

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière ELECTRONIQUE
OPTION : MICROELECTRONIQUE

Code : Micro3

présenté par

ZEMRI SABAH

Amélioration de la performance d'un capteur optique à base d'InGaAsP/InGaP

Proposé Par

M^f . Aissat Abdelkader

M^{me} . Chenini Lynda

2024-2025

Remerciements

Je suis reconnaissante envers le Dieu tout-puissant pour m'avoir offert la santé et le désir de commencer et de compléter ce mémoire.

Je souhaite adresser mes remerciements authentiques à mon promoteur, M^r Aïssat Abdelkader, pour le thème soumis en vue de l'élaboration de ma thèse et pour ses précieux conseils. C'est pour moi un immense privilège de l'avoir en tant que directeur pour mon mémoire de fin de cursus.

Mes remerciements particuliers à ma promotrice, M^{me} CHENINI LYNDA. Merci pour votre confiance et votre patience. Le soutien et les conseils qu'elle m'a apportés m'ont permis de réaliser ce mémoire dans des conditions favorables à l'approfondissement de ma réflexion. Travailler avec elle a été une expérience agréable.

Je remercie infiniment les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'ensemble de mes enseignants, en mettant particulièrement en avant M^r. Saïd Nacer, M^r. Ammar Bounemri, et M^r. Mohamed Taïbi. Ces individus figurent parmi les enseignants les plus remarquables auprès desquels j'ai acquis des savoirs.

Dédicaces

Je dédie ce travail à

À ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses innombrables sacrifices.

À mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordée.

À tous mes frères, et en particulier à Omar, pour son soutien inconditionnel.

À ma chère sœur, pour sa présence précieuse

À toute ma famille, pour leur amour et leur bienveillance.

À mes amis, (surtout : Yakine, Ikram, Sarah et Khadidja), merci pour vos mots d'encouragement, votre écoute, vos sourires et votre bienveillance. Je vous souhaite à tous une vie pleine de succès et de bonheur.

À ma chère Hermione, pour son soutien fidèle

Ce travail est l'aboutissement de nombreux efforts et d'une belle collaboration.

Je souhaite qu'il honore la confiance que vous m'avez témoignée.

Sabah

ملخص

يهدف هذا العمل إلى إجراء تحليل محاكاة وتحسين أداء مستشعر بئر كمي مصنوع من InGaAsP/InGaP. في البداية، استكشفنا الخصائص البصرية الإلكترونية الأساسية التي تُحدد هذا التركيب. بعد ذلك، درسنا تأثير الإنديوم (الموجود في البئر والحاجز) والزرنيخ على معامل الكسب البصري لهذا التكوين. لزيادة معامل الكسب، من الضروري زيادة جميع التركيزات. يُمارس الزرنيخ تأثيرًا أكبر بكثير على ذروة الكسب. بالإضافة إلى ذلك، ينزاح طول الانبعاث إلى أطوال موجية أطول. يمكن ضبط طول الانبعاث في طيف الأشعة تحت الحمراء حسب التطبيق المقصود.

الكلمات الدالة:

In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}/InGaP ، الكترولوضوي ، الكسب البصري

Résumé

Le but de ce travail est de mener une analyse de simulation ainsi que d'améliorer les performances d'un capteur à puits quantique fabriqué à partir d'InGaAsP/InGaP. Dans un premier temps, nous avons exploré les propriétés optoélectroniques fondamentales qui définissent cette structure. Par la suite, nous avons examiné l'impact de l'indium (présent dans le puits et la barrière) et de l'arsenic sur le coefficient de gain optique de cette configuration. Pour accroître le coefficient de gain, il est nécessaire d'augmenter toutes les concentrations. L'arsenic exerce une influence bien plus marquée sur le pic de gain. De plus, la longueur d'émission se déplace vers des longueurs d'onde plus élevées. Ce dernier paramètre peut être ajusté dans le spectre infrarouge selon l'application visée.

Mots clés :

In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}/InGaP, optoélectronique, gain optique, interbandes.

Summary

The objective of this research is to perform a simulation analysis and enhance the performance of a quantum well sensor that utilizes InGaAsP/InGaP. Initially, we focused on examining the key optoelectronic features that define this structure. Next, we investigated how the integration of indium (in the well and barrier) and arsenic influences the optical gain coefficient of this structure. To boost the gain coefficient, it is necessary to raise the levels of all concentrations. Arsenic plays a significantly more critical role in determining the peak gain. The emission wavelength tends to shift towards longer values. This wavelength can be tailored within the infrared spectrum based on the specific application required.

Key words:

In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}/InGaP, optoelectronic, optical gain, interbands.

Liste des abréviations

- a : Paramètre de maille
 a_c : Potentiel de déformation dans la bande de conduction
 a_e : Paramètre de maille de la couche active
As : Arsenic
 a_s : Paramètre de maille du substrat
 a_v : Potentiel de déformation dans la bande de valence
 b : Potentiel de déformation tétragonale
BC : Bande de conduction
BV : Bande de valence
 C_{ij} : Coefficient d'élasticité
 E_c : L'énergie du bas de la bande de conduction
 E_g : Energie de gap
 E_n : Niveau d'énergie
 E_{tr} : Energie de transition
 E_v : L'énergie du haut de la bande de valence
Ga : Gallium
 h : Constante de Planck.
 h_c : Epaisseur critique
hh : Trous lourds
In : Indium
lh : Trous légers
 L_p : Largeur du puits
 m_e^* : Masse effective des électrons
P : Phosphore
 ε : Contrainte
 $\varepsilon_{//}$: Contrainte biaxiale
 ε_{\perp} : Contrainte uniaxiale
 Δ_{SO} : Energie spin orbite
 ΔE_c : Décalage de la bande de conduction
 ΔE_v : Décalage de la bande de valence
 $\psi(x)$: Fonction d'onde.

λ : Longueur d'onde

α : Coefficient d'absorption

Liste des figures

Figure 1.1. Les sept systèmes cristallins et les quatorze réseaux de Bravais	5
Figure 1.2. a) Structure zinc blende, b) sa représentation par projection	6
Figure 1.3. Structure Wurtzite	6
Figure 1.4. Zone de Brillouin	7
Figure 1.5. Exemples de directions et plans dans les structures cubiques et hexagonales	8
Figure 1.6. Diagramme de classification d'énergie des matériaux	9
Figure 1.7. Gap direct et Gap indirect	10
Figure 1.8. Tableau périodique	11
Figure 1.9. Schéma de principe d'un bâti de MBE	14
Figure 1.10. Schéma de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	15
Figure 1.11. Les différents types de contraintes	16
Figure 1.12. Effet de la contrainte sur l'énergie de la bande interdite	17
Figure 1.13. Schéma d'un puits quantique.....	18
Figure 1.14. Décalage des bandes dans une structure à puits quantique.....	19
Figure 1.15. Niveaux énergétiques dans une structure à puits quantique.....	20
Figure 1.16. Emission spontanée et stimulée.....	23
Figure 2.1. Variation du paramètre de maille de l'alliage $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ en fonction de la concentration d'In.....	25
Figure 2.2. Variation du paramètre de maille de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ en fonction de la concentration d'In pour plusieurs concentration d'As	25
Figure 2.3.a. Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In pour l'alliage InGaP	26
Figure 2.3.b. Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In et $y=0.15$ pour l'alliage InGaAsP.....	27
Figure 2.3.c Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In et $y=0.45$ pour l'alliage InGaAsP	27
Figure 2.4. Variation de l'énergie spin-orbite de l'alliage $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$	28
Figure 2.5. Variation de l'énergie spin-orbite de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ pour plusieurs concentration d'As	29
Figure 2.6.a Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.02$).....	30
Figure 2.6.b. Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.25$).....	30

Figure 2.6. c. Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.60$).....	31
Figure 2.7. Evolution de l'énergie de E_g de InGaP en fonction de la concentration d'In	32
Figure 2.8. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de la concentration de l'In et d'As	32
Figure 2.9. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de T et la concentration d'In.....	33
Figure 2.10. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de T et la concentration d'As.....	33
Figure 2.11. Evolution de E_g de InGaP en fonction de T et la concentration d'In.....	34
Figure 2.12. Evolution de ΔE_c en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.25$).....	35
Figure 2.13. Evolution de ΔE_v en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.25$).....	35
Figure 2.14. Evolution de ΔE_c en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.35$).....	36
Figure 2.15. Evolution de ΔE_v en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.35$).....	36
Figure 2.16. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.25$ et $z=0.2$).....	37
Figure 2.17. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.4$ et $z=0.2$).....	38
Figure 2.18. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.4$ et $z=0.4$).....	38

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Valeurs des paramètres de maille	24
--	----

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Les semiconducteurs	
1.1. Introduction	3
1.2. Importance de la résistivité	3
1.3. Les catégories des matériaux.....	3
1.4. Systèmes cristallins	4
1.5. Structure zinc blende	5
1.6. Structure Wurtzite.....	6
1.7. Zone de Brillouin et points de hautes symétries	7
1.8. La structure de bande.....	8
1.9. Gaps direct et indirect	9
1.10. Tableau périodique.....	10
1.11. Les alliages des semi-conducteurs III-V	12
1.12. Loi de Végard	13
1.13. L'épitaxie.....	13
1.14. La contrainte.....	16
1.15. Effet de la contrainte sur la structure de bandes	17
1.16. Effet de la température sur l'énergie de gap.....	18
1.17. Puits quantiques.....	18
1.18. Décalage de bandes	18
1.19. Taux de confinement	20
1.20. Energie de quantification.....	20
1.21. Masse effective	22
1.22. Le gain optique.....	22
Conclusion.....	23
Chapitre 2 : Résultats et discussions	
2.1. Introduction	24
2.2. Paramètre de maille	24
2.3. Les masses effectives... ..	26
2.4. Energie de spin-orbite	27

2.5. La contrainte.....	30
2.6. La bande d'énergie	31
2.7. La bande d'énergie en fonction de la température.....	33
2.8. Décalage de bandes ΔE_c et ΔE_v	34
2.9. Le gain optique	37
Conclusion.....	38
Conclusion générale.....	40
Références	

Introduction générale

L'optoélectronique se retrouve dans de nombreux secteurs et prend une place de plus en plus significative dans les systèmes que nous côtoyons ou utilisons chaque jour. Évidemment, cela ne se limite pas aux communications par fibre optique, mais englobe aussi les domaines tels que la santé, la défense, la microfabrication, l'automobile, l'aviation, la robotique, et le multimédia. Chacun de nous peut aisément identifier où se situent les éléments d'optoélectronique dans ces contextes. Une chose est certaine c'est que dans tous ces domaines, les progrès se poursuivent à un rythme extrêmement rapide. Le développement remarquable de l'électronique et de l'optoélectronique ne serait pas possible sans une excellente connaissance des matériaux d'où une véritable maîtrise de la technologie.

Les semiconducteurs de type III-V possédant des puits quantiques constituent des structures artificielles où un matériau ayant une bande interdite étroite est située entre deux couches présentant une bande interdite plus large. Ces structures tirent parti des phénomènes quantiques pour réguler les caractéristiques électroniques et optiques du matériau, rendant ainsi les puits quantiques cruciaux pour de nombreux dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Le gain optique se définit comme le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée d'un dispositif optique, qui est le plus souvent un laser ou un amplificateur. Ce terme reflète l'aptitude d'un système à intensifier les photons via un processus d'émission stimulée.

Un gain optique important peut améliorer la sensibilité d'un système de détection en rendant possible la perception de signaux plus faibles qui, sans cela, seraient noyés dans le bruit ambiant. Effectivement, le gain augmente l'intensité du signal avant qu'il ne soit détecté, simplifiant ainsi cette tâche.

Il sera donc extrêmement captivant d'explorer la possibilité de créer des matériaux sur divers substrats, autres que le GaAs et le InP, tout en examinant leurs caractéristiques et en découvrant les bénéfices qu'ils peuvent offrir.

Le présent travail s'inscrit dans ce cadre et consiste à étudier et améliorer les performances d'un capteur optique à base d'InGaAsP/InGaP.

Ce travail comporte deux parties distinctes :

- ✓ La première partie présente des connaissances générales sur les matériaux semiconducteurs tout en s'intéressant aux matériaux III-V.

- ✓ Dans le second chapitre, nous allons explorer la configuration InGaAsP/InGaP en détaillant les attributs optoélectroniques significatifs. Il sera alors judicieux d'étudier comment les changements dans les proportions d'indium et d'arsenic influencent les spécificités de cette configuration, surtout en rapport avec le coefficient de gain optique.

On termine notre travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1

Les Semiconducteurs

Chapitre 1 : Les semiconducteurs

1.1. Introduction

Les matériaux semiconducteurs se caractérisent typiquement par une structure cristalline bien ordonnée. À des températures plus basses, ils fonctionnent comme des isolants, mais dès qu'ils sont chauffés ou exposés à une forme d'énergie (telle que la lumière), leur capacité à conduire l'électricité augmente. Parmi les matériaux les plus réputés et célèbres, on trouve le silicium (Si) et le germanium (Ge) qui figurent dans la colonne IV du tableau périodique [1].

Bien que ces deux semiconducteurs soient constitués d'atomes identiques, on peut trouver d'autres comme l'arséniure de gallium GaAs (III-V) qui se forment à partir d'atomes d'éléments distincts : Ga (III) et As (V). Cette structure offre la possibilité de bénéficier de caractéristiques électriques et optiques qui ne sont pas présentes dans les semiconducteurs purs [1].

1.2. Importance de la résistivité

La résistivité (ρ) constitue une caractéristique clé des matériaux, car elle influence leur aptitude à transporter l'électricité, vu que la conductivité (σ) est l'inverse de la résistivité. Cette caractéristique trouve son application dans divers secteurs, y compris l'électronique, la fabrication de câbles, les résistances, ainsi que dans les matériaux utilisés pour l'isolation thermique et électrique.

1.3. Les catégories des matériaux

Les matériaux peuvent être classés selon leur résistivité électrique en trois catégories principales : conducteurs, isolants et semiconducteurs.

- **Conducteurs** : Ces matériaux facilitent le passage du courant électrique. Leur faible résistivité indique qu'ils entravent peu le mouvement des électrons. Des métaux tels que l'argent, le cuivre, l'or, l'aluminium et le fer sont d'excellents exemples de conducteurs. La valeur de la résistivité dans ces matériaux est : $10^{-8} \Omega.m$ à $10^{-6} \Omega.m$.

- **Isolants** : Ces matériaux résistent fortement au passage du courant électrique. Ils affichent une grande résistivité, ce qui implique qu'ils entravent considérablement le mouvement des électrons. Des exemples d'isolants incluent le verre, le caoutchouc, le plastique et le bois. Ces matériaux possèdent une résistivité de $10^9 \Omega.m$.
- **Semiconducteurs** : Ces matériaux possèdent une résistivité modérée, positionnée entre celle des conducteurs et des isolants. Leur capacité à conduire l'électricité peut être ajustée en changeant les paramètres externes, ce qui les rend parfaits pour l'électronique. La valeur de la résistivité dans ces matériaux est : $10^{-5} \Omega.m$ à $10^9 \Omega.m$. Le silicium et le germanium sont des exemples de semiconducteurs.

Tableau 1.1. Exemples de matériaux, leurs propriétés de résistivité et de conductivité à 20°C.

Matériaux	Type de matériaux	Résistivité ρ ($\Omega.m$)	Conductivité σ (S/m)
Cuivre	Conducteur	1.68×10^{-8}	5.96×10^7
Argent	Conducteur	1.59×10^{-8}	6.30×10^7
Silicium	Semiconducteur	640	1.56×10^{-3}
Germanium	Semiconducteur	0.46	2.174
Verre	Isolant	Très élevé $>10^{12}$	Très faible, $<10^{-12}$
Plastique	Isolant	Très élevé $>10^{12}$	Très faible, $<10^{-12}$

1.4. Systèmes cristallins

Un système cristallin représente une méthode de classification des cristaux fondée sur leurs propriétés de symétrie, où la hiérarchie accordée à certains critères au lieu d'autres conduit à la formation de divers systèmes.

La symétrie de la maille primitive permet de regrouper les cristaux en sept systèmes cristallins. Ces systèmes sont : triclinique, monoclinique, orthorhombique, tétragonal (ou quadratique), rhomboédrique (ou trigonal), hexagonal et cubique.

Les 14 réseaux de Bravais, quant à eux, sont des arrangements tridimensionnels possibles des atomes dans ces structures (voir figure 1.1).

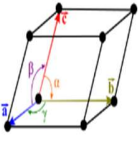
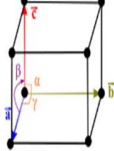
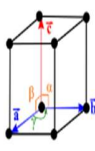
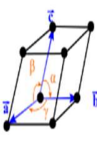
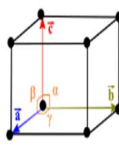
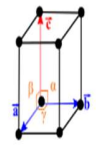
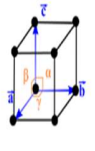
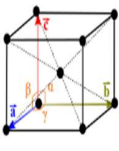
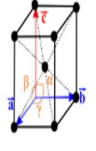
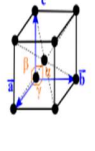
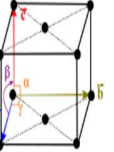
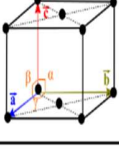
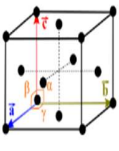
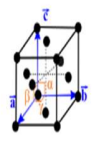
	Triclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Monoclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma \neq 90^\circ$	Hexagonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma = 120^\circ$	Rhomboédrique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Orthorhombique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Quadratique $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cubique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Primitif P							
Maille centrée I							
Deux faces centrées C							
Faces centrées F							

Figure 1.1. Les sept systèmes cristallins et les quatorze réseaux de Bravais [2].

1.5. Structure zinc blende

La disposition cristalline de la blende de zinc se caractérise par une structure cubique à faces centrées, intégrant deux types d'atomes dans la cellule de base. On peut l'envisager comme deux réseaux CFC interpénétrés, décalés par rapport à l'autre. Le ZnS est un exemple classique de blende de zinc (figure 1.2). Les atomes sont disposés selon un réseau cubique (empilement cubique serré), avec quatre atomes à chaque côté du cube et un atome au centre de chaque face.

La symétrie centrale de la structure zinc-blende est responsable de l'absence de polarisation spontanée, ce qui la distingue d'autres matériaux comme la wurtzite. L'absence de polarisation spontanée dans la zinc-blende peut engendrer des conséquences pratiques, par exemple concernant l'aptitude de ces matériaux à exhiber des phénomènes électriques tels que l'effet piézoélectrique.

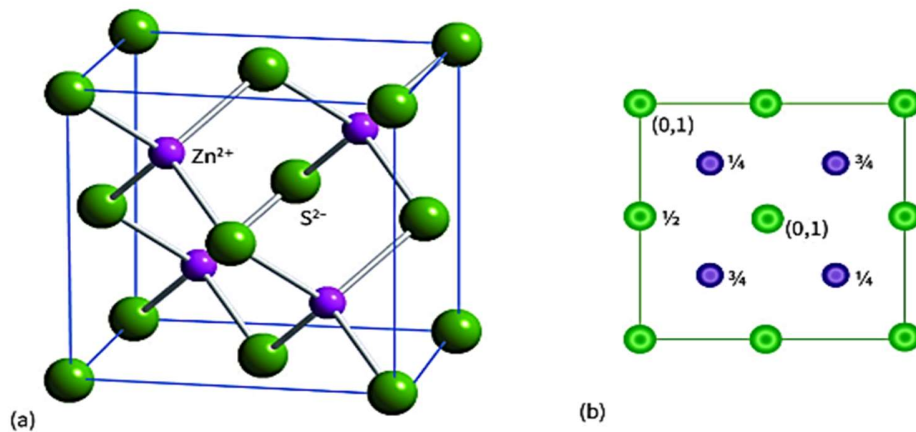


Figure 1.2. a) Structure zinc blende, b) sa représentation par projection [3].

1.6. Structure Wurtzite

Cette structure se distingue par une disposition hexagonale compact des atomes, où les deux types d'atomes (groupe III et groupe V) se trouvent à des emplacements légèrement décalés par rapport à un réseau hexagonal. À la différence de la configuration cubique, la structure Wurtzite est généralement plus stable sur le plan thermodynamique pour ces matériaux.

La structure Wurtzite (figure 1.3), à l'opposé, possède une symétrie hexagonale ainsi qu'une symétrie polaire. Cela entraîne l'existence de plans polaires, où les dipôles électriques ne se neutralisent pas et engendrent une polarisation spontanée.

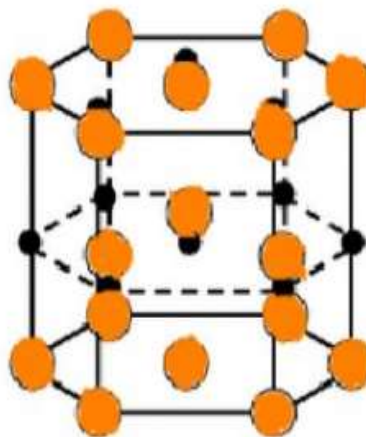


Figure 1.3. Structure Wurtzite [4].

1.7. Zone de Brillouin et points de hautes symétries

La zone de Brillouin désigne la région de l'espace réciproque qui englobe toutes les directions possibles du vecteur d'onde dans un cristal. Les points de hautes symétries sont généralement désignés par des lettres (Γ , X, L, W, K, etc.). Par exemple, Γ indique le centre de la zone de Brillouin, X se situe au centre d'une face d'un octaèdre tronqué (dans le cas du réseau cubique centré sur les faces), L correspond au centre d'une arête d'un cube, etc.

Ces points jouent un rôle crucial dans l'analyse des caractéristiques des cristaux. Ils simplifient l'examen des structures de bandes et des phonons, et sont couramment employés dans les domaines de recherche et d'application en physique des solides.

La figure 1.4 représente des points et des axes de haute symétrie de la zone de Brillouin pour la structure blende de zinc.

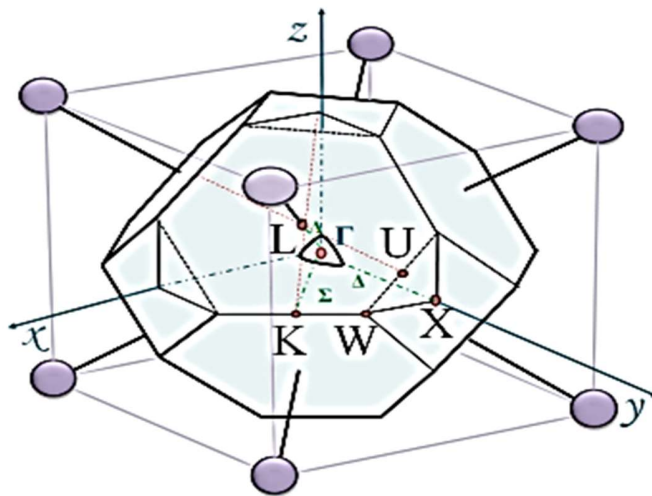


Figure 1.4. Zone de Brillouin [5].

Un cristal représente une structure périodique et, de ce fait, il est possible de reconnaître des paires de plans parallèles à distance constante. Chaque groupe de plans est identifié par ses indices de Miller h, k et l tel qu'on peut voir sur la figure 1.5.

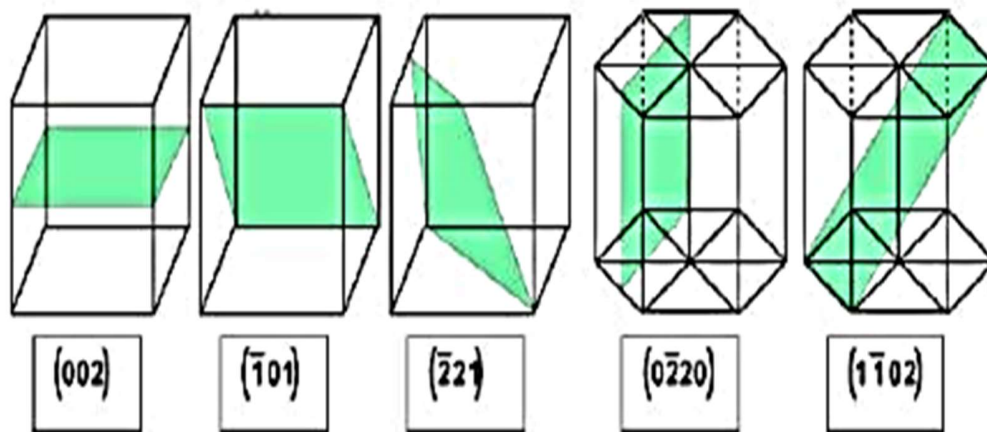


Figure 1.5. Exemples de directions et plans dans les structures cubiques et hexagonales [6].

1.8. La structure de bande

Dans un solide, les niveaux d'énergie de tous les atomes présents forment des bandes d'énergies. Ce sont des ensembles d'états énergétiques dans lesquels les électrons peuvent se trouver. Les deux bandes principales sont la bande de valence (où les électrons sont liés aux atomes) et la bande de conduction (où les électrons sont libres de se déplacer). L'espace situé entre les zones d'énergie où les électrons ne peuvent pas se trouver est désigné par le terme « bande interdite ». La taille de la bande interdite, aussi appelée gap énergétique, influence la façon dont le matériau se comporte (figure 1.6).

Dans un isolant, la bande de valence est entièrement remplie d'électrons à basse température. Alors que la bande de conduction est complètement vide à basse température. Il existe une large bande interdite (gap) entre la bande de valence et la bande de conduction dans un isolant (figure 1.6).

Dans les conducteurs, la bande de conduction est partiellement peuplée, même à basse température. Il n'y a pas de gap significatif entre la bande de valence et la bande de conduction. Les semiconducteurs présentent une bande interdite moins large que les isolants. Même à basse température, certains électrons peuvent franchir le gap, ce qui rend la bande de conduction partiellement peuplée et la bande de valence partiellement vide, [7].

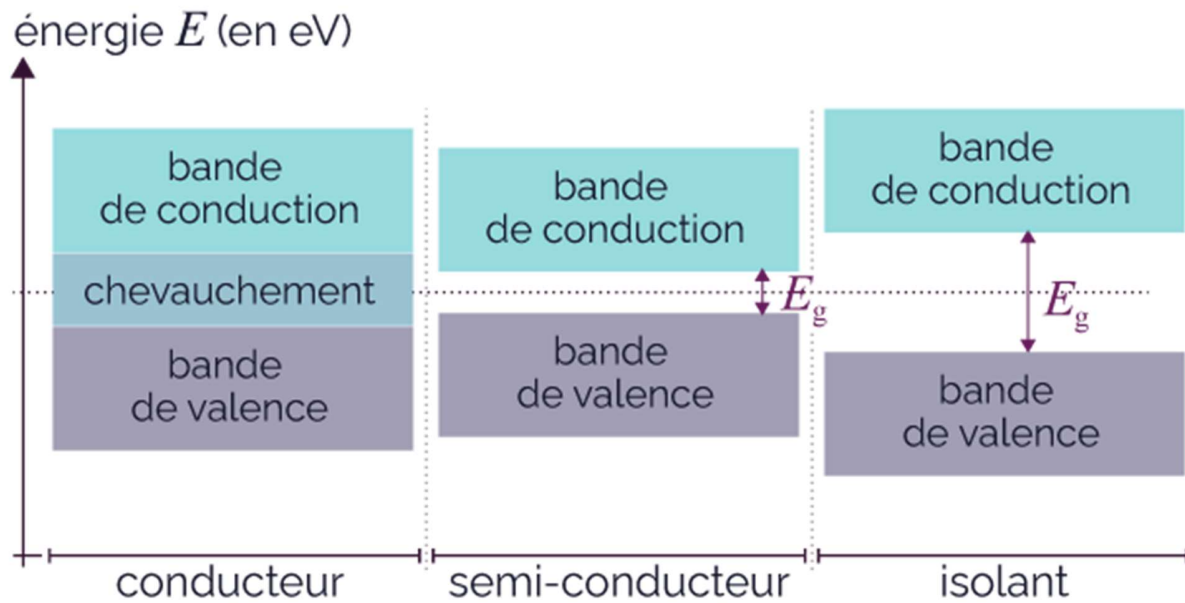


Figure 1.6. Diagramme de classification d'énergie des matériaux.

1.9. Gaps direct et indirect

Dans le domaine de la physique des semiconducteurs, les transitions directes et indirectes désignent la caractéristique du passage énergétique qui se produit entre les bandes de conduction et de valence.

- **Gap direct** : Dans ce type de semiconducteur, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont au même point dans la zone de Brillouin (figure 1.7). La transition électronique entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction est directe ($\Delta\vec{k} = \vec{0}$), ce qui est nécessaire pour les transitions radiatives (émission de photons).
- **Gap indirect** : Dans le cas de semiconducteur à gap indirect, le minimum de la bande de conduction est situé à une distance ($\Delta\vec{k} \neq \vec{0}$) du maximum de la bande de valence dans la zone de Brillouin. La transition électronique entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction est indirecte, ce qui provoque des transitions non radiatives (émission de phonons), voir figure 1.7.

Les notions de gap direct et indirect sont liées à la représentation de la dispersion énergétique d'un semiconducteur: Diagramme E (Energie)- \vec{k} (Vecteur d'onde). Ce diagramme permet de définir spatialement les extrema des bandes de conduction et de valence [8].

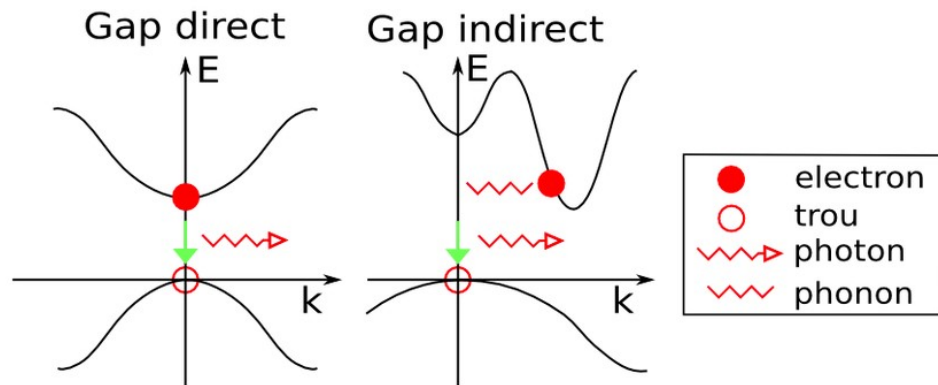


Figure1.7. Gap direct et Gap indirect [8].

1.10. Tableau périodique

Le tableau périodique organise les éléments chimiques en fonction de leur numéro atomique, lequel indique le total de protons présents dans le noyau (figure 1.8). Chaque case du tableau identifie un élément, comprenant son symbole chimique, son numéro atomique, et souvent sa masse atomique.

1.10.1. Les lignes et colonnes du tableau

- Les périodes : Les lignes qui s'étendent horizontalement sont connues sous le nom de périodes. Il y en a sept, qui correspondent aux niveaux d'énergie des atomes.
- Les groupes : Les colonnes qui se dressent verticalement rassemblent les éléments ayant des caractéristiques chimiques analogues. Les groupes sont numérotés de 1 à 18.

1.10.2. Les caractéristiques périodiques des éléments

Le tableau des éléments est élaboré pour mettre en avant les caractéristiques périodiques, c'est-à-dire les traits qui changent de manière prévisible en fonction de la position des éléments.

➤ L'énergie d'ionisation

La quantité d'énergie requise pour extraire un électron d'un atome tend à augmenter de gauche à droite au sein d'une période, tandis qu'elle diminue de haut en bas dans un groupe.

➤ L'électronégativité

Celle-ci évalue la capacité d'un atome à attirer des électrons. Le fluor, qui se trouve à l'extrême supérieure droite du tableau, est l'élément ayant la plus grande électronégativité, alors que les métaux alcalins localisés dans le coin inférieur gauche affichent une électronégativité moins élevée.

➤ Le rayon atomique

En règle générale, le diamètre des atomes diminue de gauche à droite à travers une période, ce qui est dû à l'accroissement de la charge nucléaire, mais il augmente de haut en bas dans un groupe en raison de l'ajout de niveaux électroniques.

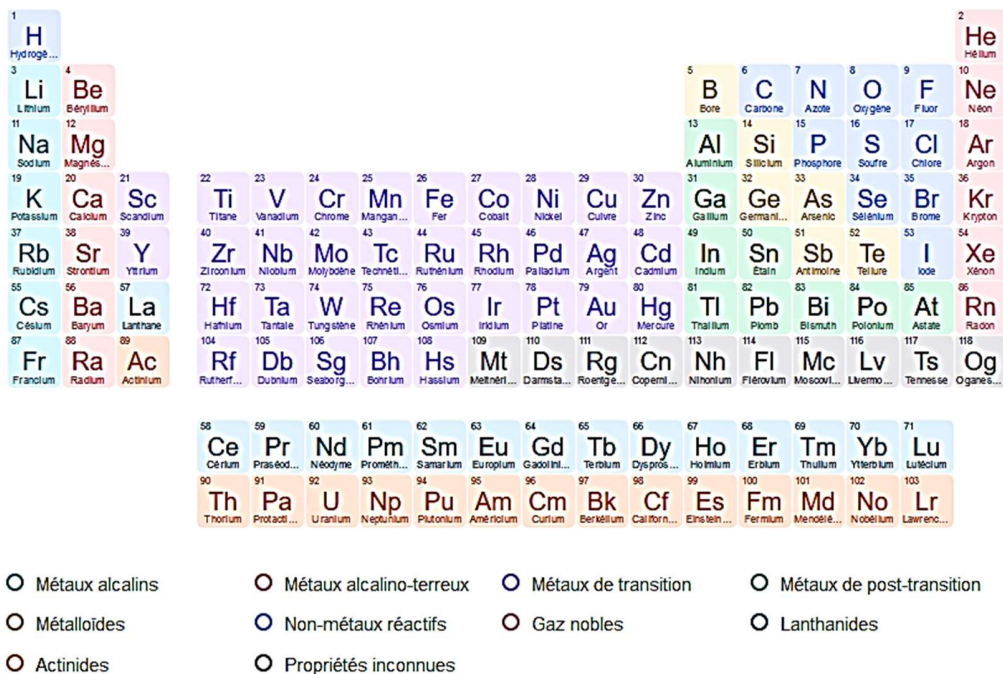


Figure 1.8. Tableau périodique

1.11. Les alliages des semiconducteurs III-V

Les alliages de semiconducteurs III-V sont des matériaux formés par la combinaison d'éléments de la colonne III (B, Al, Ga, In) et de la colonne V (N, P, As, Sb) du tableau périodique. Ils sont largement utilisés dans les composants électroniques et optoélectroniques en raison de leurs propriétés uniques, telles que leur bande interdite directe, qui permet des transitions électroniques efficaces. Les alliages III-V peuvent être binaires, ternaires ou quaternaires.

➤ Matériaux binaires

Les matériaux binaires III-V (ex : GaAs, InAs), sont des matériaux semiconducteurs composés de deux éléments, un du groupe III (bore, aluminium, gallium, indium, etc.) et un du groupe V (azote, phosphore, arsenic, antimoine, etc.) du tableau périodique. Ces composés sont largement utilisés en optoélectronique et en électronique, notamment dans les diodes laser, les LEDs, les cellules photovoltaïques et les transistors.

➤ Alliages ternaires

Les alliages ternaires de type III-V constituent des semiconducteurs élaborés à partir de trois éléments distincts. Deux de ces éléments proviennent du groupe III et un du groupe V du tableau périodique. Par exemple, on peut citer GaInP et AlInAs. Certains cas incluent également des combinaisons comme InAsSb ou InAsP, qui se composent d'un élément du groupe III associé à deux éléments du groupe V. Ces alliages sont utilisés pour leurs propriétés électroniques et optiques spécifiques, notamment dans les diodes laser, les LEDs et les cellules photovoltaïques.

➤ Alliages quaternaires

Les alliages quaternaires III-V, sont formés en combinant deux éléments de la colonne III et deux éléments de la colonne V (ex : InGaAsP, AlGaNSb). Les combinaisons suivantes aussi sont possibles : GaNAsSb, InAlGaSb, etc. Ces matériaux sont souvent utilisés dans l'électronique et la photonique à haute vitesse, grâce à leurs propriétés uniques, comme la possibilité de contrôler la bande interdite.

1.12. Loi de Végard

La loi de Végard est une expression empirique employée dans le domaine de science des matériaux, de la cristallographie et de la métallurgie. Elle stipule que dans un mélange ou une solution solide, à température uniforme, existe une relation linéaire entre les paramètres (notés Q dans l'équation 1.1) de maille de la structure cristalline et les concentrations de ses éléments constituants [9], tel que :

✚ Pour un alliage ternaire de forme $A_xB_{1-x}C$, la loi est définie par l'expression suivante :

$$Q_{A_xB_{1-x}C} = xQ_{AC} + (1 - x)Q_{BC} \quad (1.1)$$

✚ Pour un alliage quaternaire de forme $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$, la loi est définie par l'expression suivante :

$$Q_{A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}} = x(1 - y)Q_{AD} + (1 - x)(1 - y)Q_{BD} + xyQ_{AC} + y(1 - x)Q_{BC} \quad (1.2)$$

1.13. L'épitaxie

L'épitaxie consiste à faire croître un cristal sur un substrat cristallin, en respectant une certaine orientation. Le substrat sert de modèle pour la croissance du nouveau cristal, qui suit son orientation cristalline. L'épitaxie est utilisée dans la fabrication de transistors, de mémoires, de diodes, de LEDs, de capteurs et de nombreux autres dispositifs électroniques.

L'épitaxie est un processus clé dans le développement de la technologie des semi-conducteurs, permettant de créer des matériaux avec des propriétés électriques, optiques et mécaniques spécifiques. Dans certains cas, l'épitaxie peut être limitée par le désaccord de maille entre le substrat et la couche déposée, qui peut entraîner des défauts cristallins.

Il existe différents types d'épitaxie, comme l'épitaxie en phase vapeur (CVD), l'épitaxie par jets moléculaires (MBE), l'épitaxie en phase liquide (LPE) et l'épitaxie en phase gazeuse aux organométalliques (MOVPE).

➤ L'épitaxie par jet moléculaire

L'épitaxie par jet moléculaire (EJM), également connue sous le nom de Molecular Beam Epitaxy, souvent désignée par l'acronyme MBE, constitue une approche pour déposer des films minces de cristaux monocristallins sur un substrat au sein d'un environnement à vide extrême.

Cette technique offre une maîtrise exquise de l'épaisseur ainsi que de la composition des couches réalisés. Ce processus se déroule sous vide ultra-élevé (UHV) pour minimiser les collisions des atomes avec le gaz résiduel.

L'EJM est couramment employée pour le développement de matériaux semiconducteurs, en particulier les architectures semiconductrices de type III-V et II-VI, et elle trouve son application dans les secteurs de l'électronique rapide, de l'optoélectronique et de la production de dispositifs semiconducteurs [10].

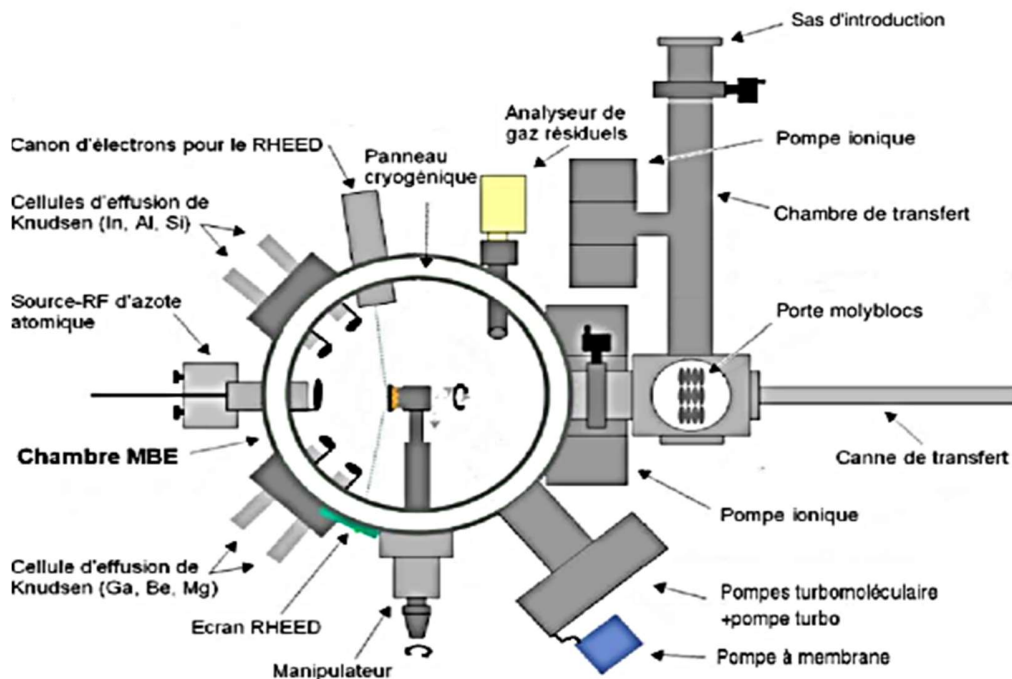


Figure 1.9. Schéma de principe d'un bâti de MBE [10].

➤ L'épitaxie en phase liquide

L'épitaxie par phase liquide représente une méthode de croissance dans un milieu liquide où le refroidissement progressif d'une solution saturée agit comme moteur de la cristallisation. Un monocristal sert de substrat et est immergé dans cette solution liquide.

Pour permettre la précipitation et la cristallisation du matériau sur le substrat, la solution liquide doit atteindre un état de sursaturation. Ce processus d'épitaxie liquide est exploité pour la génération de films minces de semi-conducteurs, ayant des applications dans le domaine de la microélectronique, de l'optique et de la photonique [11].

➤ L'épitaxie en phase vapeur

L'épitaxie en phase vapeur, abrégée EPV ou CVD en anglais, représente une technique pour la croissance de cristaux où un matériau est appliqué sur un support tout en préservant l'alignement cristallin de ce dernier.

Cette méthode implique la réaction de gaz précurseurs, tels que des hydrures, des chlorures ou des composés organométalliques, à l'intérieur d'un réacteur chauffé. Ces gaz subissent une décomposition qui génère des espèces déposées sur le support, produisant ainsi une couche de cristal [12].

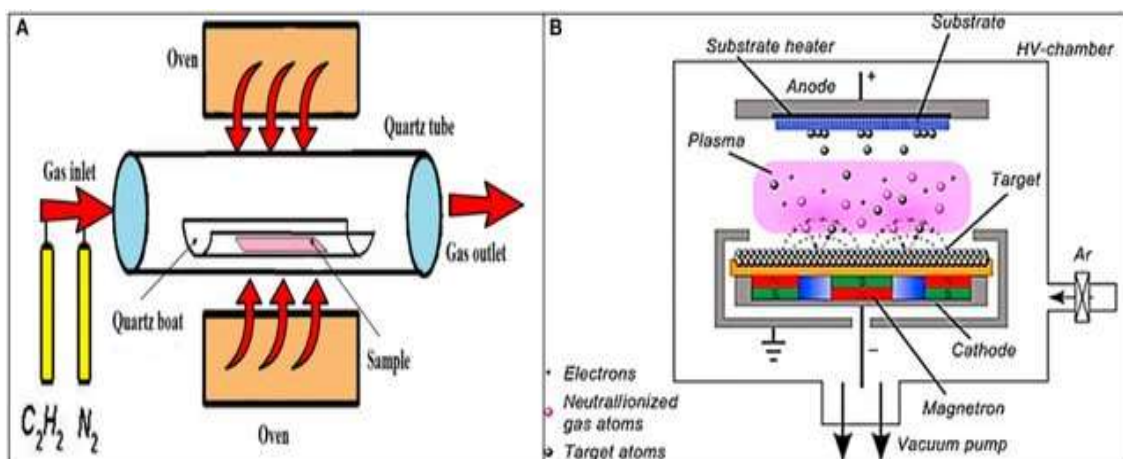


Figure 1.10. Schéma de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [12].

1.14. La contrainte

La contrainte d'épitaxie constitue un phénomène crucial lors de la croissance de couches minces cristallines. Cela se produit quand la couche épitaxiée présente un paramètre de maille qui diffère de celui du substrat, entraînant ainsi des déformations et des contraintes au sein de la couche. Il peut y avoir des contraintes de compression (si la couche a un paramètre de maille plus grand) ou de tension (si elle est plus petite), figure 1.11. Donc :

- Si l'épaisseur de la couche $a_s < a_e$; la couche épitaxiée est soumise à une compression biaxiale afin de s'accorder au maille du substrat d'épitaxie.
- Si l'épaisseur de la couche $a_s > a_e$; la couche épitaxiée est soumise à une tension biaxiale afin de s'accorder au maille du substrat d'épitaxie.

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{a_s - a_e}{a_e} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{zz} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \varepsilon_{xx} \quad (1.4)$$

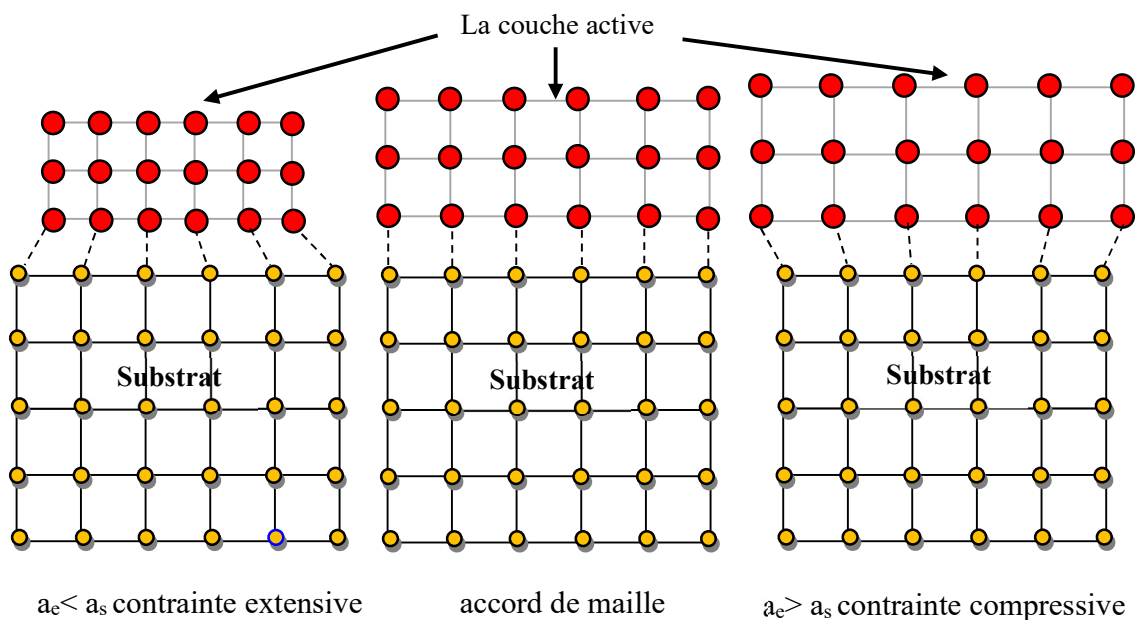


Figure 1.11. Les différents types de contraintes.

1.15. Effet de la contrainte sur la structure de bandes

L'influence de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être divisée en deux aspects :

- La partie hydrostatique, associée à la déformation le long de l'axe de croissance Oz, entraîne un déplacement du centre de gravité de la bande de valence ainsi que de la bande de conduction (figure 1.12).

- La partie de cisaillement, qui est reliée à la déformation sur les axes Ox et Oy, provoque une dégénérescence des niveaux d'énergie des trous lourds et légers (voir figure 1.12). Quand on fait croître une couche solide de paramètre de maille différent de celui du substrat d'épitaxie, une contrainte biaxiale se crée dans le plan de croissance et déforme les couches d'une manière tétraogonale perpendiculairement à ce plan.

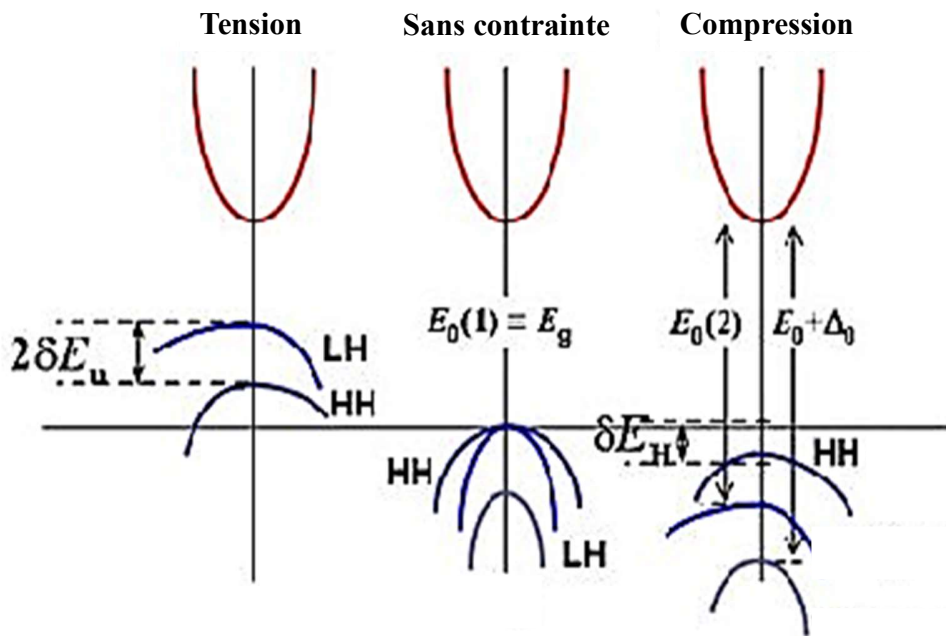


Figure 1. 12. Effet de la contrainte sur l'énergie de la bande interdite [13].

1.16. Effet de la température sur l'énergie de gap

L'impact de la température sur l'énergie de la bande interdite, se manifeste surtout dans les matériaux semiconducteurs. Pour décrire la variation E_g en fonction de T , on utilise souvent la loi de Varshni qui s'écrit [14]:

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{A.T^2}{B+T} \quad (1.5)$$

A et B sont les paramètres empiriques de Varshni, obtenue par interpolation de la loi de Végard.

1.17. Puits quantiques

Dans le domaine des semiconducteurs, un puits quantique peut être créé en superposant plusieurs couches planes constituées de divers matériaux, par exemple, un matériau à faible gap placé entre deux matériaux à gap plus élevé (figure 1.13). Dans cette configuration, les électrons perçoivent un puits de potentiel en forme de carré avec une barrière de hauteur déterminée.

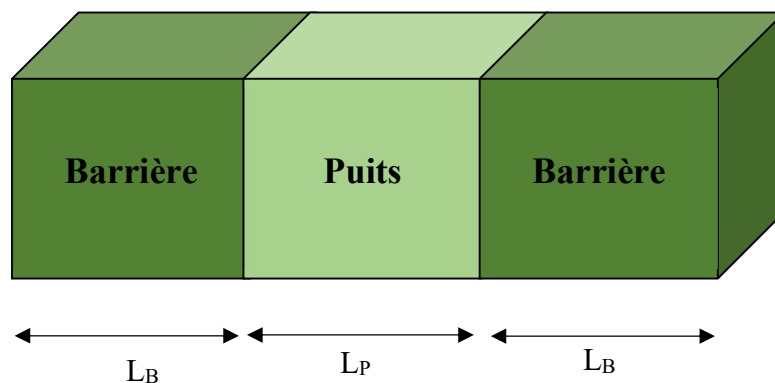


Figure 1.13. Schéma d'un puits quantique.

1.18. Décalages de bandes

Lorsqu'on forme une hétérostructure entre deux semiconducteurs différents, il y a un réalignement des bandes électroniques à l'interface pour assurer la continuité des potentiels chimiques (niveaux de Fermi). Ce réalignement se traduit par des décalages de bandes (figure

1.14). La répartition du décalage entre conduction et valence dépend des affinités électroniques (χ) et des bandes interdites des deux matériaux, [15]. Les décalages de bande dans un puits quantique sont un phénomène important qui modifie les propriétés électroniques et optiques de ces structures.

Les changements dans la position des bandes de valence et de conduction sont influencés par le confinement quantique. Les niveaux d'énergie des électrons sont décalés vers des énergies plus élevées dans la bande de conduction, tandis que les niveaux d'énergie des trous sont décalés vers des énergies plus faibles dans la bande de valence.

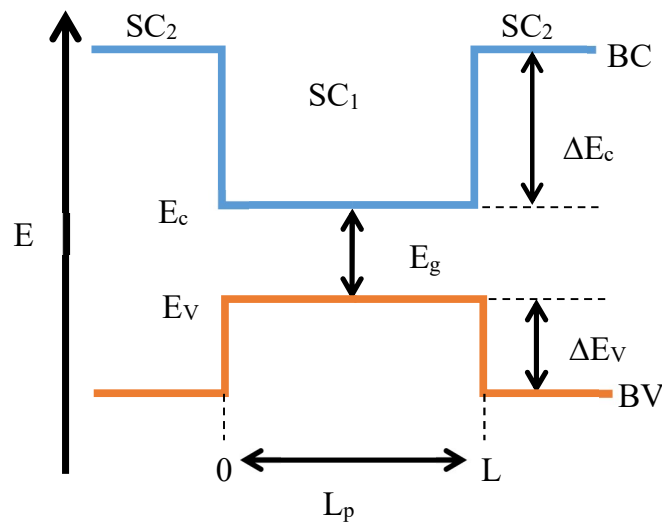


Figure 1.14. Décalage des bandes dans une structure à puits quantique.

Le décalage des bandes de conduction et de valence sont obtenus par les équations suivantes :

$$\Delta E_c = E_{c,b} - E_{c,p} \quad (1.6)$$

$$\Delta E_v = E_{v,b} - E_{v,p} \quad (1.7)$$

Ainsi, un ΔE positif indique que les électrons sont confinés dans le matériau 1, et réciproquement. Ce décalage revêt une importance majeure dans les dispositifs optoélectroniques pour le confinement des électrons.

L'impact de la contrainte est pris en compte et les calculs sont soigneusement expliqués dans la référence [15].

1.19. Taux de confinement

Ce paramètre indique la quantité des porteurs (trous et électrons) confinés dans la bande de conduction et la bande de valence, respectivement. Il est déterminé par les équations suivantes :

$$Q_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_c + \Delta E_v} \quad (1.8)$$

$$Q_v = \frac{\Delta E_v}{\Delta E_c + \Delta E_v} \quad (1.9)$$

1.20. Energie de quantification

Le confinement des porteurs de charge dans le puits crée une structure de sous-bandes énergétiques, c'est-à-dire des niveaux d'énergie discrètes, au lieu de bandes continues (figure 1.15). Ces sous-bandes sont décalées par rapport aux bandes de valence et de conduction massives, et leurs énergies dépendent de la largeur du puits et de la différence de bande interdite entre le puits et les barrières.

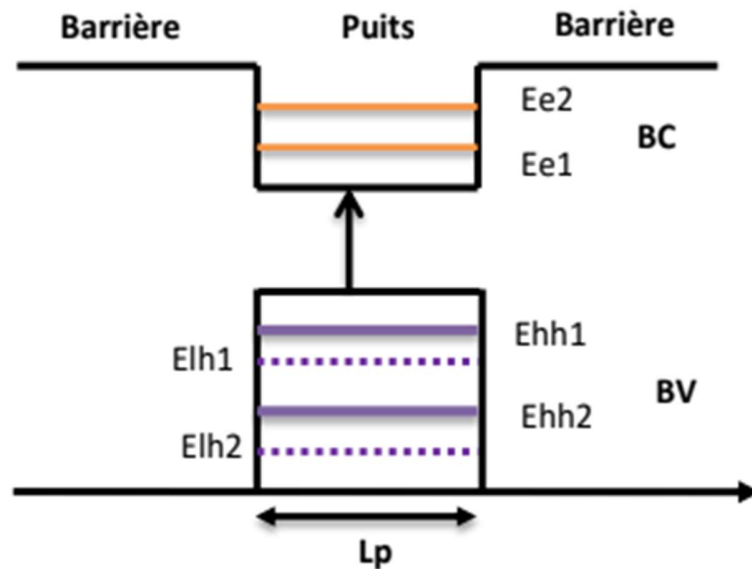


Figure 1.15. Niveaux énergétiques dans une structure à puits quantique.

En prenant en compte les niveaux discrets le long de la direction z et le continuum d'états le long des directions x et y , les états d'énergie d'une particule confinée dans un puits quantique sont donnés par l'expression, [15] :

$$E(n, k_x, k_y) = E_n + \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) \quad (1.10)$$

L'équation de Schrödinger a les expressions suivantes :

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dz^2} + (V - E_n)\psi = 0 & (z \geq L_p, z \leq 0) \\ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dz^2} - E_n\psi = 0 & (0 \leq z \leq L_p) \end{cases} \quad (1.11)$$

Où \hbar est la constante de Planck, ψ est la fonction d'onde, V est la profondeur du puits de potentiel, L_p est l'épaisseur du puits, m^* représente la masse effective de la particule.

L'écriture des conditions de raccordement des fonctions d'ondes et de leurs dérivées $\frac{1}{m^*} \frac{d\psi}{dz}$ qui doivent être continues aux interfaces $z=0$ et $z=L_p$, dans le cas de puits finis on aboutit à la forme suivante de la fonction enveloppe:

$$\psi = \begin{cases} A \exp(k_1 z) & , z \leq 0 \\ B \exp(k_2 z + \delta) & , 0 \leq z \leq L_p \\ C \exp(-k_1 z) & , z \geq L_p \end{cases} \quad (1.12)$$

Avec $k_1 = \left(\frac{2m^*(V-E_n)}{\hbar^2}\right)^{1/2}$ et $k_2 = \left(\frac{2m^*E_n}{\hbar^2}\right)^{1/2}$

où A , B , C et δ sont des constantes.

L'équation aux valeurs propres donnée par l'expression :

$$\frac{\sqrt{2m_1 E_n}}{\hbar} L_p = n\pi - 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{m_2 E_n}{m_1 (V-E_n)}} \right) \quad (1.13)$$

Où : m_2 et m_1 sont respectivement les masses effectives de l'électron dans le puits et la barrière. Le potentiel V est une fonction de l'écart d'énergie de bande interdite ΔE_g de part et d'autre de l'hétérojonction puits/barrière.

1.21. Masse effective

Les masses effectives des porteurs sont définies à l'aide des paramètres de Luttinger γ_1, γ_2 , à partir des expressions suivantes, [14] :

- ✓ Pour les trous lourds (hh):

$$m_{hh}^* = \frac{m_0}{\gamma_1 - 2\gamma_2} \quad (1.14)$$

- ✓ Pour les trous légers (lh) :

$$m_{lh}^* = \frac{m_0}{\gamma_1 + 2\gamma_2} \quad (1.15)$$

- ✓ Pour les trous spin-orbite (SO) :

$$m_{SO}^* = \frac{m_0}{\gamma_1} \quad (1.16)$$

1.22. Le gain optique

Le gain optique est défini comme le rapport de croissance de l'intensité lumineuse (densité photonique) par unité de longueur de propagation lumineuse. Comme le coefficient d'absorption optique α , le coefficient de gain optique g est exprimé en centimètres inverses (1/cm). L'absorption photonique provoque la transition d'un électron d'une bande d'énergie inférieure à une bande d'énergie supérieure, créant ainsi une paire électron-trou. Le gain est généré par la recombinaison stimulée d'une paire électron-trou existante, créant un second photon (figure 1.16). Ce second photon présente la même longueur d'onde et la même phase que le premier, doublant ainsi l'amplitude de l'onde monochromatique. La répétition ultérieure de ce processus conduit à une forte amplification lumineuse [16].

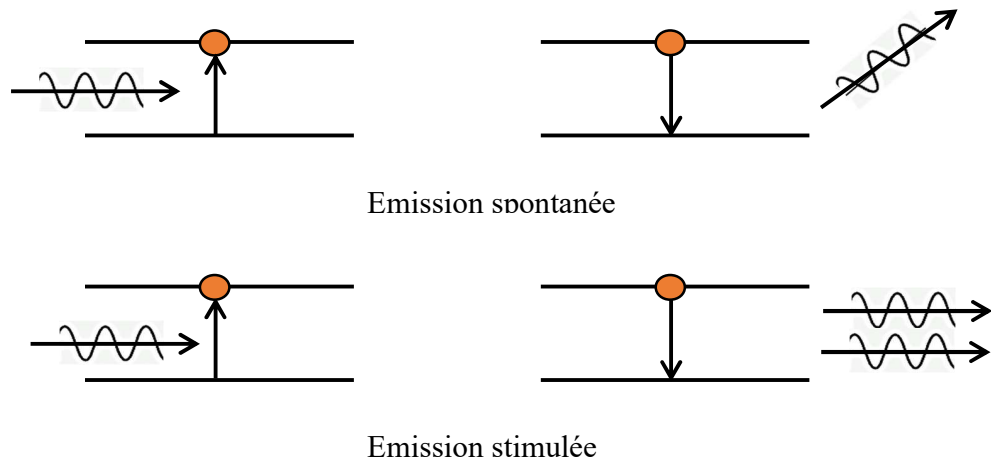


Figure 1.16. Emission spontanée et stimulée.

Le modèle de gain d'Asada est un outil très essentiel pour comprendre et évaluer le gain optique au sein des matériaux semiconducteurs, surtout dans les architectures à puits quantiques. Concernant les lasers semiconducteurs, le gain optique est crucial pour réaliser l'amplification requise pour produire de la lumière cohérente. Ce modèle est très bien expliqué dans les références [14,17].

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons globalement présenté les concepts fondamentaux concernant les matériaux semiconducteurs, en mettant l'accent sur les semiconducteurs du groupe III-V en raison de leurs caractéristiques physiques et électroniques distinctes. Nous avons commencé par une typologie des alliages en fonction de leur composition (binaire, ternaire, quaternaire), suivie d'une description de leur structure cristalline. Par la suite, nous avons examiné la représentation de la bande interdite (gap énergétique) tout en discutant de diverses méthodes de croissance épitaxiale. Certaines propriétés liées à la contrainte mécanique et à l'alignement des bandes ont aussi été abordées, ainsi que les énergies de quantification et le calcul du gain optique. Pour terminer, cette fondation théorique nous a permis d'explorer, dans le chapitre suivant, l'analyse et la simulation des caractéristiques électroniques et optiques de la structure à puits quantique InGaAsP/InGaP.

Chapitre2

Simulation et résultats

Chapitre 2 : Simulation et résultats

2.1 Introduction

Dans cette partie de thèse, nous allons réaliser une analyse théorique sur les différentes caractéristiques optoélectroniques de la structure à puits quantique InGaAsP/InGaP. Nous allons examiner l'influence des concentrations des atomes d'indium (In) et de l'arsenic (As) du matériau puits qui est le quaternaire InGaAsP ainsi que l'influence de la teneur en indium dans le substrat InGaP sur le paramètre de maille, la contrainte, la bande interdite ainsi que les masses effectives et d'autres facteurs. Dans la suite, nous allons examiner comment cela affecte le gain optique.

2.2. Paramètre de maille

Le paramètre de maille est d'une très grande importance. Il permet de calculer la compacité de la structure et est essentiel pour déterminer les propriétés physiques et chimiques du cristal. Il sera défini par les expressions suivantes, (Eq 2.1 pour l'alliage quaternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ qui compose le puits et Eq 2.2 pour le matériau ternaire $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ formant le substrat), selon la loi de Végard :

$$a_{\text{InGaAsP}} = x(1-y)a_{\text{InP}} + (1-x)(1-y)a_{\text{GaP}} + xy a_{\text{InAs}} + y(1-x)a_{\text{GaAs}} \quad (2.1)$$

$$a_{\text{InGaP}} = z a_{\text{InP}} + (1-z)a_{\text{GaP}} \quad (2.2)$$

x et y sont les concentrations des atomes d'indium et de l'arsenic dans le matériau $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ et z la concentration de l'indium dans le matériau InGaP. Le tableau 2.1 donne les valeurs des paramètres de maille des semiconducteurs binaires utilisées dans nos calculs : InP , GaP , InAs, GaAs.

Tableau 2.1. Valeurs des paramètres de maille [18].

$a(\text{\AA})$	InP	GaP	InAs	GaAs
	5.8690	5.4508	6.0583	5.65330

Les illustrations 2.1 et 2.2 présentent la variation du paramètre de maille des matériaux $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ et $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ en fonction des quantités d'indium (In) et d'arsenic (As), respectivement. Le paramètre de maille varie d'une façon linéaire. Il est évident que la valeur du paramètre de maille augmente de manière significative en augmentant la concentration d'indium et d'arsenic.

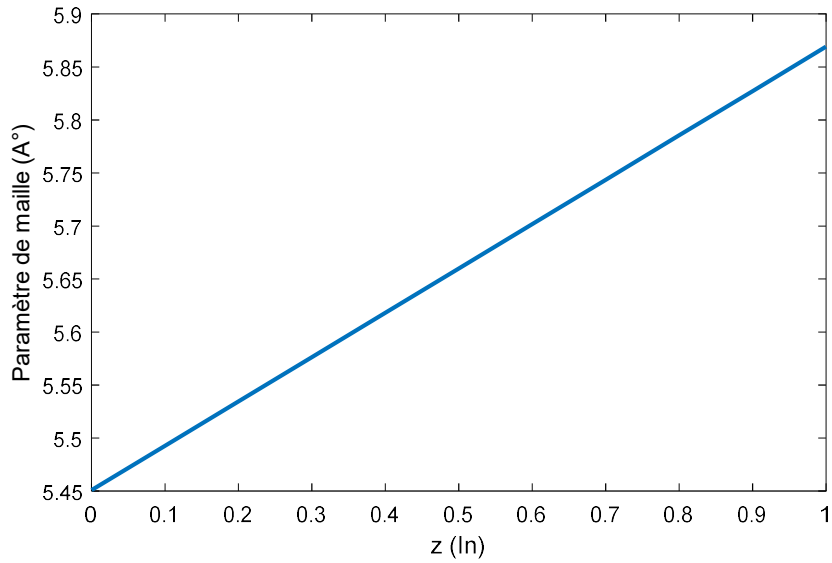


Figure 2.1. Variation du paramètre de maille de l'alliage $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ en fonction de la concentration d'In.

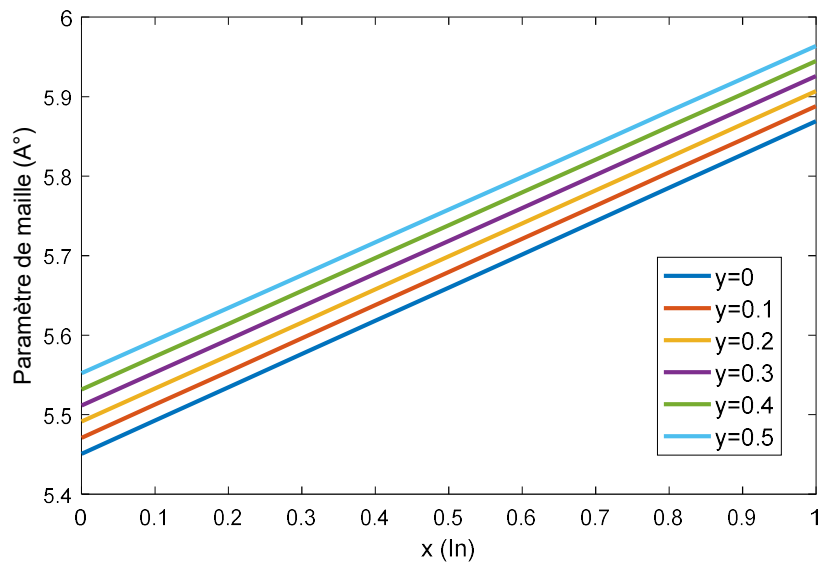


Figure 2.2. Variation du paramètre de maille de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ en fonction de la concentration d'In pour plusieurs concentration d'As.

2.3. Les masses effectives

La figure 2.3.a, nous montre la variation des masses effectives des différents porteurs de charges en fonction de la concentration d'In dans la barrière $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$. Il est noté que l'accroissement de la proportion d'indium dans le ternaire InGaP entraîne une légère réduction de la masse effective des électrons, des lh ainsi que de la masse de SO. Cela conduit à une amélioration de leur mobilité, même si cet effet demeure modeste, il reste significatif. Par ailleurs, on constate une augmentation marquée de la masse effective des hh , ce qui restreint leur mobilité et pourrait influencer les caractéristiques des matériaux InGaP.

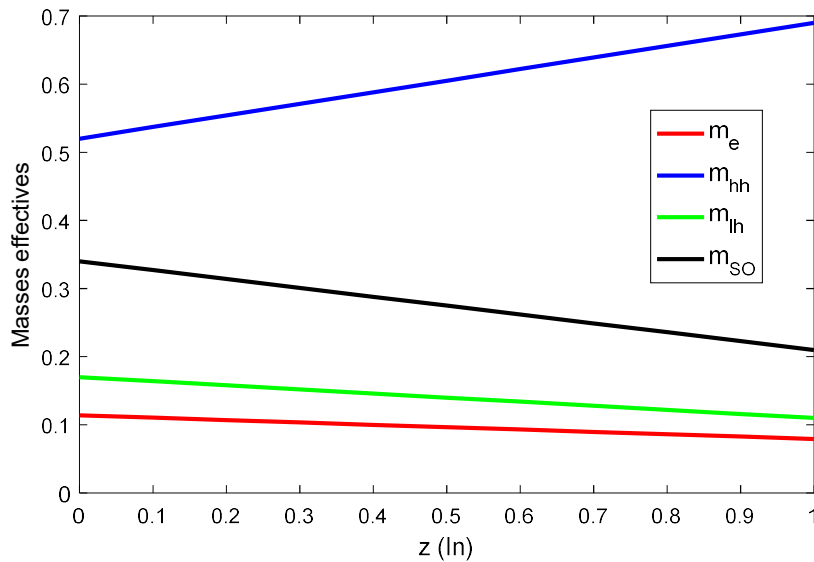


Figure 2.3.a. Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In pour l'alliage InGaP.

En ce qui concerne le matériau puits InGaAsP, les figures 2.3.b et 2.3.c montrent que la masse effective des électrons diminue avec une concentration croissante, en indium cela indique également que la mobilité des électrons s'élève. Il est également observé qu'une augmentation de la concentration en arsenic (y) entraîne une réduction de la masse effective des e . Une observation similaire concernant l'impact des concentrations sur la masse effective des lh et les trous SO pour le quaternaire InGaAsP est notée. En ce qui concerne la masse effective des hh , les deux illustrations indiquent que cette masse s'accroît avec une progression de la concentration d'indium, ainsi que la concentration d'arsenic.

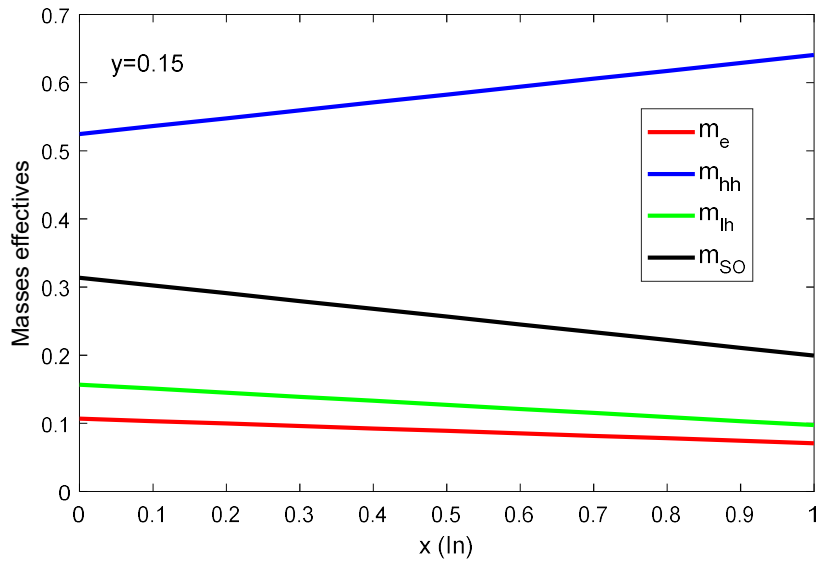


Figure 2.3.b. Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In et $y=0.15$ pour l'alliage InGaAsP.

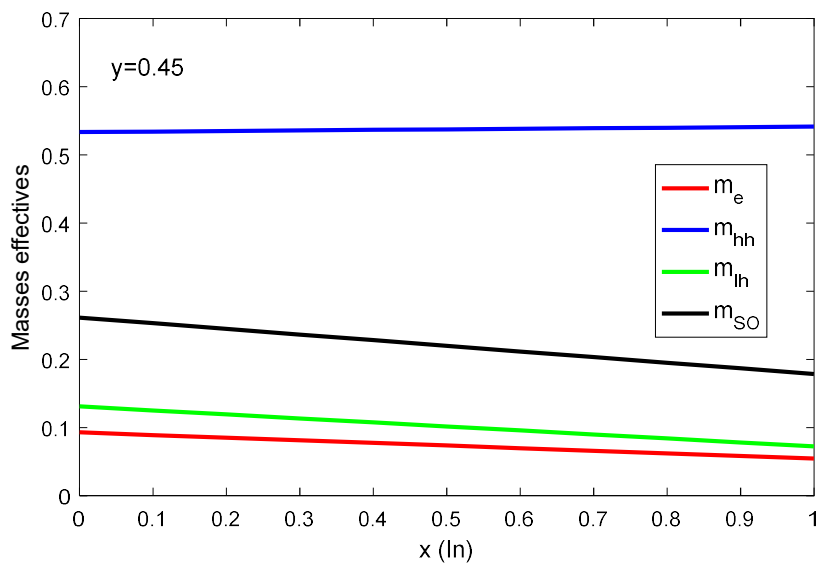


Figure 2.3.c. Variation des masses effectives des porteurs en fonction des concentrations d'In et $y=0.45$ pour l'alliage InGaAsP.

2.4. Energie de spin-orbite

L'énergie de spin-orbite se réfère à l'interaction qui existe entre le spin d'un électron et son mouvement orbital autour du noyau atomique. Cette interaction entraîne une séparation des niveaux d'énergie et affecte les propriétés optiques et électroniques des matériaux

semiconducteurs. Cette énergie sera définie par les expressions suivantes, (Eq 2.3 pour l'alliage quaternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ qui compose le puits et Eq 2.4 pour le matériau ternaire $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ formant la barrière), selon la loi de Végard :

$$\Delta_{\text{InGaAsP}} = x(1-y)\Delta_{\text{InP}} + (1-x)(1-y)\Delta_{\text{GaP}} + xy\Delta_{\text{InAs}} + y(1-x)\Delta_{\text{GaAs}} \quad (2.3)$$

$$\Delta_{\text{InGaP}} = z\Delta_{\text{InP}} + (1-z)\Delta_{\text{GaP}} \quad (2.4)$$

La figure 2.4 nous montre que l'énergie spin-orbite dans le matériau barrière $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ augmente avec l'accroissement de la teneur en indium.

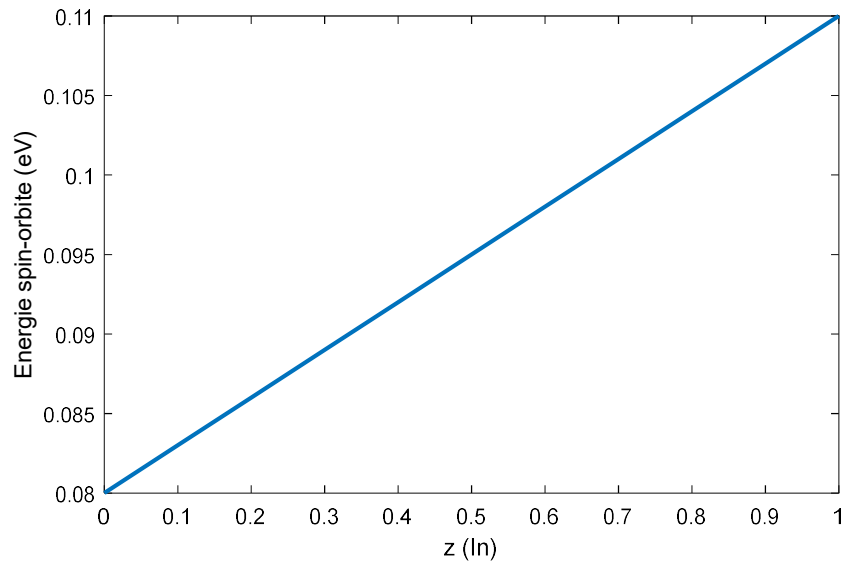


Figure 2.4. Variation de l'énergie spin-orbite de l'alliage $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$.

La figure 2.5 illustre la manière dont l'énergie de spin-orbite de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ évolue en fonction des concentrations respectives d'indium et d'arsenic. On observe que l'énergie de spin-orbite croît à mesure que les niveaux de ces deux éléments augmentent.

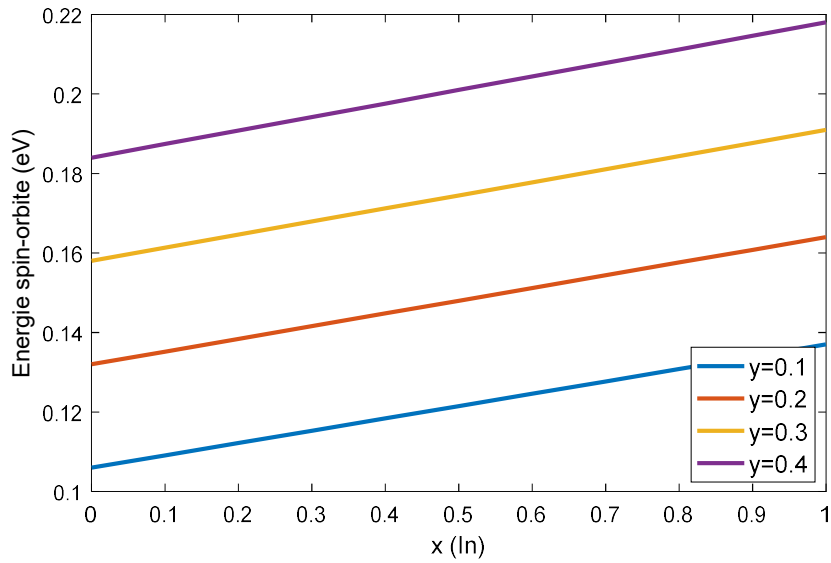


Figure 2.5. Variation de l'énergie spin-orbite de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ pour plusieurs concentration d'As.

2.5. La contrainte

Les figures 2.6 (a, b, c) présentent les courbes isoréponses de la contrainte dans la structure $\text{InGaAsP}/\text{InGaP}$. Lorsque la contrainte est supérieure à 0, la structure présente une tension, alors que si la contrainte est inférieure à 0, la contrainte est de type compression.

Pour les petites quantités de l'indium dans le substrat, on remarque que la structure $\text{InGaAsP}/\text{InGaP}$ prouve une contrainte de compression et qu'on ne peut pas avoir une structure adaptée.

Il est également important de noter que la contrainte prouve un accord de maille entre le matériau épitaxié InGaAsP et le substrat InGaP lorsque la valeur de la concentration du phosphore augmente.

Ces illustrations mettent en lumière l'importance significative de la concentration d'indium dans le substrat, influençant ainsi la tension au sein de la structure $\text{InGaAsP}/\text{InGaP}$.

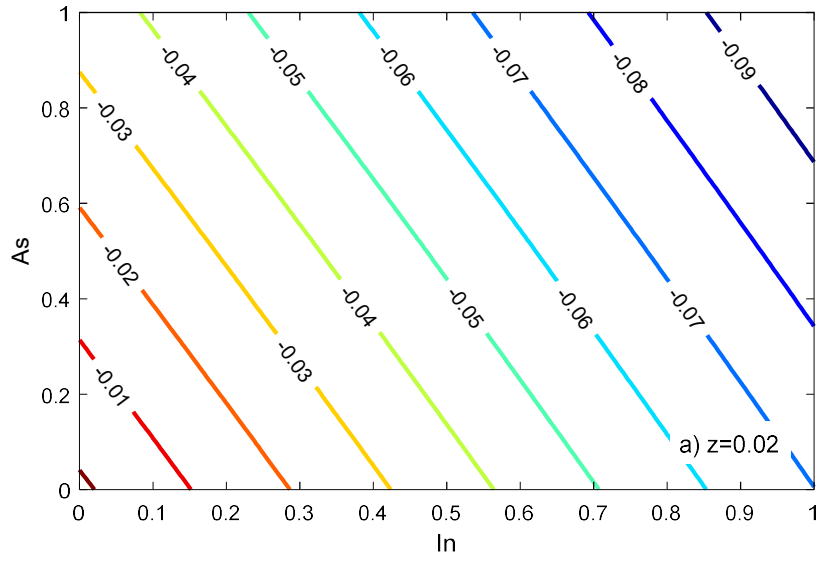


Figure 2.6. a. Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.02$).

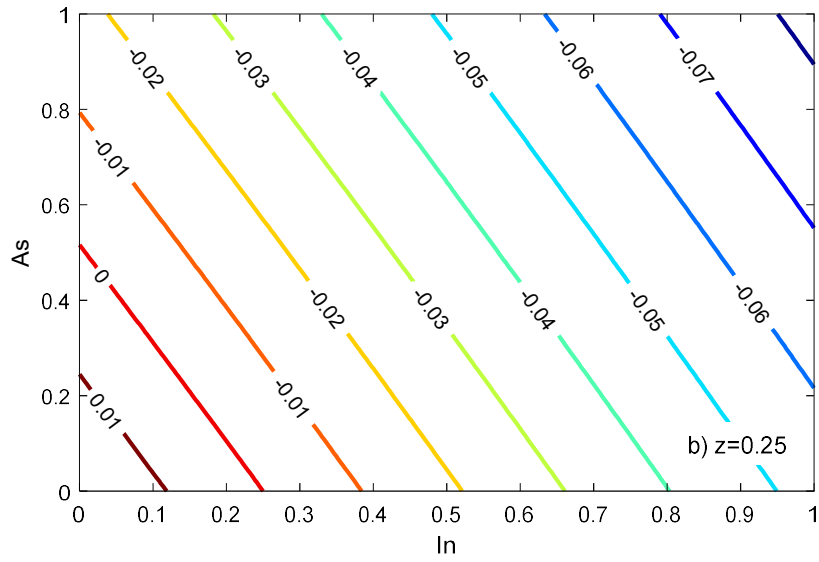


Figure 2.6. b. Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.25$).

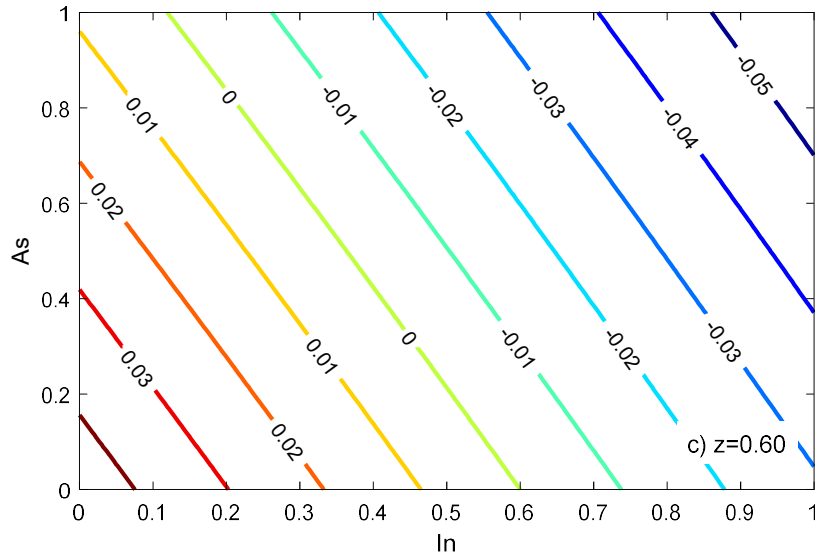


Figure 2.6. c. Contrainte dans la structure InGaAsP/InGaP ($z=0.60$).

2.6. La bande d'énergie

L'ajout des atomes d'indium et d'arsenic au matériau InGaAsP peut être décrit par la loi de Végard, en y intégrant le facteur de Bowing C comme une correction.

$$E_g = x(1 - y)E_g(\text{InP}) + y(1 - x)E_g(\text{GaAs}) + (1 - x)(1 - y)E_g(\text{GaP}) + xyE_g(\text{InAs}) + C \quad (2.8)$$

$$C = x(1 - x)[yC(\text{InGaAs}) + (1 - y)C(\text{GaAsP})] + y(1 - y)[(1 - x)C(\text{GaAsP}) + xC(\text{InAsP})] \quad (2.9)$$

De même pour le matériau de la barrière InGaP, l'énergie de gap est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$E_{g(\text{InGaP})} = zE_{g(\text{InP})} + (1 - z)E_{g(\text{GaP})} - 0.65z(1 - z) \quad (2.10)$$

La figure 2.7 représente la variation de E_g dans l'alliage ternaire $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{P}$ en fonction des concentrations d'In. L'énergie E_g diminue avec l'augmentation des concentrations en indium.

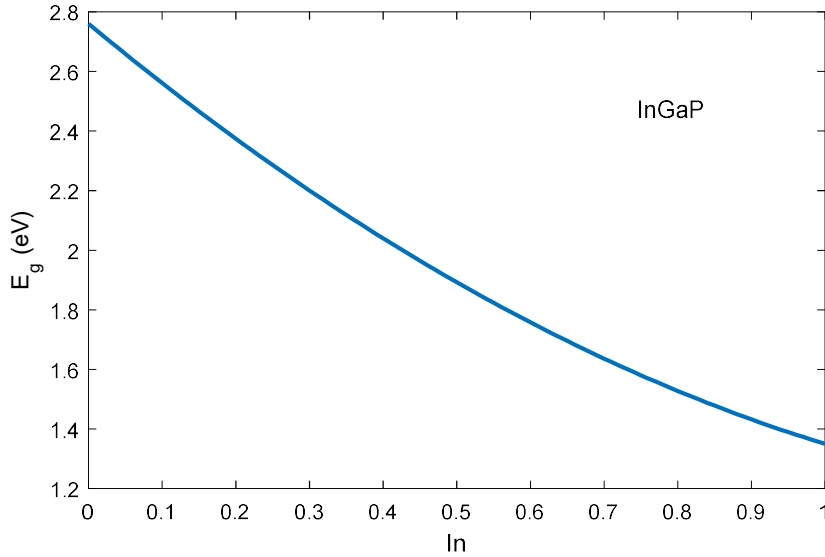


Figure 2.7. Evolution de l'énergie de E_g de InGaP en fonction de la concentration d'In.

La figure 2.8 représente les courbes isoréponses de l'énergie de bande interdite dans l'alliage quaternaire $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}$ en fonction des concentrations d'indium et d'arsenic. L'énergie E_g diminue avec l'augmentation des concentrations en indium (x) et en arsenic (y).

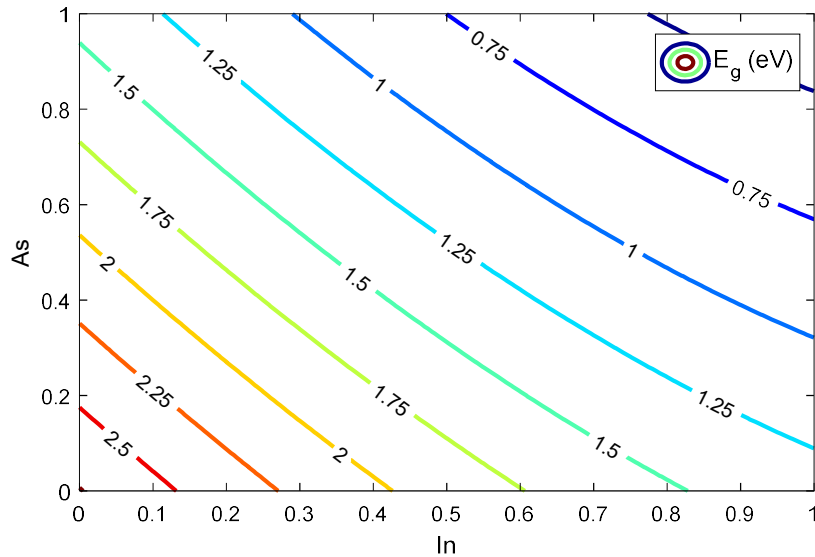


Figure 2.8. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de la concentration de l'In et d'As.

2.7. La bande d'énergie en fonction de la température

Les figures 2.9 et 2.10 illustrent la variation de E_g de l'alliage $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ en fonction de la température et des concentrations x et y , respectivement. L'effet de T sur le gap du matériau substrat est illustré dans la figure 2.11. E_g diminue avec T suivant une courbe quadratique. La diminution de E_g est due à l'expansion thermique et les interactions électron-phonon.

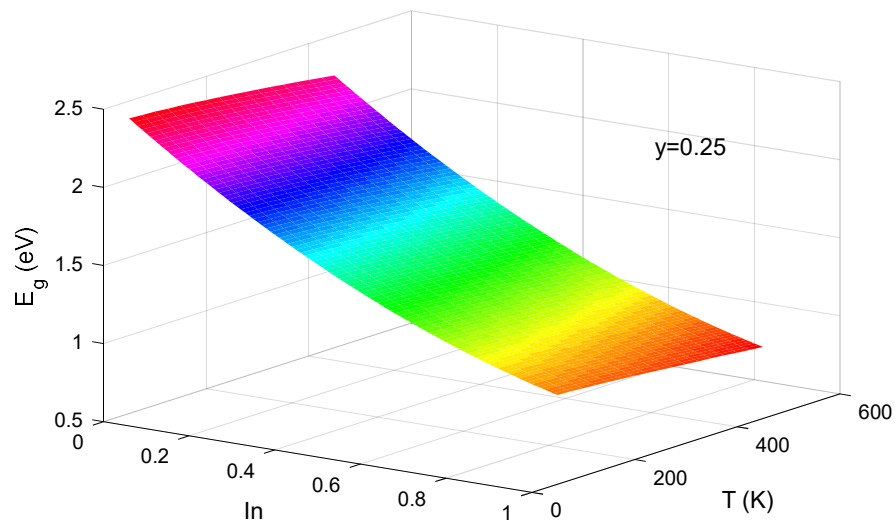


Figure 2.9. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de T et la concentration d'In.

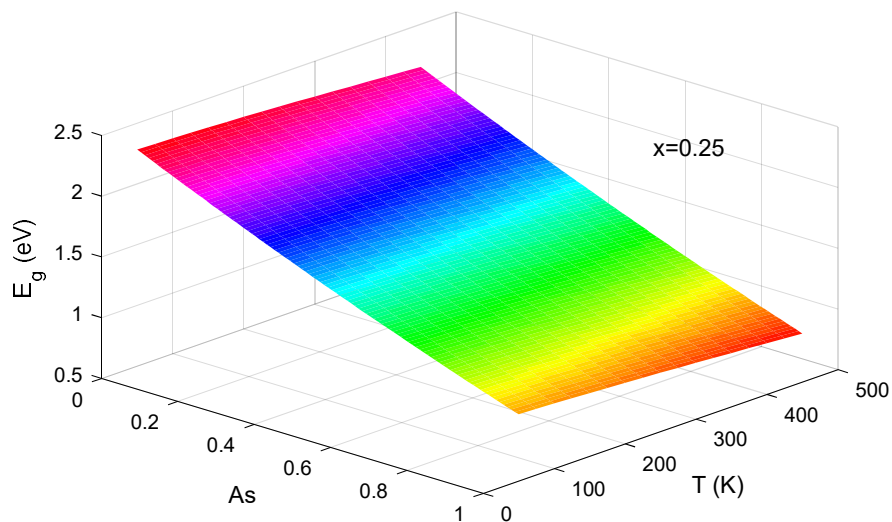


Figure 2.10. Evolution de E_g de InGaAsP en fonction de T et la concentration d'As.

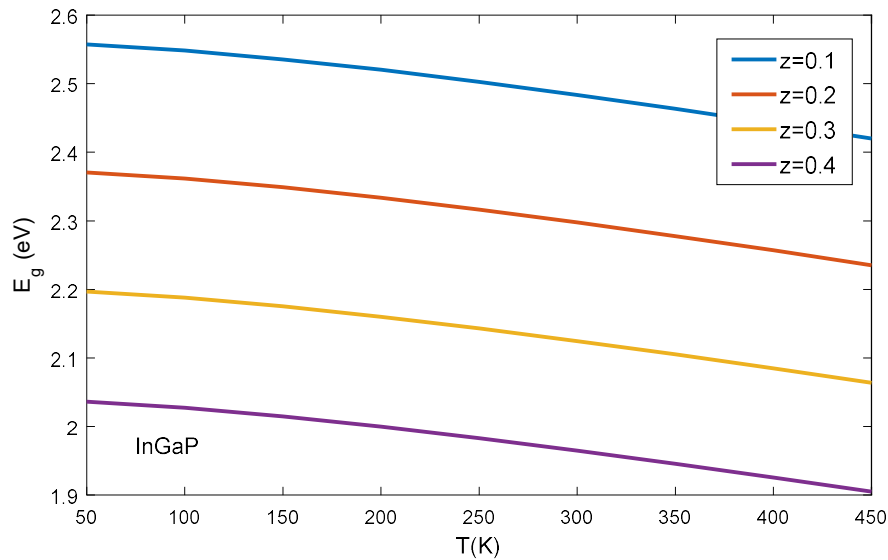


Figure 2.11. Evolution de E_g de InGaP en fonction de T et la concentration d'In.

2.8. Décalages des bandes ΔE_c et ΔE_v

Les figures 2.12 et 2.13 représentent les décalages de bandes ΔE_c et ΔE_v de la structure à puits quantique InGaAsP/InGaP en fonction des concentrations d'In et de l'As pour une valeur d'In dans le substrat qui est égale à 0.25. Quand au figures 2.14 et 2.15, elles représentent les décalages de bandes ΔE_c et ΔE_v de la même structure mais pour une valeur d'In dans le substrat qui est égale à 0.35.

On constate que les décalages de la bande de conduction et de la bande de valence, le décalage ΔE_c augmente en augmentant les concentrations en In et As dans la structure à puits quantique InGaAsP/InGaP. Mais l'augmentation est plus marquée pour ΔE_c indiquant une plus grande sensibilité de la bande de conduction à la composition de l'alliage. Par contre, elles ont des effets inverses sur le décalage de la bande de valence ΔE_v .

Même remarque pour l'effet de la concentration d'indium dans le substrat, son augmentation mène à l'accroissement de ces deux facteurs ΔE_c et ΔE_v .

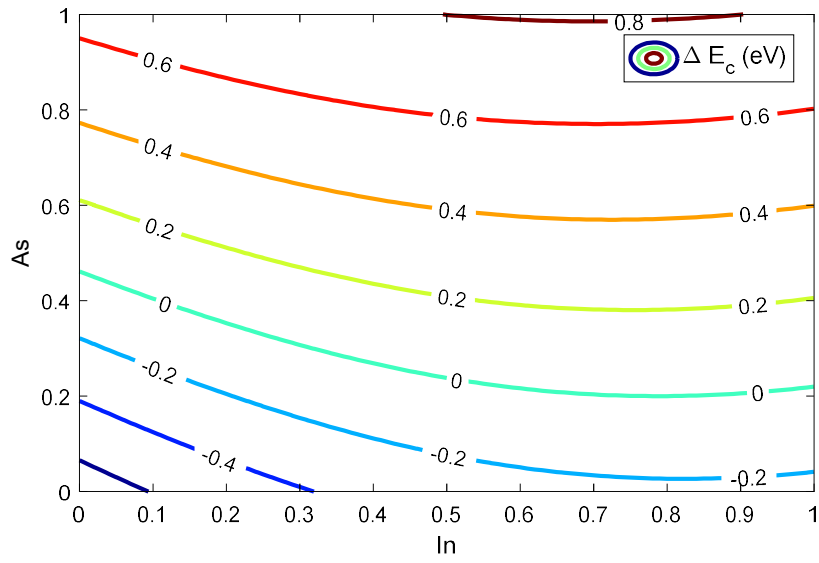


Figure 2.12. Evolution de ΔE_c en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.25$).

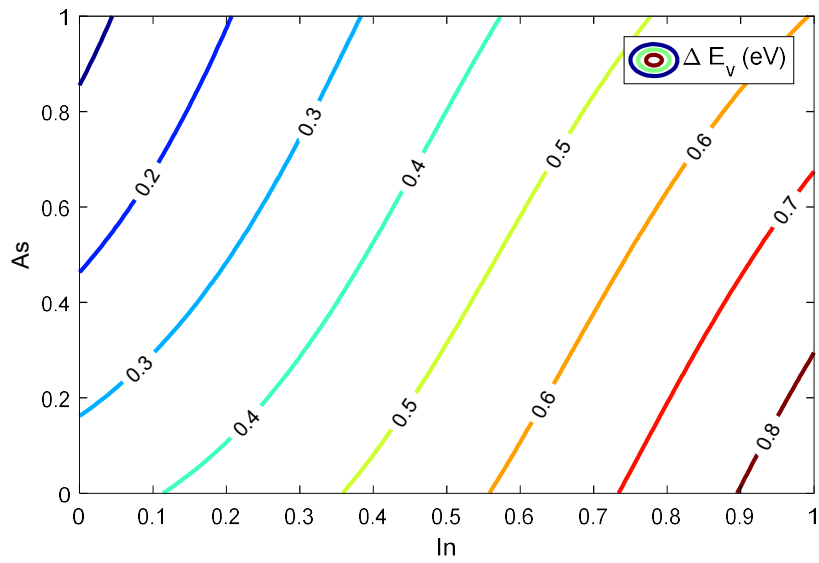


Figure 2.13. Evolution de ΔE_v en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.25$).

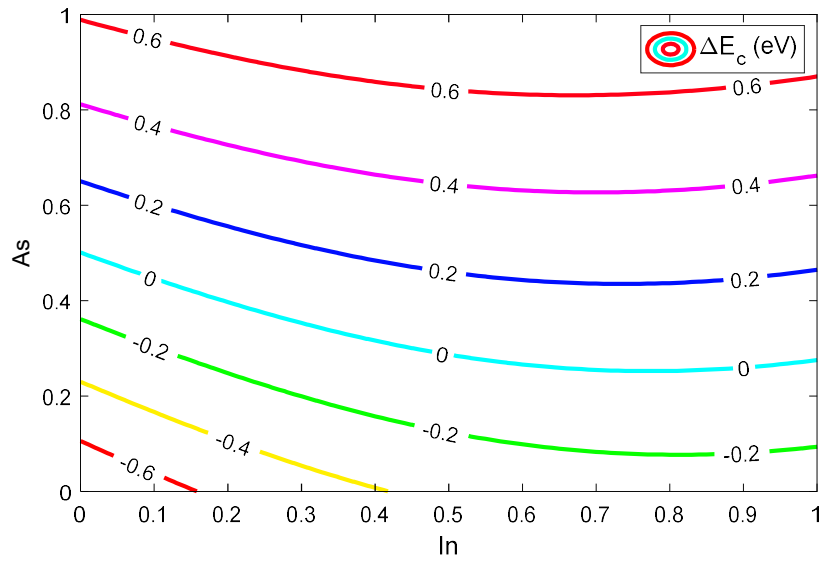


Figure 2.14. Evolution de ΔE_c en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.35$).

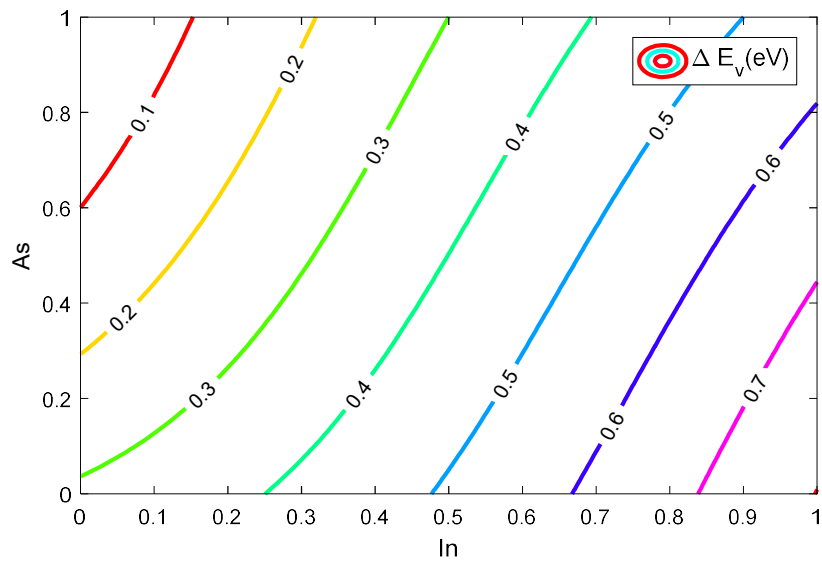


Figure 2.15. Evolution de ΔE_v en fonction de la concentration de l'In et d'As ($z=0.35$).

2.9. Le gain optique

Les figure 2.16, 2.17 et 2.18 illustrent comment le coefficient de gain optique varie selon la longueur d'onde d'émission pour différentes concentrations d'indium dans la configuration à puits quantique InGaAsP/InGaP pour les ensembles de concentrations (y, z) : $(0.25, 0.2)$, $(0.4, 0.2)$ et $(0.4, 0.4)$, respectivement.

Il est clair que l'augmentation de toutes les concentrations provoque une hausse du coefficient de gain optique et induit un déplacement de la longueur d'onde correspondante vers des valeurs plus élevées dans le secteur des infrarouges. Cependant, l'impact de l'arsenic sur le matériau puits concernant le pic de gain optimal de la structure InGaAsP/InGaP est significativement plus prononcé que celui de l'élévation des concentrations d'indium, que cela soit dans le matériau puits ou le substrat.

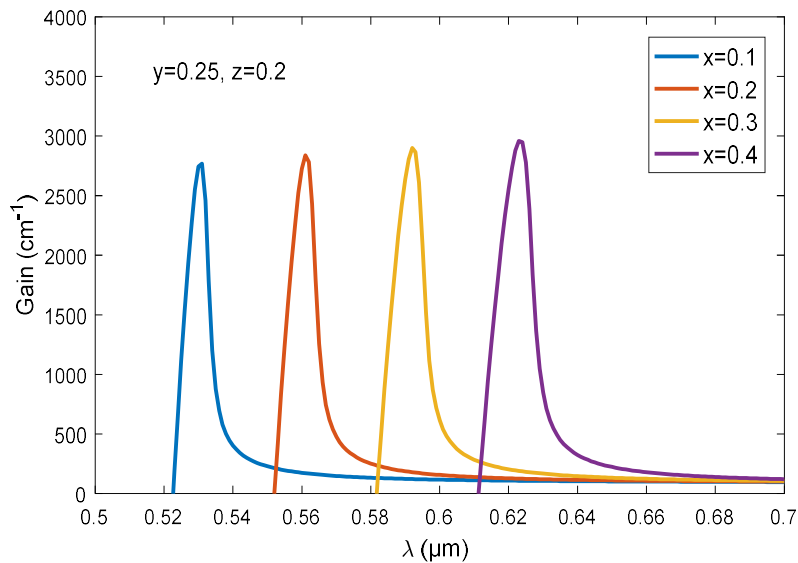


Figure 2.16. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.25$ et $z=0.2$).

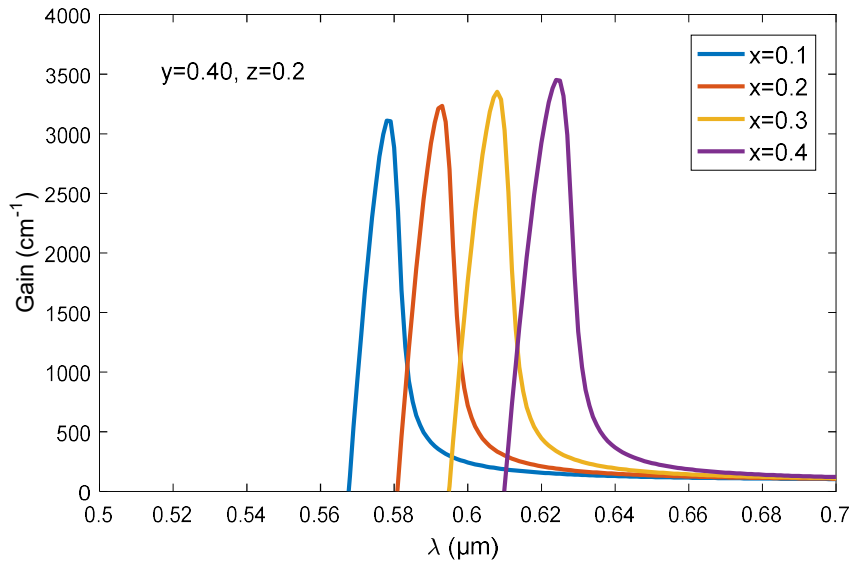


Figure 2.17. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.40$ et $z=0.2$).

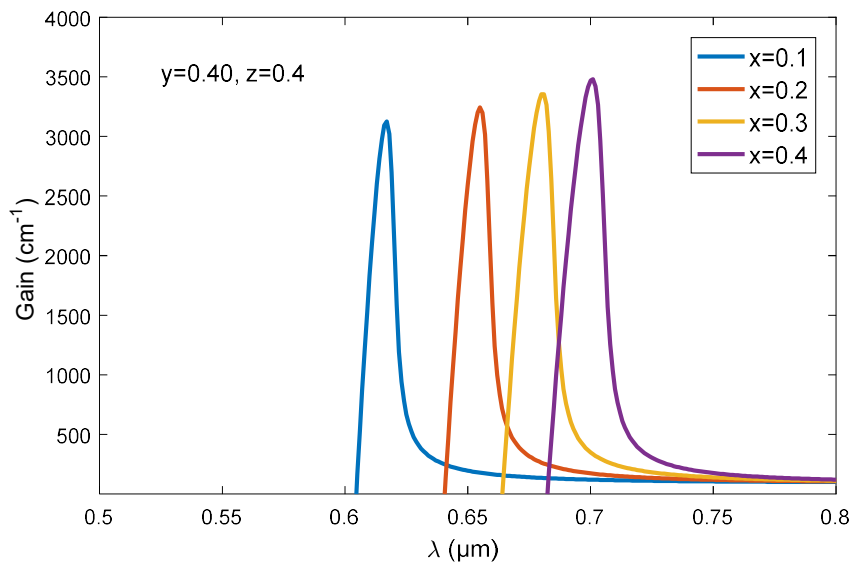


Figure 2.18. Variation du gain en fonction de λ pour différentes concentrations d'In, ($y=0.40$ et $z=0.4$)

Conclusion

Nous avons réalisé une analyse théorique visant à optimiser l'efficacité d'un capteur composé d'InGaAsP/InGaP. Il a été démontré que les proportions d'indium et d'arsenic dans le puits d'InGaAsP, ainsi que la proportion d'indium dans le matériau de base, ont une influence cruciale sur les propriétés optoélectroniques de cette configuration. Une augmentation des concentrations

de ces éléments entraîne une élévation de la valeur du gain optique dérivé des transitions interbandes, tout en déplaçant la longueur d'onde associée vers des valeurs plus élevées dans le spectre infrarouge.

Conclusion générale

L'optoélectronique constitue un domaine très intéressant en physique. Comme son appellation le suggère, elle combine l'optique avec l'électronique. Elle présente des implications significatives dans plusieurs secteurs, notamment en informatique, en électronique médicale et dans les télécommunications.

Des matériaux semiconducteurs sont employés dans la conception de dispositifs électroniques et optoélectroniques tels que des transistors, des diodes électroluminescentes, des lasers à base de semiconducteurs, des capteurs ainsi que des cellules solaires.

Ces matériaux jouent donc un rôle crucial dans l'économie contemporaine, surtout pour les secteurs de la microélectronique et du photovoltaïque. En dépit de la signification de ces domaines, les semiconducteurs demeurent essentiellement inexplorés et constituent un thème de recherche très dynamique.

L'utilisation d'autres matériaux permet d'explorer un vaste éventail d'études sur des matériaux étonnants dire magiques, compacts et rapides.

L'objectif de ce travail est d'étudier et d'améliorer les performances d'un capteur à base d'InGaAsP/InGaP.

Nous avons constaté que l'incorporation d'indium élève la valeur du paramètre de maille et l'énergie du spin-orbite, tout en modifiant les niveaux de bande et la masse des trous lourds. Toutefois, cela entraîne une réduction de l'énergie de la bande interdite et de la masse effective des électrons, des trous légers et de ceux associés au spin-orbite. Une hausse de la concentration en arsenic a un impact similaire sur tous les paramètres mentionnés, à l'exception du décalage de la bande de valence, où cette augmentation provoque une diminution de celui-ci. Concernant la quantité d'In dans le substrat InGaP, une hausse de celle-ci entraîne une augmentation du paramètre de maille ainsi que du décalage du spin-orbite, mais une diminution des autres paramètres.

L'augmentation de toutes les concentrations provoque une hausse du coefficient de gain optique et induit un déplacement de la longueur d'onde correspondante vers des valeurs plus élevées dans le secteur des infrarouges. Cependant, l'impact de l'arsenic sur le matériau puits concernant le pic de gain optimal de la structure InGaAsP/InGaP est significativement plus

prononcé que celui de l'élévation des concentrations d'indium, que cela soit dans le matériau puits ou le substrat.

Références

- [1] A. Aouiche, « Support de Cours Physique des semi-conducteurs », Université Larbi Tebessi, Tébessa, Algérie, 2022.
- [2] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/solides-cristallins/un-siecle-de-cristallographie-de-la-maille-0>
- [3] <https://www.chemtube3d.com/zns-zinc-blende-sphalerite-unit-cell-and-projection/>
- [4] V. Mehta, S. Deep, S. Jeewan, R. P. Chauhan, « Temperature effect on properties of chemical induced nano crystalline ZnSe thin films », Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-8, 2018.
- [5] S. Azaizia, « Alliages à base de GaAs pour applications optoélectroniques et spintroniques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2018.
- [6] L. Baroura, Travaux pratiques Matériaux 1, TP₂ : Indices de Miller, Université frères Mentouri, Constantine, Algérie.
- [7] H. Fraoucene, « Effet de la température (traitement thermique) sur les propriétés optoélectroniques et structurales de TiO₂ nanotube », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tiziouzou, Algérie, 2014.
- [8] J. F Mognotte, « Conception d'un circuit intégré en SiC appliqué aux convertisseurs de moyenne puissance », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2014.
- [9] J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet et P. Combrade, « Métallurgie, du minerais au matériau », Paris, Dunod, 2^{ème} éd., 1177, p. 313-314, 2002.
- [10] G. Tourbot, « Croissance par épitaxie par jets moléculaires et détermination des propriétés structurales et optiques de nanofils InGaN/GaN », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2012.

- [11] M. G. Mauk, « Handbook of Crystal Growth : Liquid-Phase Epitaxy », 225–316, 2015.
- [12] H. Shi, P. Zhou, J. Li, C. Liu, and L. Wang, « Functional gradient metallic biomaterials : techniques, current scenery and future prospects in the biomedical field » Front. Bioeng. Biotechnol., Vol. 8, 1-26, 2021.
- [13] R. Chanson, A. Martin, M. Avella, J. J. Nez, F. Pommereau and A. Rhallabi, « Cathodoluminescence study of InP photonic structures fabricated by dry etching », Journal of electronic materials, Vol. 39, 688-693 ,2010.
- [14] I. Vurgaftman et J. R. J. Meyer, « Band parameters for nitrogen-containing semiconductors », Journal of Applied Physics, vol. 94, no. 6, p. 3675, 2003.
- [15] A. Aissat, “Modélisation et simulation du gain optique et du courant de seuil d'un laser à puits quantique contraint à base de $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$ ”, Thèse de doctorat, ENP El-Harrach, Algérie, 2007.
- [16] J. Piprek, “Chapter 5 - Photon Generation », Semiconductor Optoelectronic Devices, Introduction to Physics and Simulation, 121-139, 2003.
- [17] M. Asada and Y. Suematsu, “Density-matrix theory of semiconductor lasers with relaxation broadening model Gain and gain suppression in semiconductor lasers,” IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-21, n°. 5, 434–442, 1985.
- [18] S. Adachi, « Ternary and quaternary compounds », S. Kasap, P. Capper (Eds.), Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, 725-741, 2017.