 2.18.** Variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) pour différentes concentrations de N et  $L_p=80\text{\AA}$ .

La figure (2.19) illustre la variation du gain optique en fonction de la longueur d'onde d'émission  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) pour plusieurs concentrations d'antimoine, dans la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.972-z}\text{Sb}_z/\text{InP}$ . Un élargissement avec un décalage du gain optique vers les petites longueurs d'ondes sont obtenus en augmentant la concentration de Sb.



**Figure 2.19.** Variation de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) en fonction des différentes concentrations de Sb,  $L_p=80\text{\AA}$ .

### 2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet de l'incorporation, de l'indium, de l'antimoine et une faible concentration en azote dans la structure à puits quantique InGaNaNAsSb/InP.

Dans la première partie de ce chapitre, on a vérifié les effets de ces insertions sur les propriétés structurales tels que le paramètre de maille, l'énergie de la bande interdite (gap), la masse effective, ...etc. Pour cela nous avons fait appel au modèle BAC qui explique bien la réduction de la bande interdite.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons vérifié l'effet de cette incorporation sur le gain optique ainsi que la longueur d'onde d'émission correspondante. La structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.702}\text{Sb}_{0.27}/\text{InP}$  pour une largeur de puits de  $80\text{\AA}$  est proposée comme une structure adaptée à l'utilisation dans la transmission par fibres optique émettant à une longueur d'onde de  $1.3\mu\text{m}$ .

## Conclusion générale

Les semiconducteurs III-V sont omniprésents et où le besoin en rapidité, l'efficacité et la faible consommation avec des coûts réduits, accélère le rythme de la recherche et le développement des matériaux et des dispositifs optoélectroniques.

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés optoélectroniques de l'alliage semiconducteur InGaNASb afin de pouvoir obtenir des structures à puits quantique InGaNASb/InP émettant à des longueurs d'ondes 1.3  $\mu\text{m}$  ou 1.55  $\mu\text{m}$ , ce qui montre le potentiel d'applications de ce type de structures dans une technologie des télécommunications par fibres optiques.

L'incorporation de l'azote en petites quantités et de l'antimoine dans l'alliage lui a permis d'avoir des propriétés très particulières et attrayantes, la plus importante étant la diminution de l'énergie de la bande interdite due au splitting de la bande de conduction ainsi que la bande de valence. Le modèle d'anticroisement de bandes nous a permis de décrire ces propriétés. Une autre propriété très importante, est que l'incorporation de l'azote, de l'indium et de l'antimoine, permet un meilleur confinement des électrons et des trous dans le puits, ce qui diminue sensiblement le courant de seuil, diminuant ainsi la consommation en énergie des composants et augmentant leur durée de vie.

L'étude ne sera pas satisfaisante sans avoir vérifié l'effet de l'incorporation de ces atomes sur le gain optique dans ce type de structure. L'addition de l'indium et de l'azote cause une augmentation du gain maximum et un décalage du gain optique vers les grandes longueurs d'ondes. Tandis que l'introduction de l'azote mène à un décalage du gain optique vers les petites longueurs d'ondes ainsi qu'une diminution du gain maximum.

Cette étude nous a permis une meilleure compréhension des propriétés de cet alliage, ce qui nous a aidé à atteindre notre objectif et proposer la structure  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.702}\text{Sb}_{0.27}/\text{InP}$  pour un puits de largeur 80Å comme étant une structure adaptée à l'émission de longueur d'onde 1.3  $\mu\text{m}$  exploitable par les fibres optiques pour les télécommunications et prouvant un gain maximal de 5275  $\text{cm}^{-1}$ .

## Liste des références

- [1] K. Y. Cheng, « III-V Compound Semiconductors and Devices (An Introduction to Fundamentals) », Springer, 537p, 2020.
- [2] M. Henni, « Dilute nitride semiconductors », Elsevier, Amsterdam, 2005.
- [3] Editors : P. Chen, Z. Chen, « Recent Advances in III-Nitrides Semiconductors », open access journal Crystals (ISSN 2073-4352), 238p, 2023.
- [4] W. Shan, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager, E. E. Haller, J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. M. Olson, S. R. Kurtz, C. Nauka, « Effect of nitrogen on the electronic band structure of group III-N-V alloys », Physical Review B, 62(7), 4211–4214, 2000.
- [5] J. F. Geisz, D. J. Friedman, « III-N-V semiconductors for solar photovoltaic applications », Semiconductor Science and Technology, 17 (8), 769-777, 2002.
- [6] N. Baghdadli, « Etude des propriétés optoélectroniques des semiconducteurs III-V à base de galium », université de Tlemcen, 2010.
- [7] <https://laserreahistoires.wordpress.com/2019/02/15/mendeleiev-et-son-tableau>
- [8] S. Laval, « Physique des semi-conducteurs », Ecole d'été d'optoélectronique, Collection SFO - Vol. 1, pp 35-68, 1990.
- [9] R. Yanka, S. Chung, K. Nunna, R. Pelzel, H. Williams, « Optoelectronic Detectors Having a Dilute Nitride Layer on a Substrate With a Lattice Parameter Nearly Matching GaAs », pp 1-35, 2016.
- [10] L. Borkovska, N. Korsunskaya, V. Kladko, T. Kryshtab, V. Kushnirenko, M. Slobodyan, O. Yefanov, Y. Venger, S. Johnson, Y. Sadofyev, Y. H. Zhang. « Investigation of defect structure of InGaAsSb/GaAs quantum wells », Mater. Sci. Eng. C. 27 (5-8), 1038–1042, 2007.
- [11] Y. Sin et al, « Carrier Dynamics in MOVPE-Grown Bulk InGaAsNSb Materials and Epitaxial Lift-Off GaAs Double Heterostructures for Multi-junction Solar Cells », Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1635, pp. 1-8, 2014.
- [12] A. Aissat, S. Nacer, M. Seghilani, J.P. Vilcot, « Effect of on band alignment of compressively strained  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y-z}\text{Sb}_z/\text{GaAs}$  quantum well structures », Physica E, Vol. 43 (1), pp. 40–44, 2010.
- [13] <https://etreenlien.ch/lithosphere/systemes-cristallins>
- [14] I. Mekhelfi, I. Laggoug, « Etude et simulation d'une structure à puits quantique GaNAsBi/InP pour des systèmes des communications optiques de 1.3 et 1.55  $\mu\text{m}$  », Thèse de Master, Université de Blida, Algérie, 2020.

- [15] J.C. Phillips, « Bonds and bands in semiconductors », Academic press, San Diego, 1973.
- [16] O. I. Elmi, « Nouvelles structures de cellules solaires à base de silicium : texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion », Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France, 2017.
- [17] M. Hugues, « Croissance par épitaxie », Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, France, 2007.
- [18] R. Cipro, « Epitaxie en phase vapeur aux organométalliques et caractérisation de semi-conducteur III-As sur substrat silicium dans une plateforme microélectronique », Université Grenoble Alpes, France, 2006.
- [19] [fr.wikiversity.org/wiki/Introduction à la science des matériaux/Défauts dans les cristaux](http://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_à_la_sciences_des_matériaux/Défauts_dans_les_cristaux).
- [20] F. Saidi, « Effet des contraintes d'épitaxie sur des couches de (Ga,Mn)As/(Ga,In)As », Thèse de Master, Université de Mostaganem, Algérie, 2016.
- [21] M. Asada, Y. Miyamoto, and Y. Suematsu, "Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 22, no. 9, pp. 1915–1921, Sep. 1986.
- [22] G. Fournet, « Etude de la loi de Végard », Le journal de la physique et le radium, Tome 14, pp. 374-380, 1953.
- [23] S. Adachi, « Ternary and quaternary compounds », S. Kasap, P. Capper (Eds.), Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, 725-741, 2017.
- [24] CG Van de Walle, « Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory », Phy. Rev.B, V. 39, 1871-1883, 1989.